



**DENİZ TABANINDAKİ BORULARIN GÜVENİRLİĞE DAYALI
TASARIMI VE RİSK DEĞERLENDİRMESİ**

Ahmet DURAP

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2018

Ahmet DURAP tarafından hazırlanan “DENİZ TABANINDAKİ BORULARIN GÜVENİRLİĞE DAYALI TASARIMI VE RİSK DEĞERLENDİRMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY ÇOKLUĞU ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Can Elmar BALAS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylamıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Aslı NUMANOĞLU GENÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Atılım Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 08/05/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet DURAP

08/05/2018

DENİZ TABANINDAKİ BORULARIN GÜVENİRLİLİĞİNE DAYALI TASARIMI VE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet DURAP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Bu tez çalışmasında, deniz tabanındaki boruların hem düşeydeki hem de yataydaki yer değiştirme risk seviyelerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Modelleme çalışmasında, deniz tabanı topoğrafyasının, hidrodinamik yüklerin, boru-zemin etkileşiminin, dalgaların ve akıntının borular üzerindeki etkileri ve risk değerlendirmesi örnek uygulamalar üzerinde yapılmıştır. Boruların darbelere karşı risk seviyeleri için, uygulamada kullanılan Det Norske Veritas (DNV) standartlarına göre yeni seviye önerileri sunulmuştur. Bu çalışmadaki amaç, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak deniz tabanındaki boruların hem düşeyde hem de yataydaki yer değiştirme risklerini değerlendirerek, boruların taşıdığı farklı hammaddelemlerin boru dengesi üzerine olan etkisini ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışmada, boru et kalınlıklarının güvenilirlik üzerine etkisi hassasiyet analizi ile irdelenmiştir. Bu çalışmada endüstriyel boyutlu boruların tasarımına yönelik olup güvenilirliğe dayalı tasarımını içermektedir. Literatürdeki risk analizlerinde riskin seviyesi DNV-RP-H101 standardında düşük, orta ve yüksek risk seviyesi olmak üzere tanımlanmıştır. Belirtilen standartlarda daha çok zemin ve boru etkileşimi üzerinde durulurken, bu tez çalışmasında dalga ve akıntı etkisi birlikte irdelenmiştir. Bu tez çalışmasının özgün yönü, dalga parametrelerine bağlı olarak risk seviyelerinin irdelenmesi ve yıllık yıkılma olasılığının Türkiye’den bir saha uygulaması ile desteklenmesidir. Limit durum fonksiyonlarının MCB ile bulunan kesinlik değeri olasılığı denge durum yüzeyinin altında kalan bölgeyi tanımladığından yıllık yıkılma olasılığını vermektedir. Bu tez çalışması sonucundaki önerim, boru sistemlerinin bütünü düşünüldüğünde, MCB sonucunda bulunan olasılığın tanım olarak borunun münferit olarak yer değiştirmesini, başka bir deyişle deplasman limitinin aşılma olasılığını ifade etmesidir.

Bilim Kodu : 91112
Anahtar Kelimeler : Deniz tabanı boruları risk değerlendirilmesi, risk, boru tasarımı, Monte Carlo Benzeşimi
Sayfa Adedi : 219
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can Elmar BALAS

QUANTITATIVE RISK ASSESMENT OF SUBSEA PIPELINE INSTABILITY AND DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Ahmet DURAP

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

ABSTRACT

The assesment of displacement levels of both the vertical and horizontal displacements of the submarine pipeline has been done. In this modelling study, the effects of subsea topography, hydrodynamic loads, pipe-soil interaction, the effects of waves and currents on the pipeline, and the risk assesment were made on sample applications. A new level of proposal has been presented for impact risk levels of pipes in accordance with the Det Norske Veritas (DNV) standards used in practice. The risk assesment of the risk levels is examined in detail. The aim of this study is to evaluate the risk of displacement of both the vertical and horizontal displacements of the offshore pipeline, as well as the effects of the different raw materials carried by the pipeline on the pipeline balance, unlike other studies in the literature. In addition, in this study, the effect of pipe wall thickness on reliability was examined by sensitivity analysis. The effect of wave and current is investigated together while emphasizing the soil and pipe interaction in the above mentioned standards and applied in this thesis study. The thesis has a specific aspect with respect to study of risk levels depending on wave parameters and is supported by a field application than Turkey's annual probability of failure. The likelihood probability of limit state functions with MCB defines the region below the equilibrium state, thus giving the possibility of annual failure. The conclusion of this thesis study is that the probability that the MCB result is considered as the whole of the piping system is defined as the displacement of the pipe individually, in other words, the probability of exceeding the displacement limit.

Science Code	: 91112
Keywords	: Risk assessment of submarine pipeline , risk, pipeline design, monte carlo simulation
Number of Pages	: 219
Supervisor	: Prof. Dr. Can Elmar BALAS

TEŞEKKÜR

Eğitim ve tez çalışmalarım sürecinde hem desteğiyle hem de katkılarıyla beni yönlendiren, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum saygıdeğer bilim insanı hocam Prof. Dr. Can Elmar BALAS'a; yüksek lisans eğitimimde ve iş hayatımda bana destek olan değerli hocam Prof. Dr. Lale BALAS'a, vaktini, fikirlerini esirgemeyen ve bana yol gösteren sevgili hocam Doç. Dr. Asu İNAN'a, ilgisini ve düşüncelerini sakınmayan sevgili hocam Dr. Nihal YILMAZ'a; yüksek lisans öğrenimim boyunca sürekli beni destekleyen ve bana her konuda yardımcı olan değerli arkadaşım bilim insanı Dr. Yunus DOĞAN'a; değerli yorumlarıyla ve katkılarıyla beni yönlendiren ve bana güç veren saygıdeğer bilim insanı hocam Prof.Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN'a; varlığıyla güç veren, çevresindeki herkese ışık saçan, tanımış olmaktan her zaman mutluluk duyduğum sevgili Prof. Dr. Serdar GÖKTEPE'ye; danışmaktan çekinmediğim ve bana yol gösteren saygıdeğer bilim insanı Doç. Dr. Kerem TAŞTAN'a; gerek sevgi, gerekse sabır ve fedakârlıklarıyla bu günlere ulaşmamı sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Deterministik Tasarım.....	5
2.2. Risk Değerlendirmesi.....	6
2.3. Borular Arasındaki Oluşan Serbest Açıklığın Güvenirliği	7
2.4. Deniz Tabanındaki Boruların Anroşman Koruması	7
2.5. Kumlu Denizaltında Dalgaya Maruz Kalmış Boru Hattının Stabilitesi İçin Gelişmiş Analiz Metodu	8
2.6. Deniz Altındaki Gömülmemiş Boruların Burulmasının Statik ve Dinamik Analizi	8
2.7. Deniz Altındaki Aşınmış Borulara Cisim Düşme Riskinin Değerlendirilmesi ..	8
2.8. İstatiksel Analiz Tekniklerinin Dipteki Boru Hattının Stabilitate Analizine Uygulanması	9
2.9. FORM, SORM ve Monte Carlo Simülasyonu’nun FAD ile Birlikte Kullanılarak Boruların Güvenilirliklerinin Belirlenmesi	10
2.10. Deniz Altındaki Serbest Uzanan Boruların Güvenlik Değerlendirmesi	10
3. DETERMİNİSTİK TASARIM.....	11
3.1. Tasarım Parametreleri	11
3.1.1. Hız profili	11

	Sayfa
3.1.2. Akıntı.....	14
3.1.3. Akıntı ve dalga birleşik etkisi.....	14
3.1.4. Dalga parçacık hızının hesaplanması	20
3.1.5. Hidrodinamik yükler	21
3.2. Deterministik Tasarım Yöntemleri	26
3.2.1. Dinamik analiz.....	26
3.2.2. Genelleştirilmiş stabilite analizi	26
3.2.3. Basitleştirilmiş statik stabilite analizi.....	36
3.2.4. Gömülü borularda statik metot yöntemi.....	40
4. DENİZ TABANINDAKİ BORULARIN TASARIMINDA RİSK ANALİZİ	43
4.1. Genel Bilgiler	43
4.1.1. Risk analizi kavramları.....	43
4.1.2. Riske dayalı denetim ve bütünlük yönetimi	44
4.2. Kabul Edilir Kriterler	45
4.2.1. Bireysel Riskler	46
4.2.2. Çevresel Risk.....	46
4.3. Tasarım Koşulları.....	46
4.3.1. Temel koşullar	46
4.3.2. Yinelenme dönemi.....	47
4.3.3. Çevresel koşullar	47
4.3.4. Geoteknik koşullar	51
4.3.5. Batimetri koşulları	52
4.3.6. Boru karakteristikleri.....	52
4.4. Tasarım Yöntemi.....	53
4.4.1. Yük durumu.....	53

	Sayfa
4.4.2. Analiz yöntemleri	54
4.4.3. Batma/askıda kalma durumu	55
4.4.4. DNV tasarım akış diyagramı	55
4.5. Tasarım Kriterleri.....	57
4.5.1. Yatay yer değiştirme.....	57
5. BORU TASARIMI LİMİT DURUM FONKSİYONLARI.....	59
5.1. Yatay Limit Durum Fonksiyonu	59
5.2. Düşey Limit Durum Fonksiyonu	60
6. MONTE CARLO BENZEŞİMİ (MCB)	61
6.1. Model Oluşturma ve Monte Carlo Risk Analizini Genel Bakış	61
6.1.1. Model oluşturma.....	61
6.1.2. Varsayım aralığı	61
6.1.3. Tahmin aralığı	61
6.1.4. Analizin kesinliği.....	62
6.1.5. Kullanımı	62
6.2. Modelin Varsayım Tanımları.....	62
6.2.1. Veri hücrelerinin tipleri	62
6.2.2. Olasılık dağılımları	63
7. SAHA UYGULAMASI	67
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	131
EKLER.....	135
EK-1. Monte carlo benzeşimi ile risk analizi (1 m boru çapı için).....	136
EK-2. Monte carlo benzeşimi ile risk analizi (1.5 m boru çapı için).....	166
EK-3. Çalışma alanının meteorolojik özellikleri ve rüzgâr iklimi.....	197
EK-4. Çalışma alanının dalga ve akıntı iklimi.....	204

	Sayfa
EK-5. Özata tersanesi manevra sahası ile BOTAS boru hattının birbirlerine göre mesafe ve konumlarını gösteren vaziyet planı	215
EK-6. Tasarım için Excel görüntüleri	216
ÖZGEÇMİŞ	219

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Deniz tabanı malzemesinin tane büyüklüğü ve pürüzlülüğü.....	13
Çizelge 3.2. Dalga yüksekliklerine bağlı olarak dalga hızının değerleri	20
Çizelge 3.3. Zemin tipine bağlı olarak kalibre edilmiş sürtünme katsayısı	36
Çizelge 3.4. C_Y katsayısının değerleri	41
Çizelge 3.5. C_Z katsayısının değerleri	41
Çizelge 4.1. Çevresel risk için kabul kriterleri	46
Çizelge 7.1. Excel tablosu.....	69
Çizelge 7.2. Farklı boru çaplarına karşılık gelen akıntı hızı değerleri.....	71
Çizelge 7.3. Farklı dalga yüksekliklerine karşılık gelen dalga parçacık hızı değerleri	72
Çizelge 7.4. Kuvvet katsayıları girdi değerleri ve değişim katsayıları	78
Çizelge 7.5. Boru çapına bağlı girdi değerleri ve değişim katsayıları	79
Çizelge 7.6. Malzeme yoğunlukları girdi değerleri ve değişim katsayıları	80
Çizelge 7.7. Z_L limit durum fonksiyonu benzeşim istatistiği ($D= 0.5m$ için)	83
Çizelge 7.8. Batık ağırlığın benzeşim istatistiği ($D= 0.5m$ için)	86
Çizelge 7.9. Kaplama kalınlığı için senaryo analizi ($D= 0.5m$ için)	90
Çizelge 7.10. Çeliğin et kalınlığı için senaryo analizi ($D= 0.5m$ için)	92
Çizelge 7.11. Pasif zemin direncinin hesaplanmasında kullanılan K_s değerinin senaryosu ($D= 0.5m$ için)	95
Çizelge 7.12. Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetinin senaryo analizi ($D=$ $0.5m$ için).....	99
Çizelge 7.13. Sürüklenme kuvvetinin senaryo analizi ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	102
Çizelge 7.14. Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin senaryo analizi ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	105
Çizelge 7.15. Kaldırma kuvveti için senaryo analizi ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	107
Çizelge 7.16. Dört farklı boru çapı için Z_L değerleri	109

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.17. Boru düşey denge değerleri, Z_v	110
Çizelge 7.18. Boru düşey denge değerleri, Z_v	111
Çizelge 7.19. Gömülü borularda düşey denge değerleri.....	112
Çizelge 7.20. Gömülü borularda düşey denge değerleri.....	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Hidrodinamik yükler ve kuvvet eşitlikleri.....	6
Şekil 3.1. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ ($\frac{z_r}{K_b} = 250$ değeri için).....	16
Şekil 3.2. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ ($\frac{z_r}{K_b} = 500$ değeri için).....	17
Şekil 3.3. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ ($\frac{z_r}{K_b} = 1000$ değeri için).....	17
Şekil 3.4. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ ($\frac{z_r}{K_b} = 2000$ değeri için).....	18
Şekil 3.5. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ ($\frac{z_r}{K_b} = 5000$ değeri için).....	18
Şekil 3.6. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ ($\frac{z_r}{K_b} = 10.000$ değeri için).....	19
Şekil 3.7. $\frac{z_{a0}}{z_0}$ değerine karşılık gelen $\frac{A_0}{K_b}$ (değeri için)	19
Şekil 3.8. Batmanın tanımı	23
Şekil 3.9. Batmadan dolayı pik yük azaltma katsayıları	23
Şekil 3.10. Trenç parametresi tanımı	24
Şekil 3.11. Trençten dolayı pik yük katsayıları	24
Şekil 3.12. Pasif direnç	25
Şekil 3.13. Kumlu zemin için genelleştirilmiş stabilite analiz metodu	29
Şekil 3.14. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri	30
Şekil 3.15. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri.....	30
Şekil 3.16. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri.....	31
Şekil 3.17. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri.....	31
Şekil 3.18. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri.....	32
Şekil 3.20. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri.....	33
Şekil 3.21. Boyutsuz zemin yoğunluğuna karşılık gelen düzeltme katsayısı	33
Şekil 3.22. Kil için stabilite eğrisi (K=10 ve 20)	34
Şekil 3.23. Kil için satbilite eğrisi (K=30 ve 40)	34
Şekil 3.24. Killi zemin için genelleştirilmiş stabilite analiz metodu	35
Şekil 3.25. Kil için tavsiye edilen sürtünme faktörü (Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi)	37
Şekil 3.26. K ve M'nin fonksiyonu olan kalibrasyon faktörü Fw	38
Şekil 4.1. Basit risk matrisi.....	43
Şekil 4.2. Risk analiz yöntemi akış şeması.....	44
Şekil 4.3. Deniz tabanındaki belirgin hız U_s değerinin tahmin grafiği	50
Şekil 4.4. Deniz tabanındaki T_u değerinin tahmin grafiği.....	51
Şekil 4.5. Yayılmadan ve yönden dolayı azaltma katsayısı.....	51
Şekil 4.6. Tasarımın genel akış şeması.....	56
Şekil 6.1. En yaygın dağılımlar	63
Şekil 6.2. Benzeşimde kullanılabilen olasılık yoğunluk fonksiyon galerisi.....	64
Şekil 6.3. Seçilen dağılım ve temel parametreler gösterimi	64
Şekil 6.4. Varsayım penceresinin genişletilmesi	65
Şekil 7.1. BOTAŞ boru hattı ve özellikleri (BOTAŞ).....	67
Şekil 7.2. Örnek boru özellikleri.....	68
Şekil 7.3. Dalga yüksekliğinin tasarıma olan etki grafiği.....	70
Şekil 7.4. Dalga periyodu değişiklik grafiği.....	70
Şekil 7.5. Benzeşimdeki temel varsayımlar ve tahminler.....	77

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. Limit durum frekans dağılımına göre (Z_L) yıllık aşılma olasılığı (limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı) ($D= 0.5m$ için).....	81
Şekil 7.7. Z_L Limit Durum Fonksiyonunun ters ve doğru orantılı şekilde etkileyen temel değişkenler ve değişkenliğe katkı yüzdeleri ($D= 0.5m$ için)	82
Şekil 7.8. Boru batık ağırlığının istatistiksel değişimi ve benzeşim histogramı ($D= 0.5m$ için).....	85
Şekil 7.9. Boru batık ağırlığının duyarlılık grafiği ($D= 0.5m$ için)	86
Şekil 7.10. Batık ağırlığı etkileyen kaplama ağırlığı dağılımı ($D= 0.5m$ için)	88
Şekil 7.11. Kaplama kalınlığı için duyarlılık grafiği ($D= 0.5m$ için)	88
Şekil 7.12. Çelik et kalınlığı için duyarlılık grafiği ($D= 0.5m$ için)	89
Şekil 7.13. Batık ağırlığı etkileyen çeliğin et kalınlığının benzeşim dağılımı ($D= 0.5m$ için).....	90
Şekil 7.14. Pasif zemin direncinin olasılık dağılımı ($D= 0.5m$ için)	93
Şekil 7.15. Pasif zemin direncin duyarlılık grafiği ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	94
Şekil 7.16. Zemin pasif direncin hesaplanmasında kullanılan K_s değerinin olasılık dağılımı ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	96
Şekil 7.17. Zemin pasif direncin hesaplanmasında kullanılan K_s değerinin duyarlılık grafiği ($D=0.5m$ çelik boru çapı için).....	97
Şekil 7.18. Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvveti ($D= 0.5m$ için)	98
Şekil 7.19. Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetinin duyarlılık grafiği ($D= 0.5m$ için).....	98
Şekil 7.20. Sürüklenme kuvvetinin olasılık dağılımı ($D=0.5m$ çelik boru çapı için).....	101
Şekil 7.21. Sürüklenme kuvvetinin duyarlılık grafiği ($D=0.5m$ çelik boru çapı için).....	101
Şekil 7.22. Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin olasılık dağılımı ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	104
Şekil 7.23. Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin duyarlılık grafiği ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	104
Şekil 7.24. Kaldırma kuvveti için olasılık dağılımı ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	106
Şekil 7.25. Kaldırma kuvveti için duyarlılık grafiği ($D=0.5m$ çelik boru çapı için)	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\emptyset$	Dalga çeviriminde hidrodinamik kuvvetin faz açısı
A_s	Göz önüne alınan boruya dik eylemsizlik ($2\pi U_s / T_u$)
C	Sabit
C_D	Sürüklenme kuvveti sabiti ($C_D = 0.7$)
C_L	Kaldırma kuvveti sabiti ($C_L = 0.9$)
C_M	Atalet kuvveti sabiti veya eylemsizlik kuvveti sabiti ($C_M = 3.29$)
D	Borunun iç çapı
$d = Y/D$	Boyutsuz yanal yer değiştirme
d_{50}	Ortalama tane büyüklüğü
D_s	Çelik boru çapı
e	Birim şekil değiştirme (deformasyon)
E	Elastisite modülü (MPa)
e'	Genelleştirilmiş şekil değiştirme
F_D	Sürüklenme kuvveti
F_I	Eylemsizlik kuvveti (atalet kuvveti)
F_L	Kaldırma kuvveti
F_w	Belirsizlik faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
k	Dalga numarası ($\omega^2 = gk \tanh(kd)$)
K_b	Nikuradse'nin pürüzlülük parametresi
L_{cr}	Kritik ağırlık parametresi
n	Yayılma (yerine bağlı olarak değişir)
R	Azaltma katsayısı

Simgeler	Açıklamalar
$r_{pen,i}$	Batmadan dolayı yük azaltma
$r_{per,i}$	Deniz tabanının geçirimsizliğinden dolayı yük azaltma
r_s	Kumlu zemin malzemesinin yoğunluğu
$r_{trenç,i}$	Trençten dolayı yük azaltma
r_w	Deniz suyunun yoğunluğu
s	Spektral genişlik parametresi
S/L	Boyutsuz zemin dayanımının fonksiyonu
S_u	Killi zeminin direnajsız kayma dayanımı
$S_{\eta\eta} (W)$	Spektrum su yüzeyi yüksekliği (uzun tepeli)
T_1	Bir saniyedeki deniz durumunun süresi
T_p	Pik periyot
t_s	Çelik boru et kalınlığı
T_u	Yukarı kesme methodundan elde edilen periyot
U^*	Sürtünme hızı
U_c	Sınır tabakası içinde bulunan boruya normal bir şekilde etkileyen akıntı bileşeni
U_s	Dalgadan kaynaklı hız
w	Açısal frekans
w_p	Spektral pik açısal frekans
W_s	Batık ağırlık
z	Deniz tabanına olan yükseklik
z_0	Taban pürüzlülük parametresi
Z_{0a}	Görünür pürüzlülük
z_r	Deniz tabanından belli bir derinlikteki yükseklik (referans yükseklik)
α	Philips sabiti
β	Ana dalga yakınındaki alt yön
γ	Dorukluluk parametresi
κ	von Karman sabiti (0.4)
μ	Sürtünme katsayısı
Φ	Ana dalga yönü

Simgeler	Açıklamalar
-----------------	--------------------

Φ_p	Boruya dik yön
----------	----------------

Kısaltmalar	Açıklamalar
--------------------	--------------------

E	Doğu
ENE	Doğu Kuzey Doğu
ESE	Doğu Güney Doğu
FAR	(Fatal Accident Rate) ölümcül kaza oranı
MCS	Monte Carlo Simülasyonu
N	Kuzey
NE	Kuzey Doğu
NNE	Kuzey Kuzey Doğu
NNW	KuzeyKuzey Batı
NPD	(The Norwegian Petroleum Directorate) Norveç Petrol Kuruluşu
NW	Kuzey Batı
POF	Probability of failure (Başarısızlık ihtimali)
S	Güney
SE	Güney Doğu
SSE	Güney Güney Doğu
SSW	Güney Güney Batı
SW	Güney Batı
W	Batı
WNW	Batı Kuzey Batı
WSW	Batı Güney Batı

1. GİRİŞ

Su, doğal gaz, petrol ve karbondioksit gibi akışkanların büyük miktarlarda ve uzun mesafelerde iletimi ile örneğin buhar, etilen, süt, şarap, cıva gibi akışkanların küçük miktarlarda ve kısa mesafelerde iletimi boru sistemleri ile gerçekleştirilir. Bu sistemlerin tasarımında belirlenimci (deterministik) ve istatistiksel yöntemler uygulanır ve farklı ülkelerin standartları (DNV-RP-E305, DNV-RP-F109 vb.) kullanılır. Risk analizi; güvenilirliğin sağlanması, çevre kirliliği ve boru tasarım endüstrisinin finansal riskleri gibi konuların önemi artmıştır. Boruların risk açısından değerlendirilmesi yatay ve düşey yöndeki yer değiştirmelere bağlı olarak incelenir. Düşey ve yatay yöndeki yer değiştirmelerin fazla olması borulardaki basınç dayanımının aşılmasına neden olur [1]. Deniz tabanındaki topoğrafyadan dolayı boruların yerleşiminde serbest açıklık meydana gelirse boru etrafında dalga ve akıntının etkisiyle oyulmalar meydana gelir [2]. Dirsekli ve valfli borular hareketi engellediğinden sistemin serbestlik derecesi değişir, risk analizi boruların sistem değerlendirmesinde önemli hale gelir [3].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda deniz tabanındaki boruların dengesi deneysel, numerik ve istatistiksel benzeşimler ile matematiksel modeller kullanılarak irdelenmiştir [4]. Bu çalışmalar çoğunlukla zemin boru etkileşimi üzerinedir ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Boruların tasarımı için standartlarda, örneğin 1988 yılında yayımlanan DNV-RP-E305 ve 2010 yılındaki yeni sürümü DNV-RP-F109'de üç farklı risk değerlendirmesi içermektedir: Dinamik, Genelleştirilmiş ve Statik. Risk analizlerinde Birinci Derece Güvenirlilik Yöntemi (First Order Reliability Method - FORM) ve İkinci Derece Güvenirlilik Yöntemi (Second Order Reliability Method -SORM) kullanılmıştır [5] ve bu yöntemlerde limit durum fonksiyonun belirlediği denge yüzeylerinin orijinden olan uzaklığı sistemin güvenilirliğini tanımlamıştır. Monte Carlo Benzeşimi (MCB) kullanılarak yapılan çalışmalarda boru sisteminin üzerine gelen yükler altındaki dengesini ifade eden limit durum fonksiyonundaki değişkenler standart olasılık dağılımları ile benzeştirilmiştir.

Bu çalışmadaki amaç, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak deniz tabanındaki boruların hem düşeyde hem de yataydaki yer değiştirme risklerini değerlendirerek, boruların taşıdığı farklı hammaddelerin boru dengesi üzerine olan etkisini ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışmada, boru et kalınlıklarının güvenilirlik üzerine etkisi hassasiyet analizi ile irdelenmiştir. Monte Carlo Benzeşimi, FORM ve SORM yöntemlerinden farklı

olarak hassasiyet çalışmasını ortaya koymakta değişik olasılık dağılımlarının etkisini de hesaba katmaktadır. FORM ve SORM yöntemleri, orijinden tasarım noktasına olan uzaklığın etkisini Hasofer Lind (HL) Güvenirlik İndisi ile ortaya koyduğundan bu çalışmadaki gibi bir hassasiyet analizini desteklememektedir. Bu tez çalışması, Monte Carlo Benzeşiminin kullanıldığı diğer çalışmalardan farklı olarak, literatürdeki değişik yıkılma olasılıkları hesaplarının ve sonuçlarının tasarıma olan etkisini değerlendiren özgün bir çalışmadır.

Literatürdeki risk analizlerinde riskin seviyesi DNV-RP-H101 standardında düşük, orta ve yüksek risk seviyesi olmak üzere tanımlanmıştır. Belirtilen standartlarda daha çok zemin ve boru etkileşimi üzerinde durulurken, bu tez çalışmasında dalga ve akıntı etkisi birlikte irdelenmiştir. Bu tez çalışmasının özgün yönü, dalga parametrelerine bağlı olarak risk seviyelerinin irdelenmesi ve yıllık yıkılma olasılığının Türkiye’den bir saha uygulaması ile desteklenmesidir. Limit durum fonksiyonlarının MCB ile bulunan negatif olasılıkları denge durum yüzeyinin altında kalan bölgeyi tanımladığından yıllık yıkılma olasılığını vermektedir. Bu tez çalışması sonucundaki önerim, boru sistemlerinin bütünü düşünülüğünde, MCB sonucunda bulunan olasılığın tanım olarak borunun münferit olarak yer değiştirmesini, başka bir deyişle deplasman limitinin aşılma olasılığını ifade etmesidir. Dolayısı ile limit durum fonksiyonları toptan göçme olarak değil, servis seviyesinin aşılmasını (serviceability limit state) benzeştirmektedir. Tezimde ortaya koyduğum tüm olasılık değerleri bu bağlamda tartışılmalıdır. Bundan sonraki çalışmalarda farklı göçme senaryolarına bağlı olarak bu tanım değiştirilebilir ve Türkiye’deki tasarımlar için farklı olasılık (risk) seviyeleri yapının önemine göre DNV standartlarında olduğu gibi Seviye I,II ve III olarak önerilebilir. Özellikle BOTAS gibi kuruluşlar açısından risk değerlendirme çalışmaları önem taşıyacağından bu alanda tez çalışmam yeni bir bakış açısı getirecektir.

Sonuç olarak bu çalışmada; literatürdeki çalışmalardan farklı olarak dalga ve akıntının birleşik etkisi altında deniz tabanındaki boru sistemlerinin uluslararası standartlardaki kısıtlamalar altındaki davranışları irdelenmiştir. Tez çalışmamada, MCB sonucunda bulunan olasılık borunun deplasman limit durum aşma olasılığını ifade etmekte ve limit durum histogramı servis seviyesinin aşılmasını benzeştirmektedir. Türkiye’deki tasarımlar için farklı olasılık (risk) seviyeleri yapının önemine göre Seviye I,II ve III olarak önerilebilir ve Türkiye standardı oluşturulabilir. Ayrıca, bu tez çalışmasında, deniz tabanındaki boruların hem düşeydeki hem de yataydaki yer değiştirme risk seviyelerinin

değerlendirilmesi, tezde geliştirilen Excel programlama komutları, ORACLE Crystall Ball yazılımı ile karşılaştırılmış, böylece Monte Carlo Benzeşim uygulamaları her iki program ile kontrol edilmiştir

Bu çalışmada limit durum fonksiyonlarının farklı formları da değerlendirilmiş ve boru tasarımında kullanılacak limit durum fonksiyonlarının farklı matematiksel ifadelerinin sonucu değiştirdiği görülmüştür. Limit durum fonksiyonları, fonksiyonun ifade ediliş şekline (bölüm veya fark) bağlı olarak %10-15 mertebesinde farklı sonuçlar vermiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Deterministik Tasarım

DNV-RP-F109 yönetmeliği yaygın olarak kullanılan üç farklı deterministik tasarım yöntemi önermektedir.

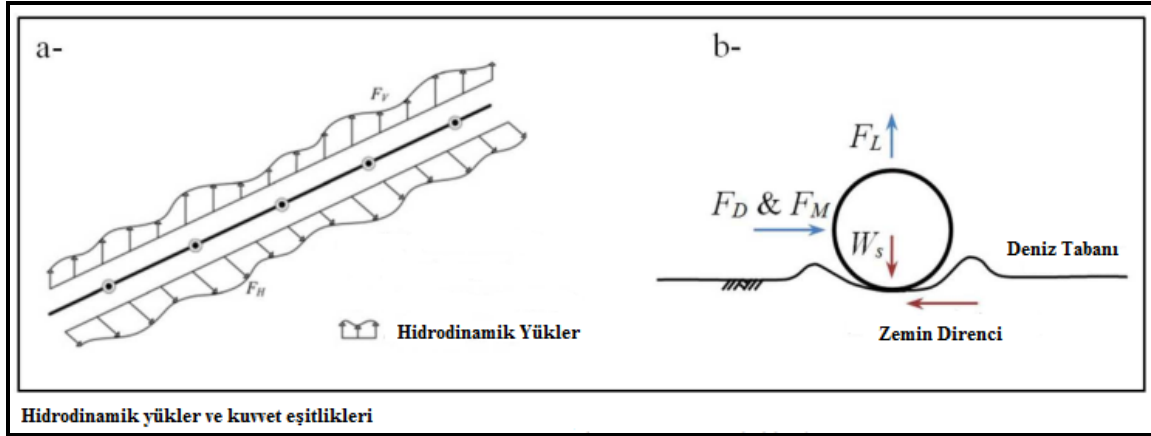
1. Genelleştirilmiş Analiz
2. Basitleştirilmiş Analiz
3. Dinamik Analiz

İlk yöntem 2 boyutlu kuvvetlerin eşitliğine dayanırken ikinci yöntem bu yöntemin basitleştirilmiş sonuçlarını kullanır. Üçüncü yöntemde ise hidrodinamik kuvvetler altında sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Boru hattı deniz tabanına oturduğunda, hidrodinamik katsayılar genellikle $C_D = 0.7$, $C_L = 0.9$ ve $C_I = 3.29$ alınır. Ancak, salınımlı akışta, hidrodinamik katsayılar hem Keulegan-Carpenter sayısına, hem de Reynolds sayısına ve borunun konumuna bağlıdır. Boruya etkileyen aynı eksenli sürtünme ve atalet katsayıları kaplama kalınlığının varlığıyla artmaktadır. Bu artış $e / D_o < 0.5$ aralığındadır. Verilen bir Reynolds sayısı için, sürüklenme katsayısı nispeten yüksektir (deniz tabanına yakın). Serbest akış durumunda bu katsayı ($e / D_o > 1$) değişir [6].

Literatürdeki çalışmalarda Corus-3D kullanılarak borunun etkisi ile zamana bağlı olarak deniz tabanında meydana gelen değişimin benzeşimi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ABAQUS programıyla da hidrodinamik kuvvetler - boru zemin etkileşimi modellenmiştir.

Borunun uzunluğuna bağlı olarak su derinliğinin değişimi ve hidrodinamik kuvvetlerin etkisi boru tasarımının modellenmesini karmaşıktırır. Sınır tabakasından dolayı küçük çaplı boruların (10 cm'den küçük) tasarımı dalga ve akıntı hızlarının gerçekçi tahmini için yüksek mertebeden teoriler gerektirmekte, kaldırma kuvvetinin hesabına da etkilenmektedir. Bu tez çalışmasında endüstriyel boyutlu boruların tasarımına yönelik olup güvenilirliğe dayalı bir Excel programlama dilini içermektedir.



Şekil 2.1. Hidrodinamik yükler ve kuvvet eşitlikleri

2.2. Risk Değerlendirmesi

Tabandaki boru sistemlerinin yükler altındaki kuvvetler dengesi limit durum fonksiyonu kullanılarak tanımlanır. Zemin-boru etkileşimi ve çevresel yükler rastsal belirsizliklere sahiptir ve bu rastsal değişkenler olasılık dağılımı ile modellenir. Monte Carlo Simülasyonunda limit durum fonksiyonu, rastsal değişkenlerin değişim aralığında çok sayıda benzeşim ile tekrarlanır ve prototip koşullarında sanki yapı inşa edilmiş gibi gerçeğe yakın bir sayısal risk değerlendirilmesi yapılır [7]. Daha önceki çalışmalarda boruların korozyona uğraması ve borunun ekonomik ömrü limit durum fonksiyonunda et kalınlığının değişimi olarak MCS ile hesaba katılmıştır [8]. Bu kapsamdaki çalışmalarda risk MCS ile başarılı şekilde değerlendirilebilmiştir [9]. Monte Carlo Benzeşimi ile farklı yöntemler (Surrogate Modeli gibi) birleştirilmiş ve benzeşimin üstünlüğü ortaya konmuştur.

Surrogate modelini kullanarak güvenilirliğe dayalı boru hattının dinamik stabilite analizi (Dynamic stability analysis of pipeline based on reliability using Surrogate model) adlı çalışmada değişkenlerin güvenilirlik endeksi üzerindeki etkileri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Rassal değişkenlere ait duyarlılık analizi, belirgin dalga yüksekliği H_s , sürtünme katsayısı μ , pik dalga periyodu T_p ve su derinliği h 'nin kararsızlık durumları olasılığı etkilediğini görülmüştür.
- 2) Belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu, güvenilirlik değerlendirmesi üzerinde benzer etkilere sahip olduğu görülmüştür. Stabilite güvenilirliği endeksi, pik peryot ve belirgin dalga yüksekliği değerleri büyüdükçe azaldığı, ancak güvenilirlik endeksi su

derinliği ve sürtünme katsayısı arttıkça arttığı görülmüştür.

- 3) Boru hatlarının stabilite analizinde belirsizlikler bulunur ve bu nedenle belirsizlikler dikkate alınmalıdır.

Bu nedenle bir boru hattı üzerinde etkili olan hidrodinamik kuvvetleri hesaplamak için Fourier modeli kullanılmış ve modelde deneyler yapılmıştır. Değerlendirmesini yapmak için Monte Carlo simülasyonu ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca, çeşitli rasgele değişkenlerin boru hattı üzerindeki etkileri bir duyarlılık analizi ile tartışılmıştır. Bu çalışmada Morison eşitlikleri ile Sorenson ve arkadaşları tarafından laboratuvar testlerine dayalı olarak geliştirilen Fourier modeli karşılaştırılmış, Fourier modelinin düzensiz dalga koşullarında daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir [10].

2.3. Borular Arasındaki Oluşan Serbest Açıklığın Güvenirliği

Borular arasındaki oluşan serbest açıklığın güvenirliliği limit seviye riskine göre analiz edilmiştir. Risk Birinci Derece Güvenirlilik Yöntemi (FORM) ve Monte Carlo Simülasyonu kullanılarak hesaplanmış, benzeşim yönteminin tasarımda uygulanabilirliği bu çalışmalarda ortaya konmuştur. Örnek çalışmada, borular arasındaki altı adet serbest açıklığın boruların çaplarına oranı ve altı adet kil zemin türü ile üç adet kum zemin türünün açıklığa etkisi irdelenmiştir. Benzeşimlerde her bir parametrenin olasılığa etkisi hassasiyet analiz şeklinde ortaya konmuştur [11].

2.4. Deniz Tabanındaki Boruların Anroşman Koruması

Deniz tabanında bulunan boruların riskini azaltmak için trenç yapılması riski azalttığı gibi ayrıca trenç yapıldıktan sonra ince malzemeli taneciklerin kullanılarak en üstte de taşlarla döşenmesi dışardaki su darbeleri, dalga darbeleri, gemi kökenli bazı durumlardan korumasını sağlar [12]. Xinhong Li, Guoming Chen, Hongwei Zhu (2017) son yıllarda gerçekleşen borulardan petrol sızması konusu hakkında çeşitli araştırmalar yapmışlardır. Petrol sızmasının doğaya, canlılara ve mallara verdiği zararı düşünerek bu eylemin önüne geçilmesi istenmiştir. Bunun için petrolün deniz içinde ve deniz dibinden deniz yüzeyine hareketi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunun için bazı modeller tasarlanmıştır ancak katsayı seçiminde yüksek derecede belirsizlik söz konusu olmuştur.

Li tarafından CFD adlı bir simülör bulunmuştur [13]. Dalgalı ve normal hareket altında petrol sızmasının incelenmesi için kullanılan program hız dağılımı konusunda pratikte bazı sıkıntılarla karşılaşmıştır. Bunun üzerine Zhu 2014 yılında program üzerinde bazı geliştirmeler yapmıştır [14].

2.5. Kumlu Denizaltında Dalgaya Maruz Kalmış Boru Hattının Stabilitesi İçin Gelişmiş Analiz Metodu

Fuping Gao ve diğerleri (2006) makalelerinde denizaltı boru hattının stabilitesi hakkında çalışmalarından bahsetmişlerdir. Det Norske Veritas adlı kuruluşun önerilen uygulamaları genel olarak Wagner'in (1987) boru-zemin etkileşim modeline ve Lambrakos'un (1987) modeline bağlıdır. Bu metodların dışında, bu makalede gelişmiş analiz metodu isimli yeni bir metod önerilmiştir [2].

Bu metodun temellerini de hidrodinamik yükleme deneylerinden elde edilen kısıtlamalar ile beraber iki adet formüle bağlamışlardır. Makalede metodun prosedürlerini gösteren detaylı bir akım grafiği de gösterilmiştir. Bu makalede DNV Uygulamaları ve kendi buldukları yeni yöntem arasında bir kıyasın yapıldığı bir bölüm de mevcuttur. Bu metod boru stabilitesi tasarımı için kullanışlı bir araç olabilir.

2.6. Deniz Altındaki Gömülmemiş Boruların Burulmasının Statik ve Dinamik Analizi

Zhe Wang ve diğerleri (2015) deniz altındaki borularda burulma ile ilgili bazı çalışmalar yapmışlardır. Burulma, boruların güvenli bir şekilde çalışmasını tehdit eden en önemli sorunlardan biridir. Burulma, sıcaklığın ve iç basıncın artması sonucu oluşabilir. Kritik burulma sıcaklığını tahmin etmek için hem iki boyutlu hem üç boyutlu statik ve dinamik olmak üzere 4 çeşit numerik modellerin kurulduğu ABAQUS adlı program kullanılır.

Wang ve diğerleri statik ve dinamik olmak üzere iki adet prosedürü sözü geçen modellere uygulamışlardır. Sonuçlar elde olan bilgilerle iyi bir eşleşme göstermiştir. [15].

2.7. Deniz Altındaki Aşınmış Borulara Cisim Düşme Riskinin Değerlendirilmesi

Md. Rokan Uddin Kawsar ve diğerleri (2015) makalelerinde deniz altındaki borulara cisim düşme tehlikesinden bahsetmişlerdir. Açık denizlerden kıyıya hidrokarbon taşınmasının

hızla artışı deniz altındaki boru hatlarının enerji talebinin genişlemesine yol açmıştır. Açık denizlerde bazı beklenmedik kazalar olabilir. Boruların çalışması ve kurulması sırasında borulara gelen enine yüklemeler ve dış yükler; kırıklara ve kısmi göçüklere neden olabilir. Bu tarz hasarlar petrol sızmalarına ve kaçaklara neden olabilir. Bu sızma ve kaçarlarda yangın ve patlamalara yol açabilir.

Güvenlik önlemleri dikkate alındığında hayata, çevreye ve mallara gelen zararlar çeşitli derecelerde hafifletilebilir. Bu çalışma çeşitli durumlar altında deniz altındaki boruların güvenliğini onaylamak için olasılıksal ve sayısal modelleme analizi önerir. Bu analiz istenmeyen olayları önlemek için kullanılabilir. Borular üzerindeki enine yüklemenin darbe analizi örnek bir senaryo kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Emniyetli ölçülerin belirlenmesi ve zararların azaltılması için sonlu element analizi kullanılmıştır [16].

2.8. İstatiksel Analiz Tekniklerinin Dipteki Boru Hattının Stabilitate Analizine Uygulanması

Bassem S. ve diğerleri 2013 yılında çıkardıkları makalelerinde boru hattı stabilitesi hakkında yaptıkları çalışmaları yayınlamışlardır. Bassem S. ve diğerleri açık denizlerde kullanılan boruları kendilerine konu almıştır. Son zamanlarda açık denizlerdeki boruların kullanımı yükselişe geçmiştir. Bunun nedeni de hidrokarbon taşınmasıdır. Boruların direkt olarak deniz yatağının üzerine konulması, dalgalardan gelen hidrodinamik yüklerin dikkate alınması için önemli bir konudur. Ayrıca stabiliteye uygun olarak dizayn edilmelidir.

Bassem S. ve diğerleri 2013 yılında yapmış oldukları çalışmalarında hidrodinamik yüklemeler, zeminin tepkisi, boru yapısındaki belirsizlikler ve lineer olmaması hakkında bazı yaklaşımların başarılmasına vurgu yapılmıştır. Parametrelerdeki değişkenlik de söz konusuysa, bir fırtına sırasındaki boruların maksimum yatay yer değiştirmesi için yüzey tepki modeli geliştirilerek istatistiksel bir yaklaşım takip edilmiştir. Bunun için ise Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. Bu yaklaşımın faydaları da belirtilmiştir [17].

Çalışma boru yapısının lineer olmayan (non-liner) davranışını incelediğinden boru tasarlamadan önce bu konuyla ilgilenen mühendisler rehberlik edebilir.

2.9. FORM, SORM ve Monte Carlo Simülasyonu'nun FAD ile Birlikte Kullanılarak Boruların Güvenilirliklerinin Belirlenmesi

Ouk Sub Lee ve diğerleri (2006) makalelerinde limit durumu fonksiyonunun dayanım parametleri ve yüklemdeki belirsizlikleri olasılık metodu kullanılarak belirlemeye çalışmışlardır. FORM ve SORM metodları, FAD isimli diyagramı da kullanarak borulardaki hata olasılıklarının bulunmasına yarar. Monte Carlo Simülasyonu ise FORM VE SORM metodlarından çıkan sonuçların onaylanması işine yarar. Bu yöntemler çalışma koşullarına ve tasarım parametlerine göre bir çok tasarımcı tarafından kullanılabilir [18].

2.10. Deniz Altındaki Serbest Uzanan Boruların Güvenlik Değerlendirmesi

Mohammad Mahdi Shabania ve diğerleri (2017) makalelerinde serbest uzanan boruların güvenliği hakkındaki çalışmalarından bahsetmiştir. Serbest uzanan boruların güvenilirliği POF teorisi kullanılarak tahmin edilmiştir ve hedeflenen güvenilir seviye ile analiz yapılmıştır. POF, FORM ve MCS kullanılarak hesaplanmıştır. POF'daki değişimler üç farklı kum sınıfına, altı farklı kil tipine ve altı farklı yayılma uzunluğu / boru çapı oranına göre hesaplanmıştır. Son olarak her parametrenin POF'a katkısını ölçmek için hassaslık analizi yapılmıştır. Bunlar çıkan sonuç ise FORM analizinin büyük oranlarda kullanılabileceğidir [19].

3. DETERMİNİSTİK TASARIM

Bu bölümde boru stabilizesini etkileyecek hızların bulunması üzerinde durulmuştur. Bu yöntemde yalnızca akıntı ve yalnızca dalga hızı olabileceği gibi ikisi de beraber de düşünülerek hesaplar yapılabilir.

Deniz tabanı veya zemin olarak bildiğimiz tabandaki malzemenin pürüzlülüğü, dalga/akıntı etkileşimi, gibi konular da hesaba katılmıştır [20].

Ayrıca boru üzerine etkiyecek hızın:

- Gel-git akıntısı,
- Rüzgârdan kaynaklanan akıntı,
- Dalga kabarmasından kaynaklı akıntı,
- Yoğunluk kaynaklı akıntı olabilir.

3.1. Tasarım Parametreleri

3.1.1. Hız profili

Kararlı akım logaritmik hız profili şeklinde tanımlanabilir.

$$U(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln \left[\frac{z + z_0}{z_0} \right] \quad (3.1)$$

Burada;

U^* : sürtünme hızı

κ : von Karman sabiti (0.4)

z : deniz tabanına olan yükseklik

z_0 : taban pürüzlülük parametresi

Yarıçapı D olan bir boru üzerine etkiyen ortalama hızı Eşitlik 3.2.'de verilmiştir.

$$U_D = \frac{1}{D} \int_0^D U(z) dz \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'deki ortalama hız ile bilinen ya da belirlenmiş referans noktadaki bir hızın oranı Eşitlik (3.3)'te verilmiştir.

$$\frac{U_D}{U_r} = \frac{1}{\ln(z_r / z_0 + 1)} \frac{1}{D} \int_0^D \ln \left[\frac{z + z_0}{z_0} \right] dz \quad (3.3)$$

veya Eşitlik (3.4)'teki gibi de tanımlanabilir.

$$\frac{U_D}{U_r} = \frac{1}{\ln(z_r / z_0 + 1)} \{ [1 + z_0 / D] \ln [D / z_0 + 1] - 1 \} \quad (3.4)$$

Eğer yeterli derecede bilgi mevcut değilse referans yüksekliği z_r 3m olarak alınabilir.

U_D : boruya etkiyen ortalama hız

U_r : referans noktadaki hız

z_r : deniz tabanından belli bir derinlikteki yükseklik (referans yükseklik)

D: borunun çapı

z_0 : tabandaki malzemenin tipine bağlı olarak değişen pürüzlülük parametresi

z_0 taban pürüzlülük parametresi değeri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deniz tabanı malzemesinin tane büyüklüğü ve pürüzlülüğü

Deniz Tabanı Malzemesi	Tane büyüklüğü d_{50} (mm)	Pürüzlülük z_0 (m)
Silt	0,0625	5.21 E-6
Çok ince kum	0.125	1.04 E-5
İnce kum	0.25	2.08 E-5
Orta kum	0.5	4.17 E-5
İri kum	1	8.33 E-5
Çok iri kum	2	1.67 E-4
İnce çakıl	4	3.33 E-4
Çakıl	10	8.33 E-4
	25	2.08 E-3
	50	4.17 E-3
İri çakıl	100	8.33 E-3
	250	2.08 E-3
Kaya bloğu	500	4.17 E-2

Bazı kaynaklarda açı önemli bir parametre olduğu için ve bu çalışmada kıyaslama yapılacağı için ayrıca Eşitlik (3.5) verilen denklem üzerinde de durulacaktır.

$$V(z) = V(z_r) \frac{\ln(z + z_0) - \ln z_0}{\ln(z_r + z_0) - \ln z_0} \sin \theta_c \quad (3.5)$$

Bu denklem düzenlenirse Eşitlik (3.6)'daki gibi olur.

$$V(z) = V(z_r) \left(\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D} \right) \ln \left(\frac{D}{z_0} + 1 \right) - 1}{\ln \left(\frac{z_r}{z_0} + 1 \right)} \right) \sin \theta_c \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6) 'da Eşitlik (3.4)'ten farklı olarak θ_c açısı denklemde yer almaktadır. Bu açı boru eksenine ile akıntı hızı arasındaki açıdır.

3.1.2. Akıntı

Bu bölümde boru üzerine yalnızca akıntının etki ettiği varsayılarak sınır tabakası hız tahmini yapılarak bulunur [21].

Ortalama tane büyüklüğü d_{50} Nikuradse'nin pürüzlülük parametresi (K_b) ile doğrudan ilişkili olduğundan ve taban pürüzlülüğünün tane büyüklüğü açısından Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.8)'de verilmiştir.

$$K_b = 2.5d_{50} \quad (3.7)$$

$$z_0 = \frac{K_b}{30} \quad (3.8)$$

Aşağıdaki yöntem takip edilerek sınır tabakası kullanılarak boruya etki eden akıntının hızı bulunabilir.

- Çizelge 3.1.'den tabanın ortalama tane büyüklüğü d_{50} tahmini yapılır.
- K_b , z_0 , D/z_0 , ve z_r/z_0 hesaplanır.
- Hız azaltma faktörü U_D/U_r açılı göz önüne alınmayacaksa Eşitlik (3.4)'ten, açılı göz önüne alınacaksa da Eşitlik (3.5) veya Eşitlik (3.6)'den hesaplanır.

3.1.3. Akıntı ve dalga birleşik etkisi

Dalga ve akıntı etkileşiminin lineer olmayan (non-linear) etkisinden dolayı yeni kararlı bir durum oluşturmak için modifikasyon yapılması gerekir. Bu modifikasyonda taban pürüzlülüğünün artırılması gerekir [22].

Bir önceki bölümde pürüzlülüğü z_0 olarak aldığımız için bu kısımda pürüzlülük z_{0a} alınarak işlemler yapılması gerekir. Görünür pürüzlülük olarak aldığımız bu yeni değer (z_{0a}) olarak alınır ve Eşitlik (3.9)'da verilen dalga kökenli hız ile akıntı hızının oranına bağlı olarak değişir.

$$\frac{U_s}{U_r} \quad (3.9)$$

U_s : deniz tabanından r kadar yükseklikteki (referans yükseklikteki) dalgadan gelen hız

Ayrıca pürüzlülük göreceli pürüzlülük parametresine Eşitlik (3.10)'a bağlıdır.

$$\frac{A_0}{K_b} \quad (3.10)$$

A_0 : İlgilenilen noktadaki ivme (bu ivme) Eşitlik (3.11)'de verilmiştir.

$$A_0 = \left(\frac{U_s T_p}{2\pi} \right) \quad (3.11)$$

Sınır tabakasından elde edilen azaltma katsayısı faktörü benzer kararlı akım durumu varsayımlarına dayanır. Ayrıca deniz tabanı malzemesinin ripple şeklinde oluşmadığı, kararlı akıntı ve dalga akıntısının aynı yönde olmasına dayanır. Bu iki varsayım konservatif varsayımlardır. Akıntı ve dalganın birleşik etkisinde yer alan pürüzlülük (z_{0a}) Şekil 3.1.'ten Şekil 3.7.'ye kadar yer alan şekillerden elde edilir ve sınır tabakası azaltma faktörü, eğer açının önemi varsa Eşitlik (3.6)'dan açının önemi yoksa Eşitlik (3.4)'ten elde edilir ve ayrıca z_{0a} değeri Eşitlik (3.6) veya Eşitlik (3.4)'de yer alan z_0 değeri yerine yazılarak azaltılmış hız bulunmuş olunur.

Bu yöntemin uygulanabilmesi için ayrıca aşağıda yer alan Eşitlik (3.12), Eşitlik (3.13), Eşitlik (3.14) eşitliklerinin sağlanması gerekir.

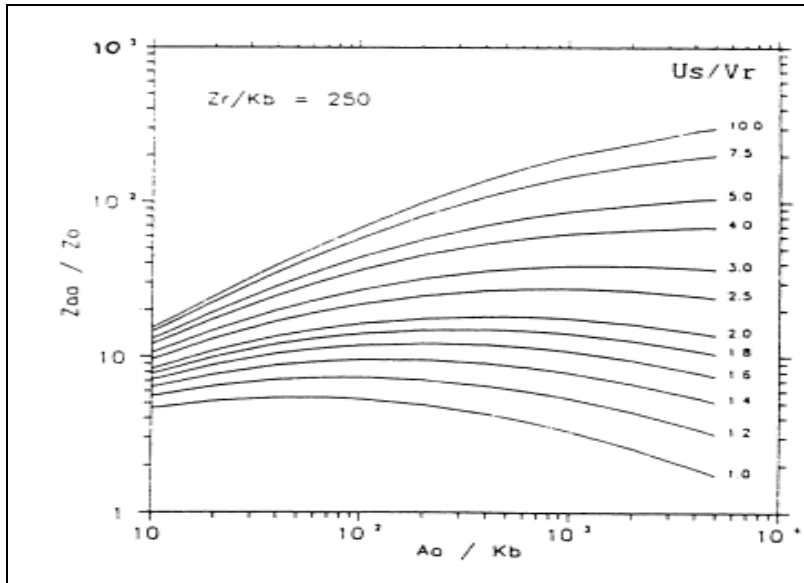
$$z_r > 0.2A_0 \left[\frac{A_0}{K_b} \right]^{-0.25} \quad (3.12)$$

$$\frac{A_0}{K_b} \geq 30 \quad (3.13)$$

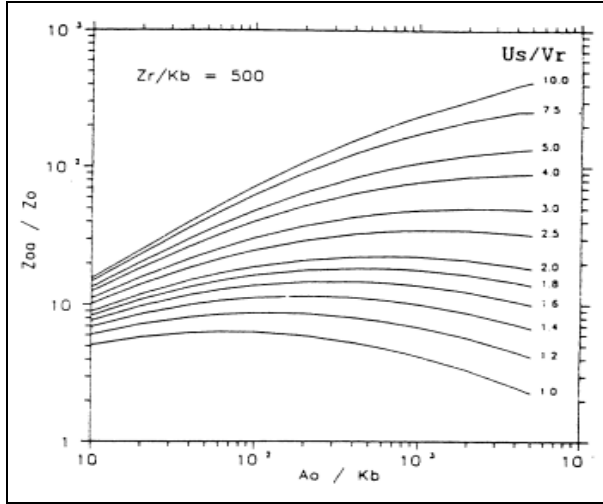
$$\frac{U_s}{U_r} \geq 1 \quad (3.14)$$

Aşağıda verilen maddelerin sırasıyla yapılması; sınır tabakasının azaltma faktörü, akıntı ve dalga birleşik etkisinden elde edilir.

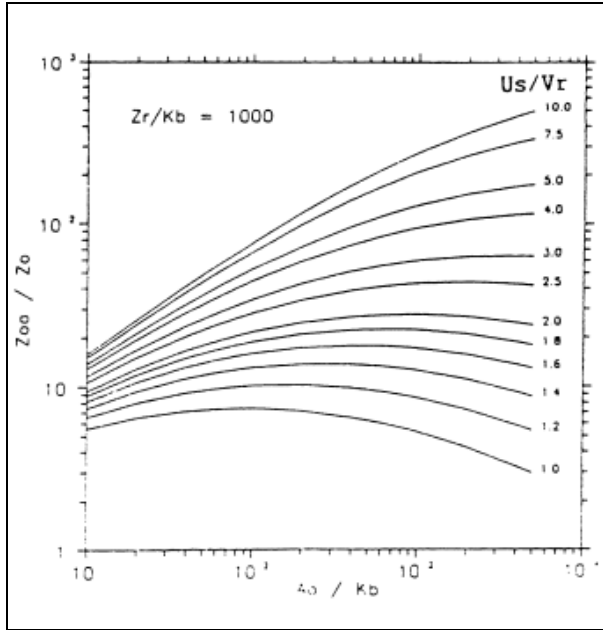
- Zeminin özelliklerine bakılarak tane büyüklüğü (d_{50}) Çizelge 3.1.'den bulunur.
- K_b , z_0 , z_r / K_b , ve K_b / A_0 hesaplanır.
- Eşitlik (3.12), Eşitlik (3.13), Eşitlik (3.14)'de yer alan aralıklara uyup uyulmadığı kontrol edilir.
- Kullanılması gereken grafiklerden yola çıkılarak (Şekil 3.1.'den başlayarak Şekil 3.7.'ye kadar yer alan grafiklerden) z_{0a} / z_0 uygun değeri seçilir. Belki bu uygun değeri bulmak için grafiklerde yer alan çeşitli z_r / K_b değerleri için interpolasyon yapılması gerekebilir.
- Hızın azaltılmış değeri U_D / U_r , açılı önemli bir parametre olarak göz önüne alınacaksa Eşitlik (3.6)'dan değilse Eşitlik (3.4)'ten elde edilir ve ayrıca z_{0a} değeri Eşitlik (3.6) veya Eşitlik (3.4)'de yer alan z_0 değeri yerine yazılarak azaltılmış hız bulunmuş olunur.



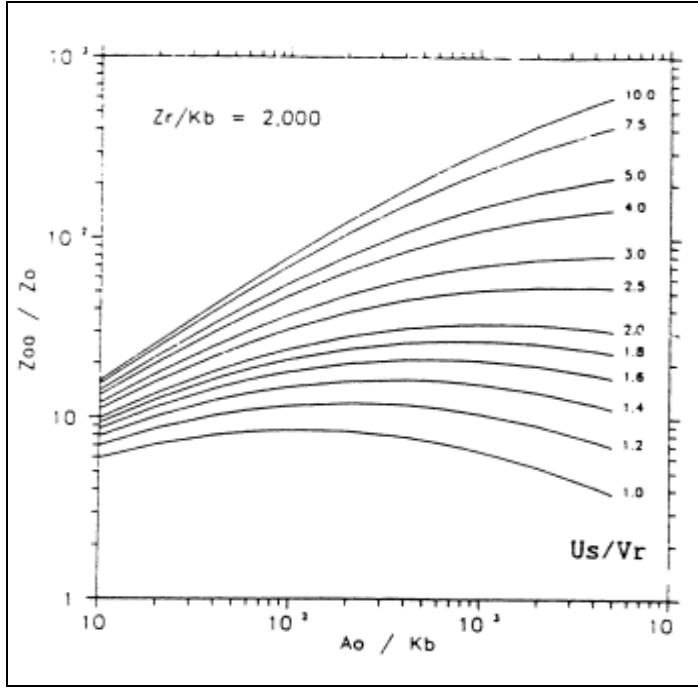
Şekil 3.1. z_{0a} / z_0 değerine karşılık gelen A_0 / K_b ($z_r / K_b = 250$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 35)



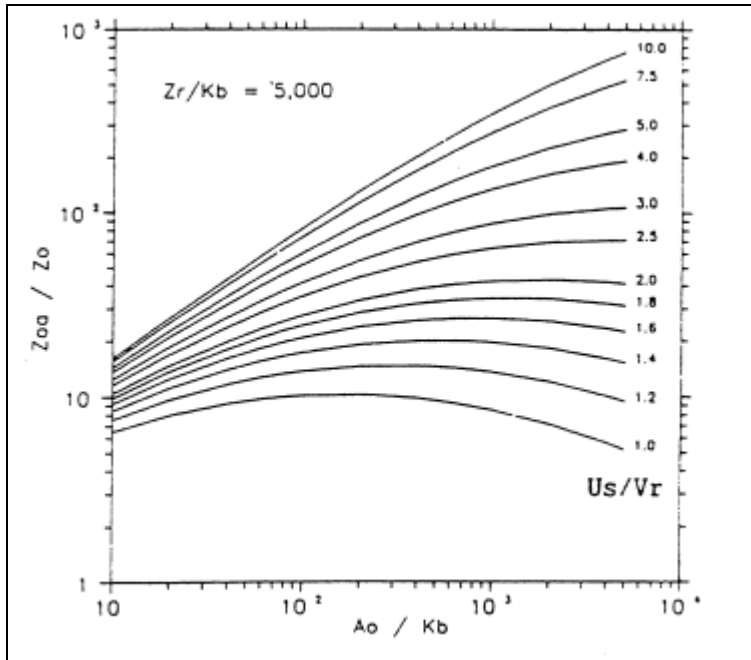
Şekil 3.2. z_{a0}/z_0 değerine karşılık gelen A_0/K_b ($z_r/K_b = 500$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 35)



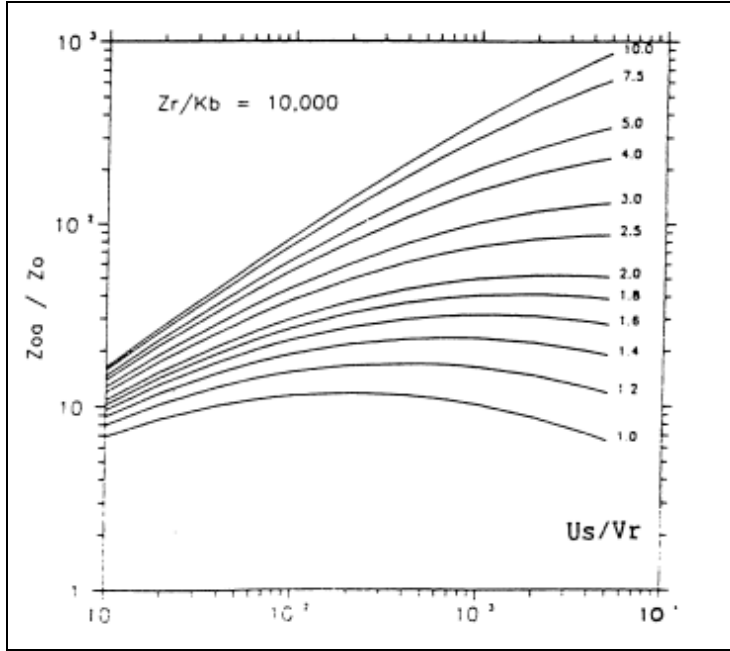
Şekil 3.3. z_{a0}/z_0 değerine karşılık gelen A_0/K_b ($z_r/K_b = 1.000$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 35)



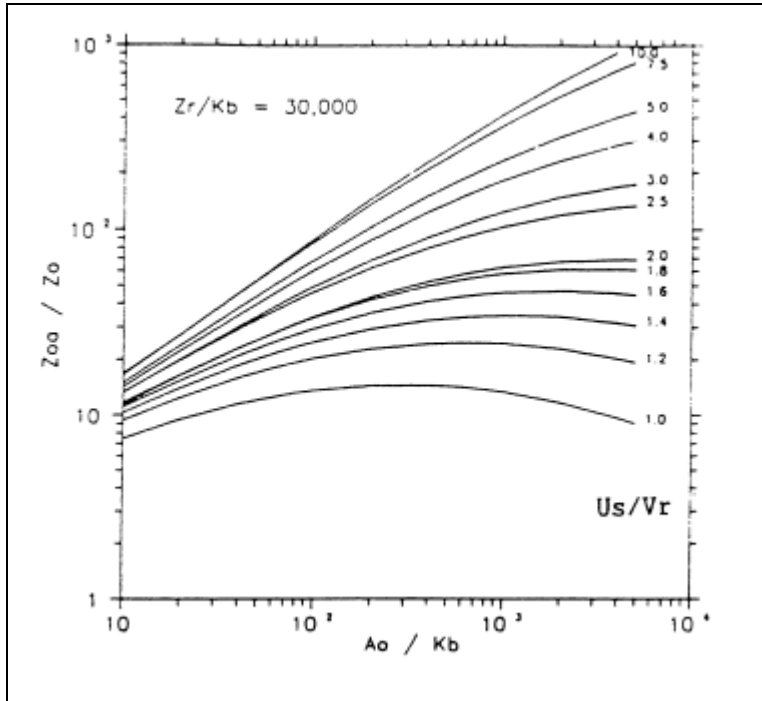
Şekil 3.4. z_{a0}/z_0 değerine karşılık gelen A_0/K_b ($z_r/K_b = 2.000$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 35)



Şekil 3.5. z_{a0}/z_0 değerine karşılık gelen A_0/K_b ($z_r/K_b = 5.000$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 36)



Şekil 3.6. z_{a0}/z_0 değerine karşılık gelen A_0/K_b ($z_r/K_b = 10,000$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 36)



Şekil 3.7. z_{a0}/z_0 değerine karşılık gelen A_0/K_b ($z_r/K_b = 500$ değeri için) (DNV, R. E305, 1988: 36)

3.1.4. Dalga parçacık hızının hesaplanması

Dalga yüksekliği H, dalga periyodu T, su derinliği d olan denizel ortamdaki dalgadan gelen hızın hesaplanması aşağıdaki verilen Eşitlik (3.15)'ten bulunabilir. Burada önemli olan uygun dalga teorisinin seçilmesidir. Bu çalışmada Le Mehaute (1976) tarafından önerilen ikinci dereceden Stokes kanunu kullanılacaktır.

$$U_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \quad (3.15)$$

Burada k= dalga numarası ($k = \frac{2\pi}{L}$)

L= dalga uzunluğu

d= su derinliği

Trençsiz bir boru için U_m değerinin hesaplanmasında borunun tam ortası seçilir. Örneğin; $z = -d+0.5D$ gibi.

Örneğin dalga peryodunun 9s, su derinliğinin 50m, dalga uzunluğunun 125m ve dalga yüksekliklerinin 1.7 ile 3.8 m arasındaki değişiminin dalga parçacığının maksimum hızı değerleri aşağıdaki Çizelge 3.2'de verildiği gibidir.

Çizelge 3.2. Dalga yüksekliklerine bağlı olarak dalga hızının değerleri

H (m)	1.7	2.1	2.4	2.8	3.1	3.4	3.8
U_m (m/s)	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55

Dalga parçacık hızının belirlenmesinin ardından Kuelegan Carpenter sayısı hesaplanır. Keulegan Carpenter sayısı boyutsuz bir sayı olup dalga etkisi altındaki borunun hidrodinamik kuvvetlerle (atalet, sürüklenme kuvvetleri) ilişkilidir.

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (3.16)$$

Örneğin KC değerinin küçük değerlerinde ataletin baskın, büyük değerlerde ise (türbülans) sürüklenme kuvveti baskındır. Örnek verilecek olursa; KC=1 değerinde sürüklenme kuvveti atalet kuvvetinin sadece %5'i kadardır. KC=10 değerinde sürüklenme kuvveti yaklaşık olarak atalet kuvvetinin %50'si kadar ve KC=20 değerinde ise sürüklenme kuvveti neredeyse atalet kuvvetine eşittir. KC=20 değerinden büyük değerlerde ise sürüklenme kuvveti hakimdir.

3.1.5. Hidrodinamik yükler

Literatür çalışmasında, hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanmasında Morison denklemindeki sabit katsayıların kullanılması ile bulunan yanal yer değiştirme değerlerinin saha çalışmalarını yansıtmada yetersiz kaldığını göstermiştir [23].

- Kaldırma kuvveti akıntının kayıtları (akıntı hızı ve akıntı yönü gibi) ile ilişkili olup tasarımda önemli bir yere sahiptir.
- Akıntı hızının düzensiz dalga hızının ile toplanıp kaldırma kuvveti hesaplanmasında kullanılır. Düzensiz dalga hızının varlığı Morison eşitliğinde zayıf yük tahmin değerleri verir. Özellikle yarım periyottayken kaldırma kuvveti üzerine etkiyen bu iki hızın birbiriyle ters olmasıdır.
- Kuvvet katsayıları akıntı dalga oranına bağlıdır.
- Kuelegan Carpenter sayısı hangi kuvvetin (atalet ve sürüklenme) daha baskın olduğunu ifade etmek için kullanılır.

Boru zemin etkileşiminden dolayı yük azaltma:

Aşağıdaki verilen nedenlerden dolayı hidrodinamik kuvvetler azaltılabilir [24].

- Geçirimli zemin (permeable seabed) $r_{per,i}$
- Borunun deniz tabanına batması, $r_{pen,i}$
- Trençleme, $r_{trench,i}$

Toplam azaltma katsayısı;

$$r_{tot,i} = r_{per,i} r_{pen,i} r_{tr,i} \quad (3.17)$$

$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4 \frac{z_p}{D} \quad (3.18)$$

Alt indis “i” y yönüne (yatay) ve z yönüne (düşey) bağlıdır. Y yönü için hesaplanan değerler Z için de ayrı olarak hesaplanır.

Deniz tabanının geçirimsizliğinden dolayı yük azaltma:

Eğer deniz tabanı geçirimsiz bir yüzey ise borunun altından akış meydana gelir ve dolayısıyla boruya düşey yük olarak etki ettiğinden borunun stabilitesini bozabilir. Deniz tabanındaki zemin kum ise 0.7 kil ise Şekil 3.23’den alınabilir.

Batmadan dolayı yük azaltma:

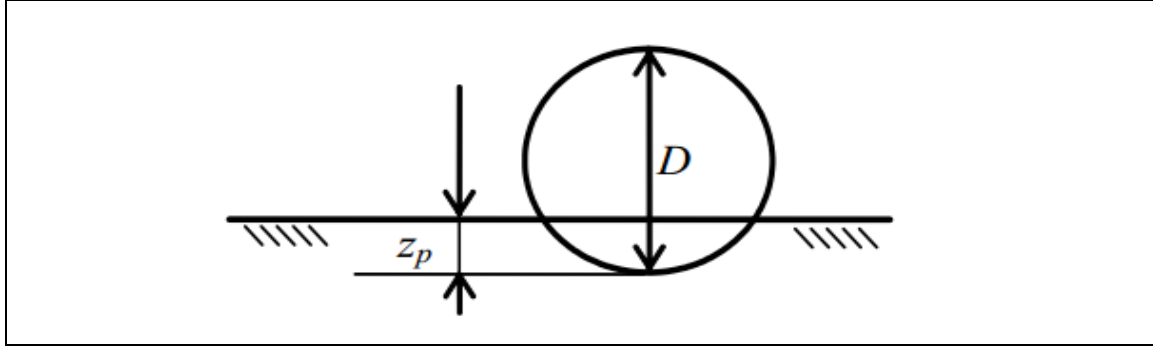
Aşağıda verilen eşitliklerden y (yatay) ve z (düşey) yönündeki deniz tabanına batma katsayısı hesaplanır [25].

$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4 \frac{z_p}{D} \quad (3.19)$$

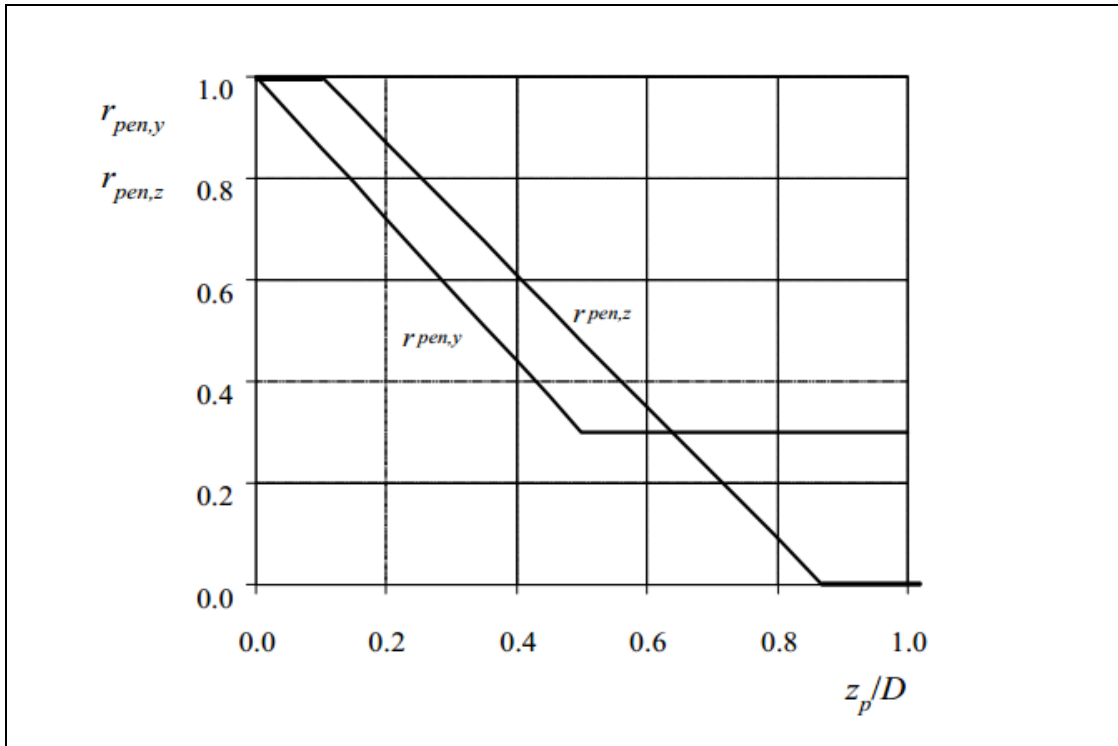
$$r_{pen,z} = 1.0 - 1.3 \left(\frac{z_p}{D} - 0.1 \right) \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.19) ’u kullanmak için denklemin 0.3’ten büyük veya eşit olması gerekir.

Benzer şekilde Eşitlik (3.20)’nin kullanılabilmesi için eşitliğin 0 (sıfırdan) büyük veya eşit olması gerekir.



Şekil 3.8. Batmanın tanımı (Veritas, 2007, 13)



Şekil 3.9. Batmadan dolayı pik yük azaltma katsayıları (Veritas, 2007, 13)

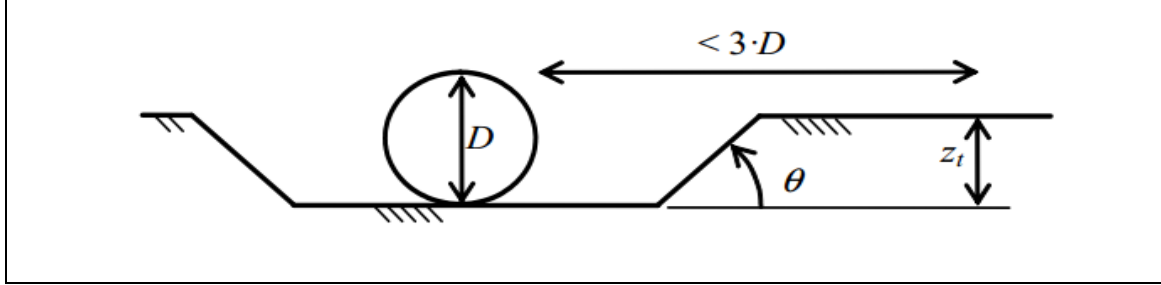
Trençten (hendekten) dolayı yük azaltma:

Aşağıda verilen eşitliklerden y (yatay) ve z (düşey) yönündeki deniz tabanındaki trenç (hendek) katsayısı hesaplanır.

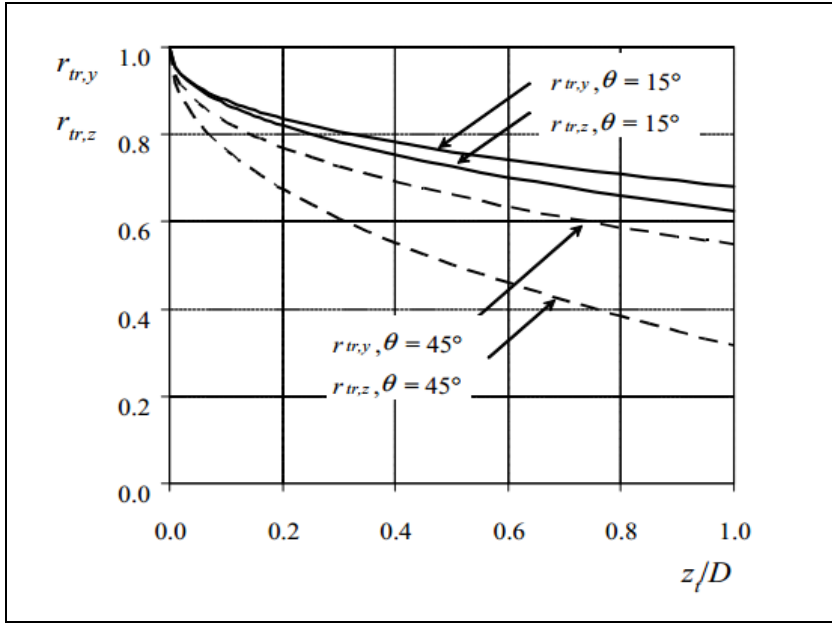
$$r_{tr,y} = 1.0 - 0.18(\theta - 5)^{0.25} \left(\frac{z_t}{D} \right)^{0.42}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (3.21)$$

$$r_{tr,z} = 1.0 - 0.14(\theta - 5)^{0.43} \left(\frac{z_t}{D} \right)^{0.46}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (3.22)$$

Trenç derinliği 3D uzaklıktan daha az olmalıdır. Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Trenç parametresi tanımı (Veritas, 2007, 13)



Şekil 3.11. Trençten dolayı pik yük katsayıları (Veritas, 2007, 14)

Zemin direnci:

Zemin direnci genel olarak: katkısız Coulomb sürtünme ve pasif direnç olmak üzere iki bölümden oluşur [26].

Burada kum kohesive etkileri ihmal edilen ve geçirimli bir zemin olarak tanımlanacaktır. Eğer boru kum zemine yerleştirildiğinde boru ile kum zemin arasındaki en önemli parametre sürtünme katsayısı ve kumun batık ağırlığıdır.

Burada kil kohesive etkileri önem teşkil eden ve geçirimsiz bir zemin olarak tanımlanacaktır.

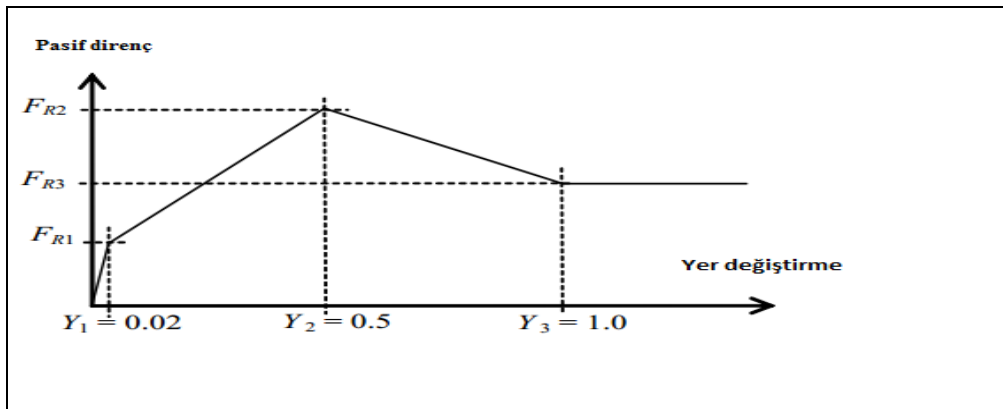
Burada kaya çap niceliği olarak 50 mm'den büyük olarak kabul edilecektir.

Sürtünme katsayısı (μ) beton ile kaplanmış bir borunun:

- Kum zemin üzerine yerleştirilen boru için 0.6,
- Kil zemin üzerine yerleştirilen boru için 0.2,
- Kaya zemin üzerine yerleştirilen boru için 0.6 alınır.

Kum ve kil üzerindeki bir boru modelinin; borunun pasif direnci aşağıdaki gibi tanımlanacaktır fakat bu etkiler kaya için ihmal edilecektir. Pasif zemin direnci için tipik bir model dört farklı bölgeden oluşur.

- 1) Elastik bölge: Bu bölgede yatay yer değiştirme tipik olarak borunun çapından %2'den daha azdır.
- 2) Bu bölgede önemli derecede yer değiştirme gerçekleşebilir. Kum için çapın yarısı kadar yer değiştirme, kil için ise zemin boru arasındaki etkileşimden dolayı daha fazla batmasına neden olmasıyla birlikte zemin pasif direncini artırır.
- 3) Borunun patlamasından sonra borunun zemine batma miktarı azalır.
- 4) Tipik olarak yer değiştirme bir borunun çapını aştığı zaman, bu durumda zeminin pasif direnci ve borunun zemine girme derinliği sabit olarak kabul edilir.



Şekil 3.12. Pasif direnç (Veritas, 2007, 14)

3.2. Deterministik Tasarım Yöntemleri

3.2.1. Dinamik analiz

Dinamik Analiz akıntı ve dalga etkisi altındaki borunun doğrusal olmayan davranışının zamansal çözümünü içerir [27]. Girdi parametreleri şunlardır:

- Dalga spektrumu ve zaman serileri
- Deniz tabanındaki akıntı hızı
- Borunun yapısal davranış parametreleri
- Hidrodinamik kuvvetler
- Zemin direnci kuvvetleri
- Difüzör gibi sınırlayıcı geometriler

Borunun uzunluğu sonuçları etkileyebileceğinden (250-1000 m gibi) sabitleme bloklarının yerleşiminin, boruların eğilme hassasiyetine etkisi doğrusal olmayan analizde irdelenmelidir [28].

3.2.2. Genelleştirilmiş stabilite analizi

Bu yöntem boruların stabilitesinin belirlenmesi genel olarak dinamik analizlerin sonucunda ortaya çıkan boyutsuz eğrilerin daha kolaylık sağlaması açısından kullanılır. Temel varsayımlar aşağıdaki gibidir [29].

- Hidrodinamik kuvvetler girdapla beraber modifiye edilir
- Başlangıçta gömme oluşmaz
- Borunun geçmiş yükleme durumu hakkında bilgiler yoksa (kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti vb.)
- Pürüzlü boru
- Borunun kısmi olarak zeminin içine batmasından dolayı zeminin pasif zemin direnci
- Orta derecelenmiş kumlu zemin
- JONSWAP dalga spektrumu
- Azaltma katsayısı göz önüne alınmaz (Eşitlik 3.17’de verilen denklem dikkate alınmaz)

Genelleştirilmiş bu analiz boruların verilen bir deniz durumuna göre boyutsuz parametreler tarafından kontrol parametreler aşağıdaki gibidir.

Yük parametresi (KC sayısı) $K = U_s T_u / D$

Boru ağırlık parametresi $L = \omega_s / 0.5 \rho_w D U_s^2$

Akıntının dalga hızına oranı $M = U_c / U_s$

Göreceli zemin ağırlığı (kum zemin için) $G = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$

Kayma mukavemeti parametresi (kumlu zemin) $S = W_s / (D S_u)$

Zaman parametresi $T = T_1 / T_u$

Burada;

- U_s ve T_u sırasıyla; deniz tabanına yakın ve boruya normal bir şekilde etkiyen belirgin hız ve sıfırı yukarı kesme yönteminden elde edilen (zero up-crossing) periyot
- U_c sınır tabakası içinde bulunan boruya normal bir şekilde etkiyen akıntı bileşeni. Ortalama değeri 0 ile D arasında integrali alınarak hesaplanır.
- W_s ve D ise sırasıyla batık ağırlık ve borunun çapı
- ρ_w ve ρ_s sırasıyla suyun yoğunluğu ve kumlu zemin malzemesinin yoğunluğu
- S_u killi zeminin direnajsız kayma dayanımı
- T_1 deniz durumunu temsil eden süre (saniye olarak)

Şekil 3.23. ile Şekil 3.28 arasındaki şekiller genelleştirilmiş ağırlık parametresi L, K değerine karşılık gelen M değerinden L okunur ya da tam tersi de olabilir. Var olan bilgi kullanılarak bulunmak istenen değere ulaşılır. Verilen Çizelgeler ölçeklenmiş boyutsuz yanal yer değiştirme $\delta = Y/D$ için 10, 20, 40 değerleri için ve deniz durumuna bağlı olarak 500 ve 1000 dalga periyotları verilmiştir. ($T = T_1 / T_u = 500, 1000$ gibi)

Yer değiştirmenin hesaplanması açısından verilen şekilleri kullanarak ya da şekiller arasında interpolasyon yapılarak yanal yer değiştirme hesabı yapılabilir. Tasarımın doğru

bir şekilde yapılabilmesi için birkaç interpolasyon yapılması gerekebilir. Bu durum daha güvenilir olacaktır.

Şekil 3.29'da ayrıca genelleştirilmiş ağırlık parametresi denge durumunu tamamlamış kumlu zemin üzerindeki boru ($\delta = 0$) için verilmiştir.

Boru boyunca borudaki sabit bir noktadaki eğilme uzaması Şekil 3.23 ve Şekil 3.28 arasında bulunan 6 adet şekilden, kesikli çizgiler yardımıyla bulunur. Mühendislikte eğilme/uzama ince bir boru et kalınlığının genelleştirilmiş ve yaygın olarak kabul görmüş Eşitlik 3.17.'de verilmiştir.

$$\varepsilon = \left[\frac{8W_s D}{\pi E t_s D_s} \right]^{1/2} \varepsilon' \quad (3.23)$$

Burada;

ε : Birim şekil değiştirme (deformasyon)

W_s : Batık ağırlık (suyun içindeki ağırlık)

D_s : Çelik boru çapı

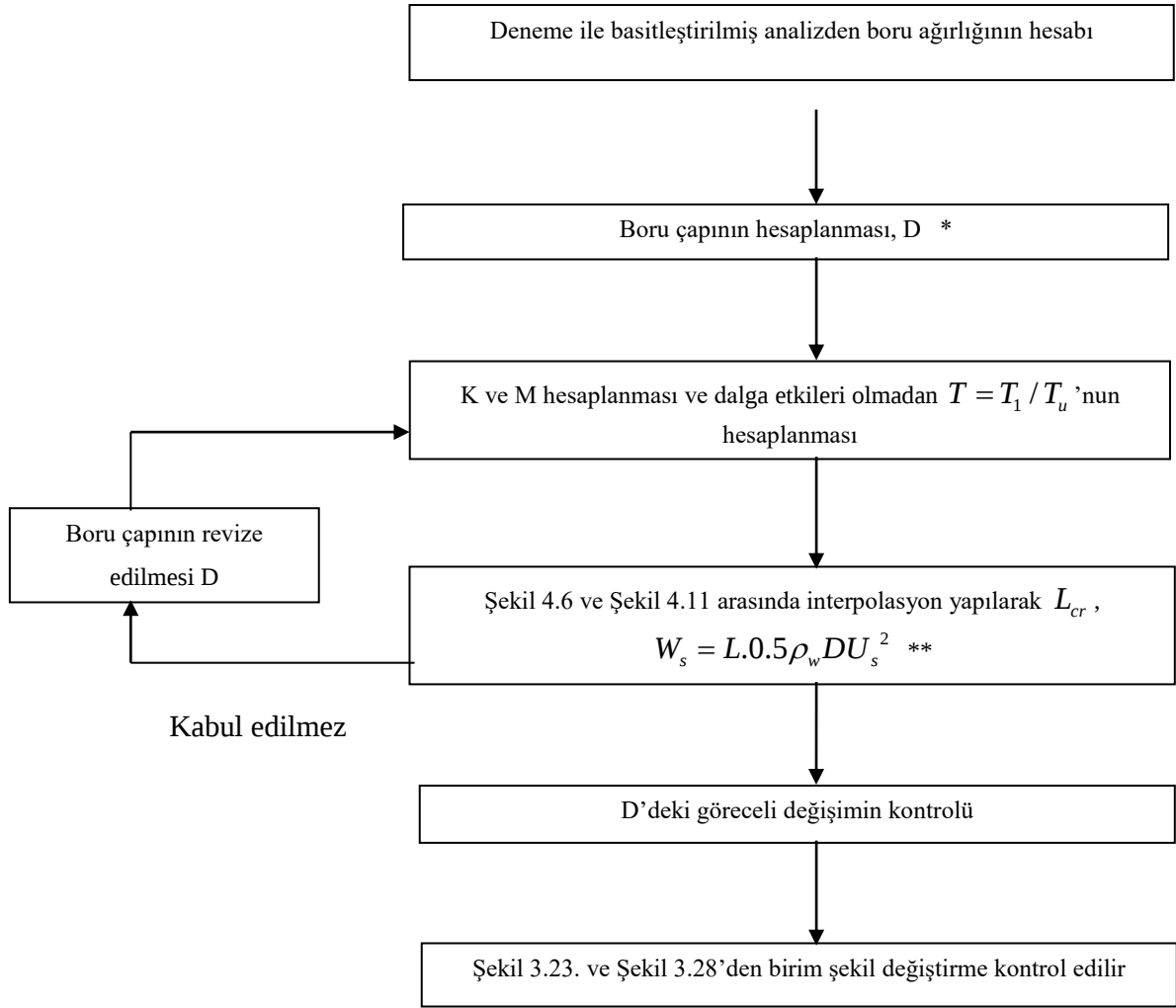
t_s : Çelik boru et kalınlığı

E: Elastisite modülü (MPa= N/mm²)

D: Borunun iç çapı

Eğilmede Genelleştirilmiş Analiz Yönteminin kullanılabilmesi için maksimum izin verilebilir yer değiştirme %2 kadar kabul edilir. Bu durum malzemenin lineer elastik olduğu varsayımı yapılır. %2'nin üzerine çıktığı zaman bu durum lineer elastik durum olmaktan çıkıp elastik olmayan malzeme olarak kabul edilir ve yeni analizlerin yapılması gerekir. Ayrıca 20m'ye kadar kabul edilir birim şekil değiştirme değerini karşıladığından emin olunmalıdır.

Kumlu zemin için Genelleştirilmiş Stabilité Analiz Metodu aşağıdaki akış diyagramında gösterilmiştir.



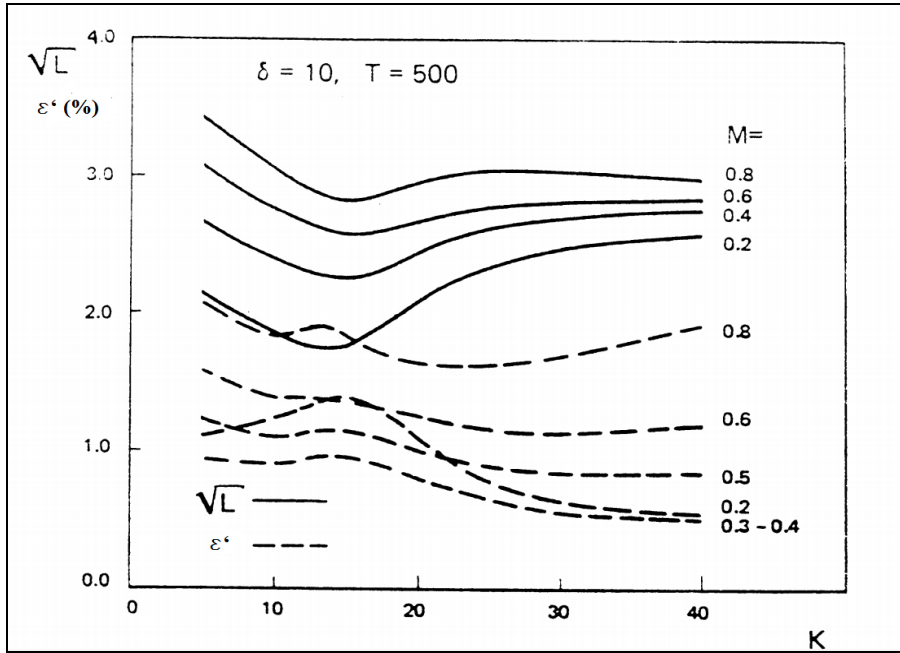
Şekil 3.13. Kumlu zemin için genelleştirilmiş stabilite analiz metodu

$$* D^2 = \frac{1}{\rho_c - \rho_w} \left[\frac{W_s}{0.25\pi g} + D_i^2(\rho_{st} - \rho_i) + D_s^2(\rho_{cc} - \rho_{st}) + D_{cc}^2(\rho_c - \rho_{cc}) \right]$$

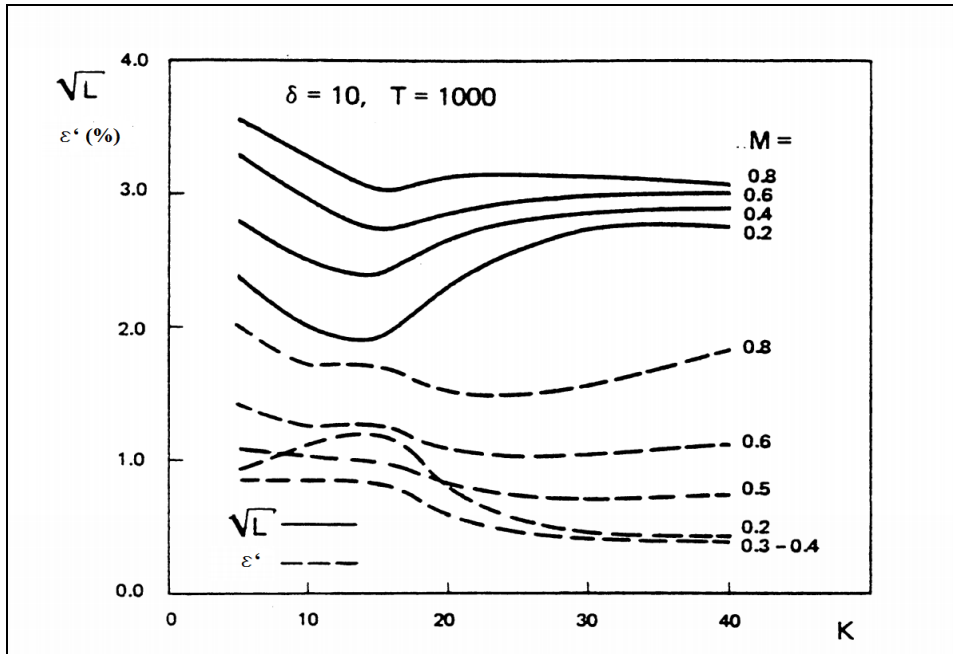
** Beton ağırlığı hesaplanırken %5 suyu absorbe ettiği varsayımı yapılacaktır.

*** Eğer birim şekil değiştirme %2'yi aşarsa;

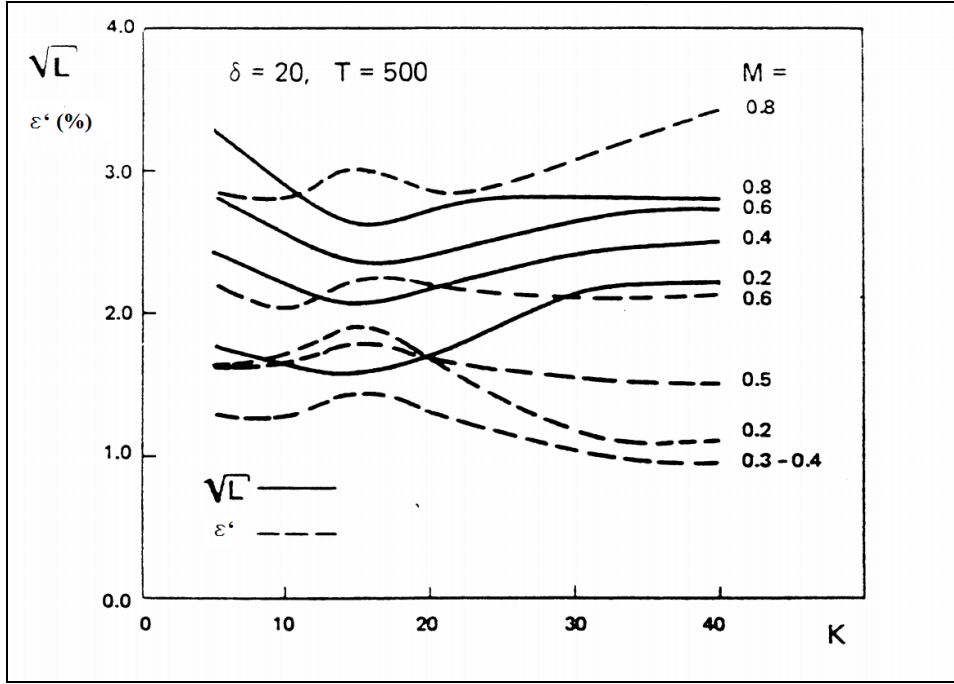
1. Yatay olarak borunun ağırlığı artırılmalı (boru yanlarına taş koymak gibi)
2. Non linear malzeme modeli kullanılmalı



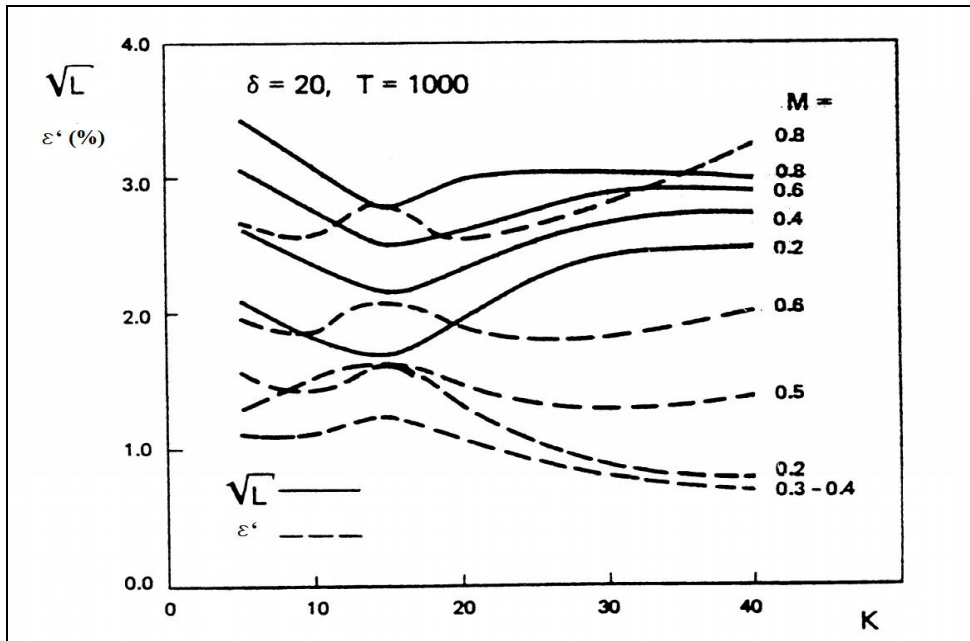
Şekil 3.14. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, 1988, 19)



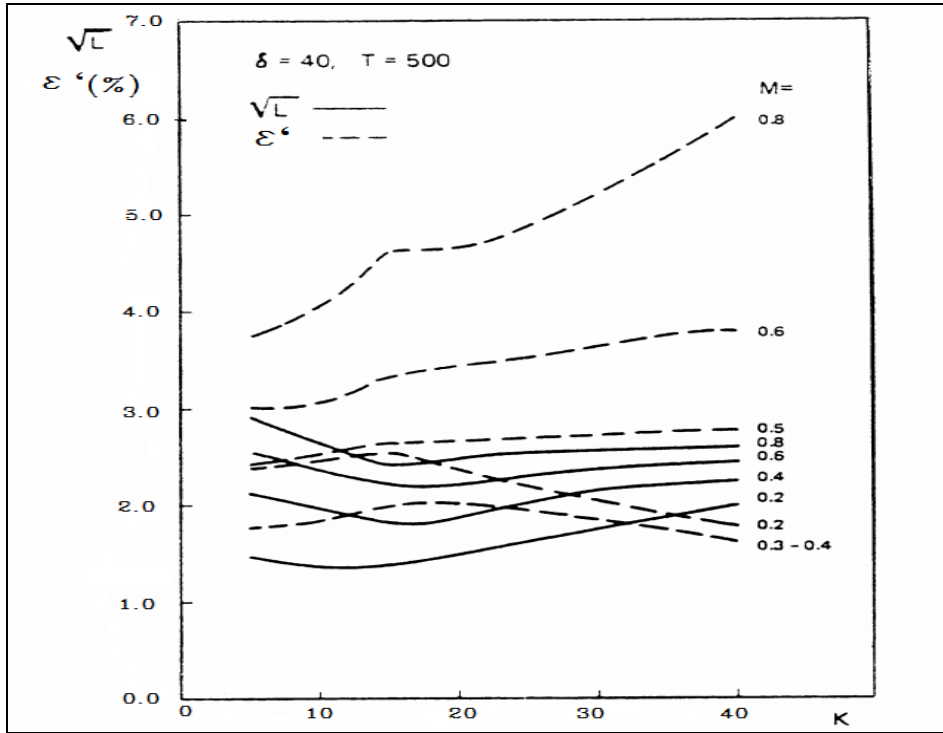
Şekil 3.15. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, 1988, 20)



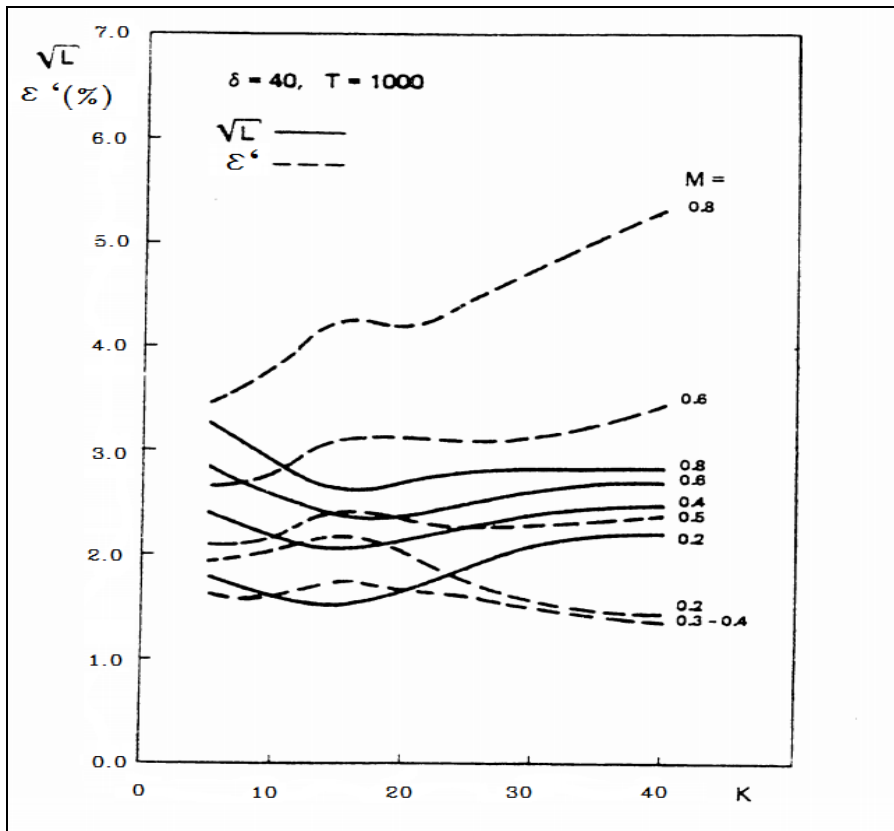
Şekil 3.16. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, 1988, 20)



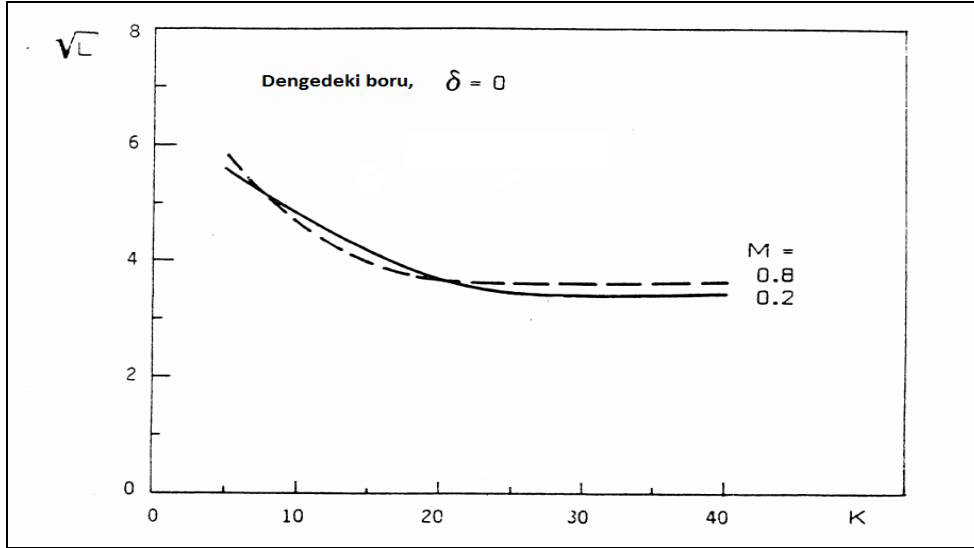
Şekil 3.17. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, 1988, 21)



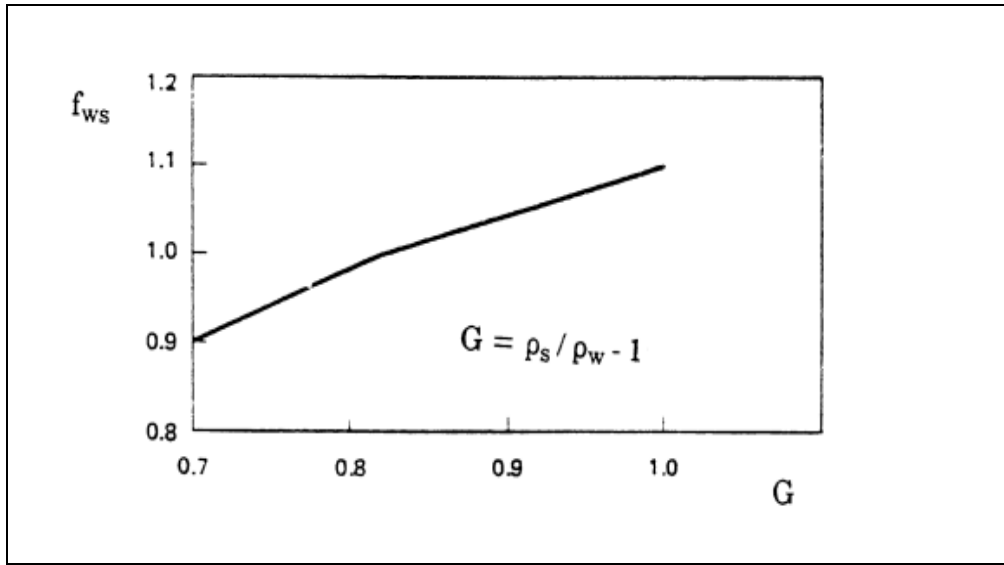
Şekil 3.18. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, R. E305, 1988: 21)



Şekil 3.19. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, 1988: 22)



Şekil 3.20. Genelleştirilmiş ağırlık parametresi L ve eğilme uzaması δ değerlerine karşılık K ve M değerleri (DNV, R. E305, 1988: 22)



Şekil 3.21. Boyutsuz zemin yoğunluğuna karşılık gelen düzeltme katsayısı (DNV, R. E305, 1988: 23)

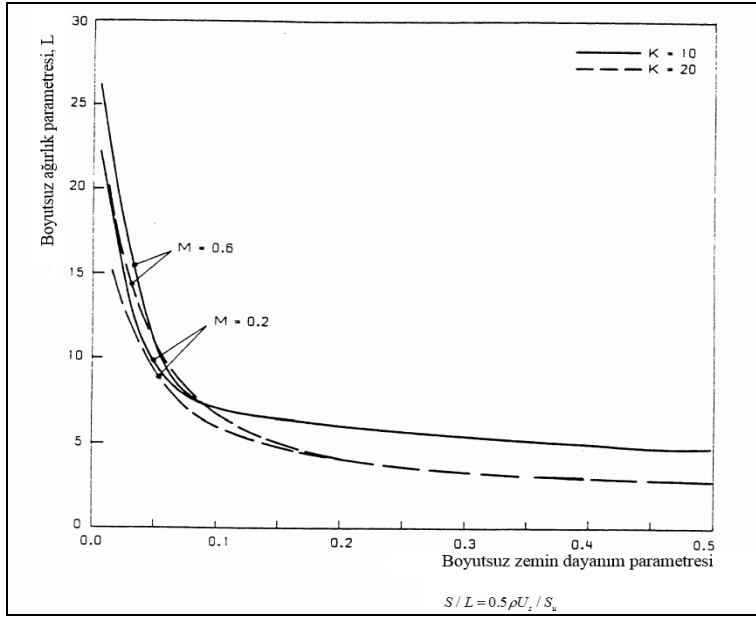
Boru kil zemin üzerinde ise:

Kil zemin üzerindeki borular için Tasarım Metodu mutlak stabilite (boru patlaması yok) boru ağırlığının şartları sağlayıp sağlamadığını ve boru tasarımının ekstrem dalga koşullarına göre yapılmasını belirler.

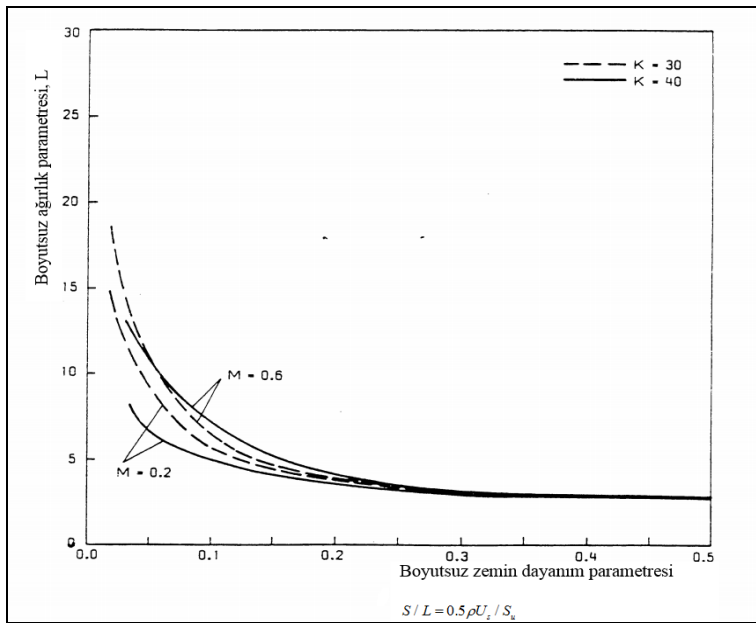
Şekil 3.31. ve Şekil 3.32.'de killi deniz tabanının stabilitesi için hesap temeli oluşturur. Bu şekillere göre dalga kombinasyonunun ekstrem koşulları için borunun stabil olmasını

sağlayacaktır. Şekiller kritik ağırlık parametresi L_{cr} , boyutsuz zemin dayanımının bir fonksiyonu S/L , K ve M 'nin birer fonksiyonudur. Tasarım, boru ağırlığının talebi karşılayan bir doğruluğu vermesi için eğrilerde birkaç iterasyon gerekebilir.

$f_{ws} = 1.1$ Belirsizlik faktörünün ağırlığın dengelenmesi için bir sonraki bölümde hesaplamaları verilmiştir.

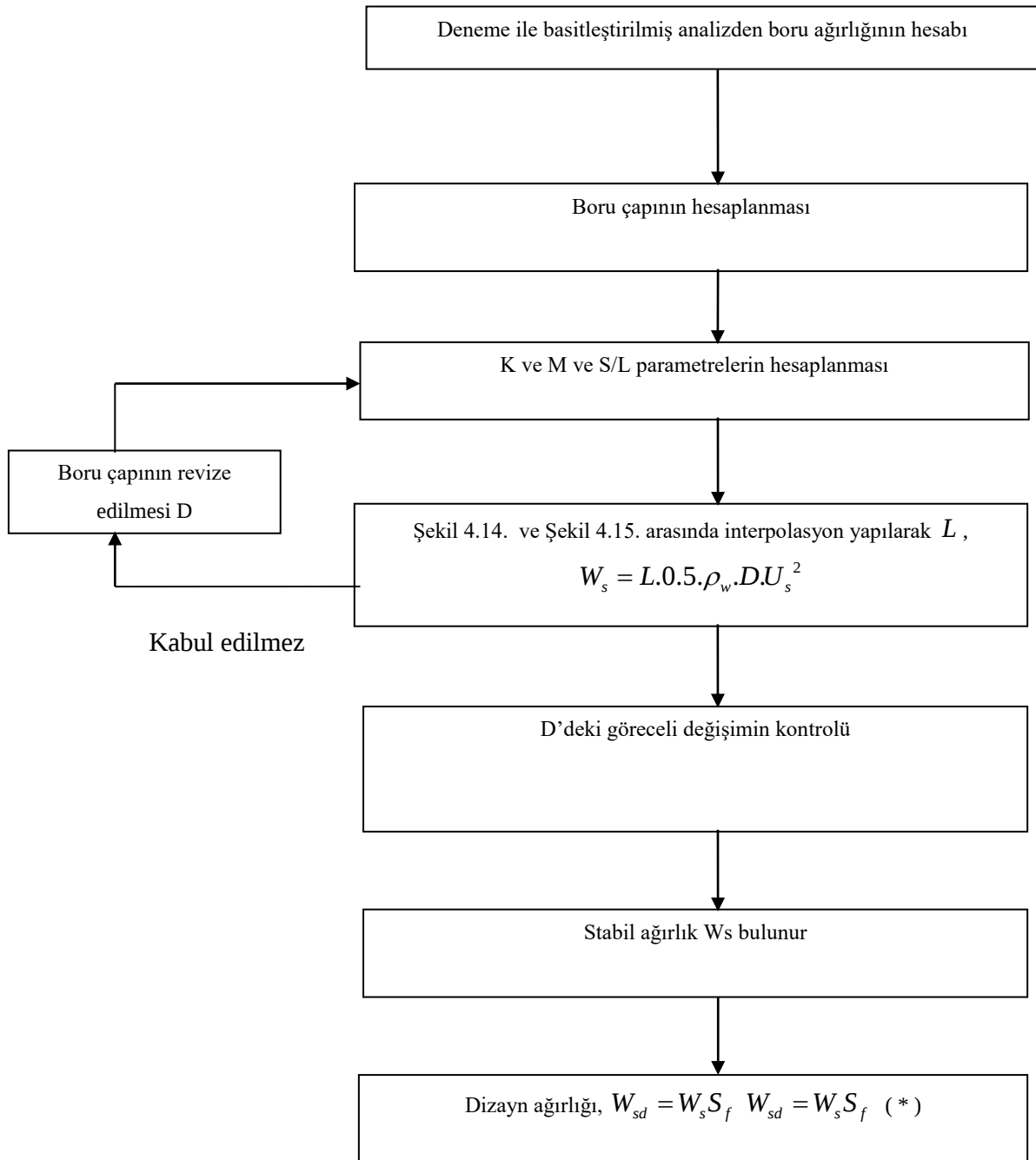


Şekil 3.22. Kıl için stabilite eğrisi ($K=10$ ve 20) (DNV, R. E305, 1988: 24)



Şekil 3.23. Kıl için satbilite eğrisi ($K=30$ ve 40) (DNV, R. E305, 1988: 24)

Killi zemin için Genelleştirilmiş Stabilité Analiz Metodu aşağıdaki akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Killi zemin için genelleştirilmiş stabilit  analiz metodu

(*) Stabil ağırlık W_s , Şekil 3.31. ve Şekil 3.32.'den hesaplanmalıdır. Bulunan değer Belirsizlik faktörü $S_f = 1.1$ ile çarpıldıktan sonra tasarım ağırlığına ulaşılır.

Yukarda sunulan genelleştirilmiş analizin uygulanabilmesi için aşağıdaki parametrelerin verilen aralıklarda olması gerekir.

$$4 < K < 40$$

$$0 < M < 0.8$$

$$0.7 < G < 1.0$$

$$0.05 < S < 8.0$$

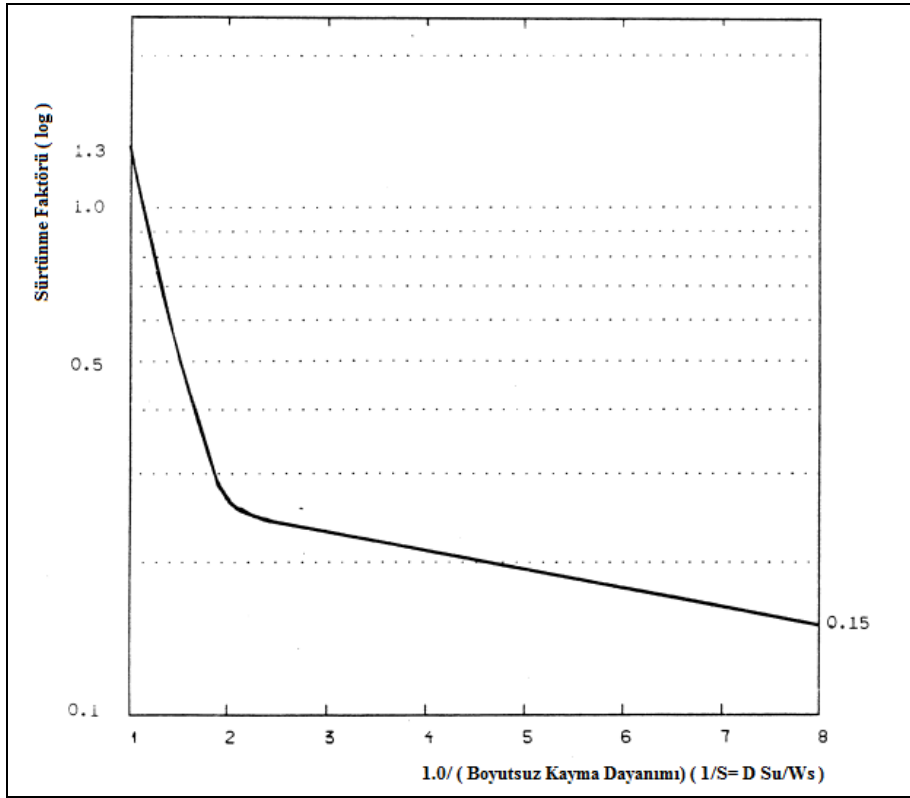
$$D \geq 0.4$$

3.2.3. Basitleştirilmiş statik stabilite analizi

Bu metot statik stabilite yaklaşımına dayanır, ki bu yöntem klasik tasarım yaklaşımıyla genelleştirilmiş stabilite analizleri kullanılarak bazı değerler kalibre edilerek sonuca varılmıştır [30]. Elde edilen kalibrasyon katsayısı, borunun yatay yer değiştirmesi 20m değerini aşmaması koşuluyla bu metot kullanılabilir. Tabii bu bölümdeki verilen sabit katsayılar oldukça önemli parametreler olup bu değerlerin bu yöntem için kullanılması gerekir. Aşağıda verilen zemin tipine bağlı olarak kalibre edilmiş sürtünme katsayısı verilmiştir.

Çizelge 3.3. Zemin tipine bağlı olarak kalibre edilmiş sürtünme katsayısı

Zemim Tipi	Kalibre Edilmiş Sürtünme Katsayısı
Kum	0.7
Kil	Şekil 3.34.'de verilmiştir.



Şekil 3.25. Kil için tavsiye edilen sürtünme faktörü (Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi, DNV, R. E305, 1988: 26)

Bu yarı statik (quasi-static) metot aşağıdaki tanımlarla ifade edilmiştir.

$$[W_s / F_w - F_L] \mu \geq F_D + F_I \quad (3.24)$$

W_s : Batık ağırlık (suyun içindeki ağırlık)

F_w : Kalibrasyon faktörü

μ : Zemin sürtünme faktörü

F_L : Kaldırma kuvveti

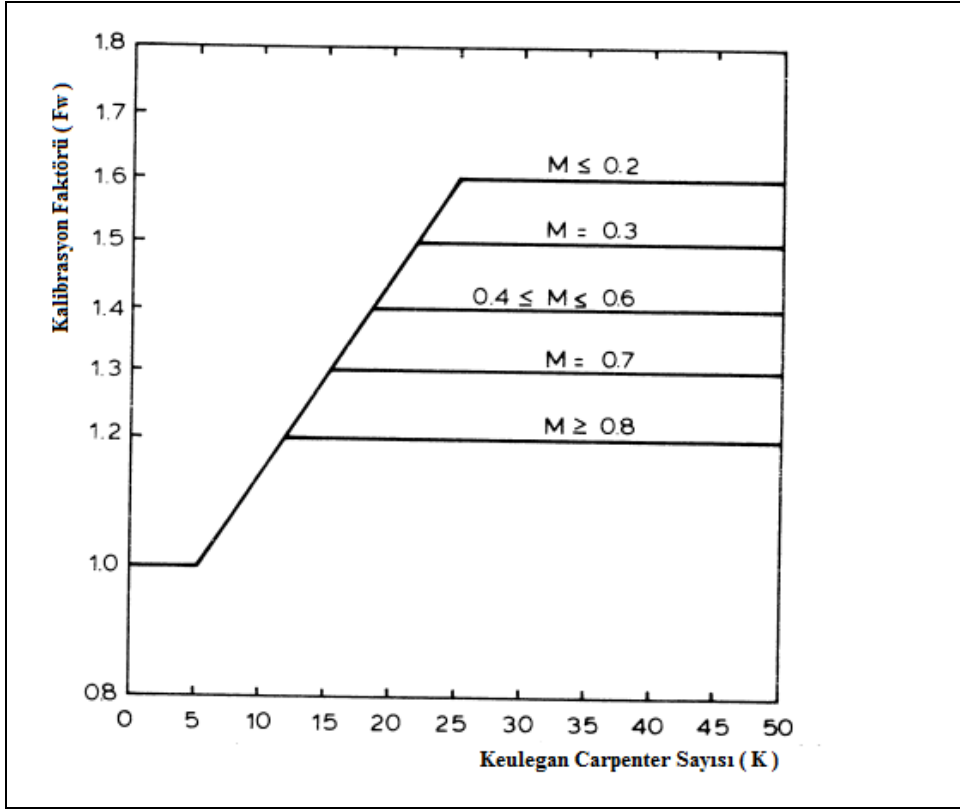
F_D : sürüklenme kuvveti

F_I : eylemsizlik kuvveti (atalet kuvveti)

Ağırlığın limit değeri Eşitlik 3.25.'ten hesaplanır.

$$W_s = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu F_L}{\mu} \right]_{\max} F_w \quad (3.25)$$

F_w değerinin değişimi K ve M değerleri ile birlikte Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.26. K ve M'nin fonksiyonu olan kalibrasyon faktörü F_w (DNV, R. E305, 1988: 27)

Kalibrasyonu katsayısını kullanarak (F_w) batık ağırlığının hesabı (W_s), boru üzerine etkileyen hidrodinamik kuvvetler (F_L , F_D , F_I) Eşitlik 3.26, Eşitlik 3.27, Eşitlik 3.28 kullanılarak hesaplanır.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w D C_M (U_s \cos \theta + U_c)^2 \quad (3.26)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w D C_D |U_s \cos \theta + U_c| (U_s \cos \theta + U_c) \quad (3.27)$$

$$F_I = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \rho_w C_M A_s \sin \theta \quad (3.28)$$

$$F_f = \mu F_c \quad (3.29)$$

$$F_C = w_s - F_L \quad (3.30)$$

$$\frac{F_R}{F_C} = \begin{cases} (5k_s - 0.15k_s^2) \left(\frac{z_p}{D} \right)^{1.25}, & k_s \leq 26.7 \\ k_s \left(\frac{z_p}{D} \right)^{1.25}, & k_s > 26.7 \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1\kappa_C}{G_C^{0.39}} \left(\frac{z_p}{D} \right)^{1.31} \quad (3.32)$$

$$\kappa_s = \frac{\gamma_s' D^2}{w_s - F_z} = \frac{\gamma_s' D^2}{F_C}, F_C = w_s - F_z \quad (3.33)$$

$$G_C = \frac{s_u}{D\gamma_s} \quad (3.34)$$

$$\kappa_C = \frac{s_u D}{w_s - F_z} = \frac{s_u D}{F_C} \quad (3.35)$$

Eşitlik (3.31)'de verilen hesaplamalar kum için hesaplanırken Eşitlik (3.32) ise kil için pasif zemin kuvveti hesaplanır.

Eşitlik (3.29)'de verilen denklemde coulomb sürtünme kuvvetidir. Coulomb kuvveti zeminin türüne bağlı olarak değişen sürtünme katsayısına ve boru ile zemin arasındaki düşey kuvvetinin oranıdır.

γ_s' : zeminin batık birim ağırlığı, kum için 7000 (çok gevşek) ile 13 500 N/m³ (çok sıkı) arasında değişir.

s_u : drenaj olmadan kil kayma direnci (N/m²)

G_C : zemin (kil) mukavemet parametresi

ρ_w : suyun yoğunluğu

D: borunun toplam çapı

C_L : kaldırma kuvveti sabiti ($C_L = 0.9$)

C_D : sürüklenme kuvveti sabiti ($C_D = 0.7$)

C_M : atalet kuvveti sabiti veya eylemsizlik kuvveti sabiti ($C_M = 3.29$)

U_s : tabana yakın boruya dik göz önüne alınan hız genliği

U_c : boruya dik akıntı hızı

A_s : göz önüne alınan boruya dik eylemsizlik ($2\pi U_s / T_u$)

θ : dalga çeviriminde hidrodinamik kuvvetin faz açısı

- Zemin sınıfına bağlı olarak zemin sürtünme katsayısı değeri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.
- $K > 50$ ve $M \geq 0.8$ değerleri için sabit kalibrasyon katsayısı $F_w=1.2$ olarak uygulanabilir.

3.2.4. Gömülü borularda statik metot yöntemi

Bu bölümde gömülü borulardaki yüklerin statik dengesi iki yönden incelenir.

1) Pik (en üst sınır) yatay kuvveti: Bölüm 3.2.3'te verilen sürüklenme kuvveti ile atalet kuvvetinin toplamını içerir. Pik yatay kuvveti Eşitlik 3.36'da verilmiştir.

$$F_Y = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y \cdot (U_s + U_c)^2 \quad (3.36)$$

2) Pik (en üst sınır) düşey kuvveti: düşey yöndeki pik kuvveti Eşitlik 3.37'de verilmiştir.

$$F_Z = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Z \cdot (U_s + U_c)^2 \quad (3.37)$$

Yatay ve düşey (pik) kuvvetlerinde bulunan C_Y ve C_Z katsayıları ise Çizelge 3.4 ve çizelge 3.5'te sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 3.4. C_Y katsayısının değerleri

C_Y		K										
		2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥ 140
M	0.0	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52
	0.1	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33
	0.2	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18
	0.3	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14
	0.4	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10
	0.5	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08
	0.6	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05
	0.7	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01
	0.8	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.20	1.08	1.03	1.00	1.00
	1.0	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	2.0	10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5.0	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52
	10	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33

Çizelge 3.5. C_Z katsayısının değerleri

C_Z		K										
		2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥ 140
M	0.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	0.1	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97
	0.2	3.16	3.45	3.74	2.60	1.86	1.45	1.26	1.16	1.09	1.00	0.90
	0.3	3.01	3.25	3.53	2.14	1.52	1.26	1.10	1.01	0.99	0.95	0.90
	0.4	2.87	3.08	3.35	1.82	1.29	1.11	0.98	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.5	2.21	2.36	2.59	1.59	1.20	1.03	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.6	1.53	1.61	1.80	1.18	1.05	0.97	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.7	1.05	1.13	1.28	1.12	0.99	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.8	0.96	1.03	1.05	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	1.0	0.91	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	2.0	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	5.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	10	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97

Buna göre gömülü boru tasarımı limit durum fonksiyonları Bölüm 5'te verilecektir.

4. DENİZ TABANINDAKİ BORULARIN TASARIMINDA RİSK ANALİZİ

4.1. Genel Bilgiler

Deniz tabanındaki boruların risk analizlerinin yapılmasının amacı; borunun inşası dahil olmak üzere, boru yerleşimi yapılan bölgedeki canlılara etkisi (deniz canlıları, çevresel etki değerlendirmesi vb.), borunun göçme ve deplasman hesabı, deniz tabanındaki zemin türünün belirlenmesi, akıntı ve dalga koşullarının değerlendirilmesi, uygun boru çapının seçilmesi, boru et ve kaplama kalınlıklarının belirlenmesi gibi risk parametrelerinin tasarımıda gözetilmesidir.

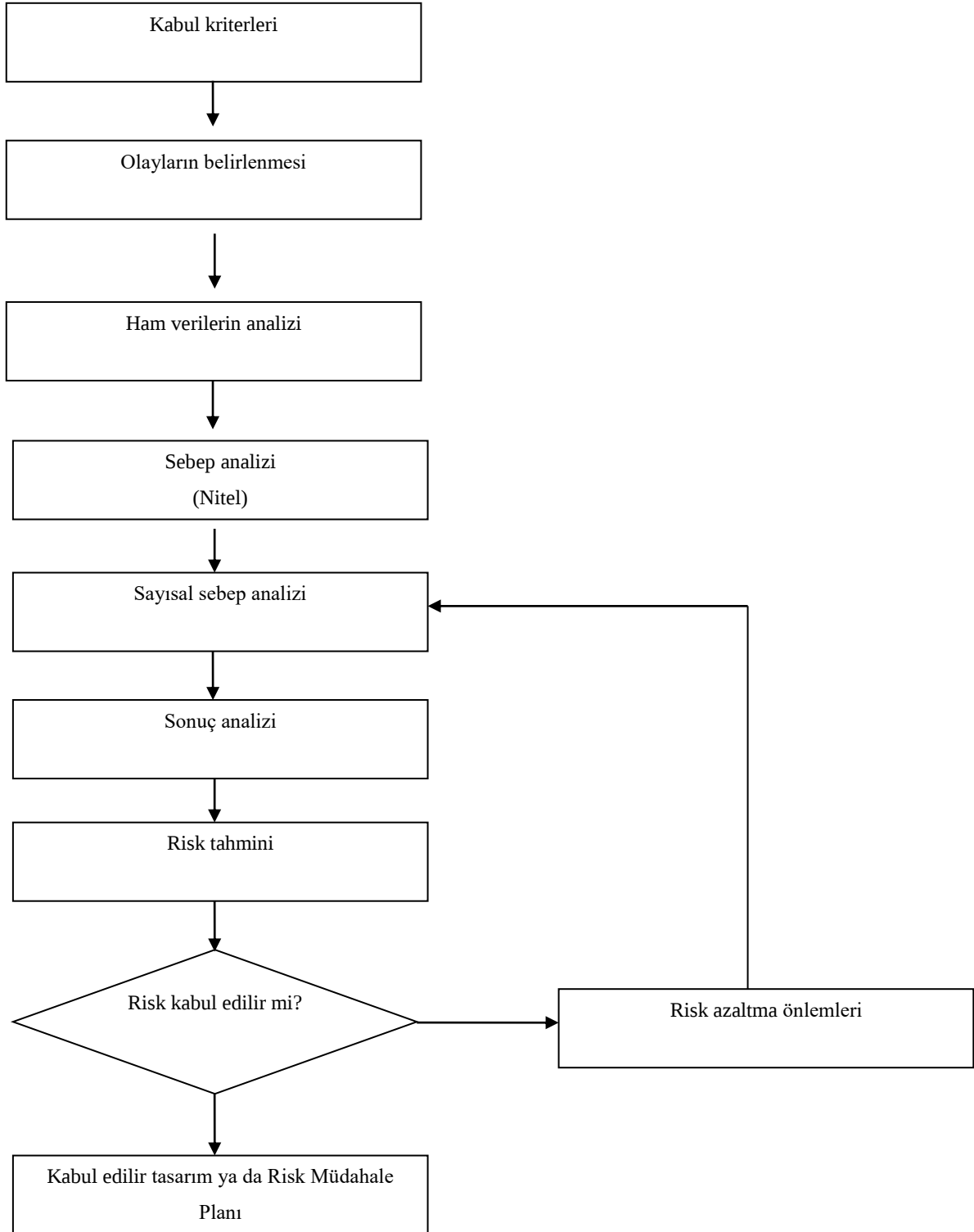
Riskin olma olasılığı ile çevreye olan etkisi (önemi) bir arada değerlendirilecek olunursa; olma olasılığı ve etki yüksek ise yüksek olarak nitelendirilir ya da oluşma olasılığı ve etki düşükse bu risk düşüktür denilebilir. Bahsedilen risk çalışması matris şeklinde Şekil 4.1.'de gösterilmiştir [31].

Olasılık kategorisi				Risk kategorileri				
	$>10^{-2}$	Çok yüksek	5					
	$10^{-3}-10^{-2}$	Yüksek	4					Yüksek risk
	$10^{-4}-10^{-3}$	Orta	3		Orta risk			
	$10^{-5}-10^{-4}$	Düşük	2					
	$<10^{-5}$	Çok düşük	1		Düşük risk			
				ÇD	D	O	Y	ÇY
				Sonuç kategorisi				

Şekil 4.1. Basit risk matrisi

4.1.1. Risk analizi kavramları

Risk analizi yaparken riske sebep olabilecek başlatıcı etmenler ile olayı ya da analizin en son aşaması olarak sonuçlar Şekil 4.2'de verilen akış şemasında olduğu gibi değerlendirilir.



Şekil 4.2. Risk analiz yöntemi akış şeması

4.1.2. Riske dayalı denetim ve bütünlük yönetimi

Riske Dayalı Denetim ve Bütünlük Yönetimi (RDDBY), kaynakların en iyi şekilde kullanılması, yüksek riskli bölgelerin maliyetlerinin en aza indirgenmesi, etkili bir şekilde

değerlendirilmesi ve gerekli emniyetin sağlanması amacıyla kullanılan bir araçtır. Bu yöntem deniz tabanı boru sistemlerinde yüksek maliyetlere neden olduğundan, denetim ve bakım alanlarında kullanılır [32].

RDDBY özellikle gerekli Yapısal Risk Analizinin (YRA) belirlenmesi, denetimi (tip, frekans, zaman, boyut), bakımı (boruların onarımı, kaplama, korozyon engellenmesi), potansiyel olarak risk seviyesi yüksek veya riskten kaynaklanan göçmeden kaçınmak için, kabul edilir risk seviyeleri önerir. Bu risk analizi göçme modelleri, göçme oranları yoluyla elde edilir [33].

Bu faktörler göçme riskini tanımlar. Risk, göçme seviyesinin göçme desenindeki her tepe değeri, denetimler, bakım ve onarım gibi kıstaslara bağlı olarak seçilir. Örneğin; PARLOC 2001 (Pipeline And Riser Loss of Containment) gibi geçmiş göçme veri tabanları ana göçmenin göstergeleri olarak iç korozyon ve dış etkileri belirtmişlerdir.

4.2. Kabul Edilir Kriterler

Birçok düzenleyici kurum kabul edilebilir risk kıstasını ya niteliksel ya da sayısal olarak verir. Norveç Petrol Kuruluşu NPD (The Norwegian Petroleum Directorate) aşağıda verilen düzenlemeleri kıstas olarak ifade etmiştir [34].

- Rastlantısal tehlike olayları önlenmeli, işletmecinin aktiviteleri güvenli şekilde yönetmesi için bu olayları belirlemelidir.
- İşletmeci veya kurum risk analizini yapmadan önce kabul edilebilir riski tanımlamalıdır.
- Boru yerleşimi yapılmadan önce; insan, deniz canlıları ve çevre üzerindeki etkilerinin yanı sıra, maliyetin belirlenmesi ve risk analizlerin yapılması gerekir.
- Önemine göre risk belirlenmeli ve sonuçları değerlendirilmelidir.
- Deniz tabanı boruları balıkçılık, gemi aktiviteleri gibi mekanik özelliklere sahip deniz olaylarına karşı korunmalıdır.

Eğer tahmin edilen risk, kabul edilebilir risk sınırları içinde değilse; o zaman yeni risk değişkenleri irdelenmelidir. Yeni sistemin değerleri analiz edilmeli, risk seviyesi ile karşılaştırılmalı ve riski sağladığından emin olunmalıdır. Bir sistemin veya tasarımın kabul

edilebilir risk değerini sağlanmasına kadar, Şekil 4.2’de verilen akış döngüsü tekrarlanmalıdır.

4.2.1. Bireysel Riskler

Kaçınılmaz Kaza Oranı (KKO, Fatal Accident Rate), işletmeye alma ile ilgili olup aşağıdaki şekilde değerlendirilir.

4.2.2. Çevresel Risk

Çevresel risk işletme aşaması boyunca tüm olayları; bireysel riskler, toplumsal riskler gibi risk değeri taşıyan olası her bir olayı göz önüne alır. Bu süreç içerisinde olayları önlemek amacıyla yapılan risk analizleri az da olsa bu süreç içerisinde küçük etkileri vardır. Çizelge 4.1.’de çevresel risk için kabul kriterleri gösterilmiştir [35].

Çizelge 4.1. Çevresel risk için kabul kriterleri

Kategori	Toparlanma dönemi	Her yıl için operasyonel faz olasılık	Yerleştirme aşamasında her bir işlemin olasılığı
1	<1 yıl	$<1 \times 10^{-2}$	$<1 \times 10^{-3}$
2	<3 yıl	$<2.5 \times 10^{-3}$	$<2.5 \times 10^{-4}$
3	<10 yıl	$<1 \times 10^{-3}$	$<1 \times 10^{-4}$
4	>10 yıl	$<1 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-5}$

4.3. Tasarım Koşulları

4.3.1. Temel koşullar

Aşağıda verilen temel koşullar deniz tabanındaki boruların stabilitesi için göz önüne alınmalıdır.

- Çevresel koşullar
- Deniz tabanındaki geoteknik koşullar
- Topoğrafya koşulları

- Batimetri koşulları (su derinliği)
- Boru verileri (çap, boru kalınlığı, kaplama kalınlığı)
- Boru yeri

4.3.2. Yinelenme dönemi

Boru stabilitesi; boruya etkileyen çevresel koşullara ve yinelenme dönemine bağlı olarak değişir. Genelde, dalga hızı ve kıyı boyu akıntı hızları bir arada düşünülerek tasarımın yapılması gerekir [36].

Eğer yeterli miktarda bilgi mevcutsa (dalga ve akıntı için) dalga ve akıntının 100 yıllık dönüş periyoduna bağlı olarak bileşik olasılık dağılımı kullanılmalıdır. Diğer durumda aşağıda verilen koşullar önerilmektedir [37].

Eğer dalga kuvvetleri baskın ise	$\left(\begin{array}{l} \text{Dalgalar için: 100 yıllık} \\ \text{Akıntı için: 10 yıllık} \end{array} \right)$
Eğer akıntı kuvvetleri baskın ise	$\left(\begin{array}{l} \text{Dalgalar için: 10 yıllık} \\ \text{Akıntı için: 100 yıllık} \end{array} \right)$

4.3.3. Çevresel koşullar

Aşağıdaki verilen çevresel koşullar boruların uzunluğu boyunca farklı topoğrafya koşullarında değerlendirilmelidir.

- Dalgalar
- Akıntılar

Çevre koşullarının iyi tanımlanabilmesi için borunun değişik topoğrafya koşullarında (derin deniz, sığ deniz, deniz tabanı topoğrafyası vb.), borunun uzunluğu (10km, 100km, 1000km gibi) gibi borunun tasarımını etkileyebilecek ve risk oluşturabilecek parametrelerin irdelenmesi ve buna göre bir risk analizinin yapılması gerekir. Çeşitli derinliklerde dalga

hızı ve akıntı hızının belirlenmesi, deniz tabanı zeminin özelliklerinin belirlenmesi ve deniz durumu meteorolojik koşullara bağlı olarak değiştiğinden bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır [38].

Bu veriler; ölçüm verilerinden, tahmin modellerinden veya saha ölçümlerinden elde edilebilir. Eğer belli bir alanda yeterli veri yoksa (örneğin, akıntı) en yakın konumda bulunan diğer istasyon verileri değerlendirilebilir. Tasarımın akış şeması aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- 1) Geçerliliği kabul edilmiş istatistiksel yöntemler düzensiz doğal çevre koşullarının tanımlanmasında kullanılmalıdır. Deniz durumu, belirgin dalga yüksekliği (H_s), spektral pik periyot (T_p) ve yinelenme dönemine bağlı olarak tanımlanır.
- 2) Pik periyot (T_p) deniz kabarma mesafesi (fetch) ve derinliğe bağlı olmanın yanı sıra deniz durumunun (fırtına) süresine de bağlıdır. Pik dalga periyodu Eşitlik (4.1) kullanılarak hesaplanabilir:

$$T_p = \sqrt{250H_s / g} \quad (4.1)$$

Eğer H_s ve T_p bileşik olasılık dağılımı ile tanımlanabilirse (Overding ve Humb), en yüksek değeri veren H_s - T_p kombinasyonu seçilebilir [39].

- 3) Dalga koşullarında eğer seçilen konumda dalgadan kaynaklı hız etkili ise yönsel dağılım hesaba katılabilir. Genel olarak en büyük değer deniz durumunun farklı yönleri göz önünde bulundurması gerekir (yönsel dağılım). Dalga kaynaklı parçacığın hızı, boruya dik şekilde etkileyen hız (U_s) ve ortalama değere karşılık gelen “sıfırı yukarı kesme” (zero up-crossing) yönteminden elde edilen dalga periyodu ile birlikte tasarımda (T_u) kullanılır.
- 4) Dalga yüksekliği ve fırtına kabarması için JONSWAP spektrumu kısa dönem dalga istatistiğinde kullanılabilir:

$$s_{\eta\eta}(\omega) = \alpha g^2(\omega)^{-5} \exp\left[-5/4(\omega/\omega_p)^{-4}\right] \gamma^a \quad (4.2)$$

$$a = \exp\left(\frac{-(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right) \quad (4.3)$$

Burada;

ω : açısal frekans

ω_p : spektral pik açısal frekans

g : Yerçekimi ivmesi

α : Philips' sabiti

σ : Spektral genişlik parametresi

α : 0.07 eğer $\omega \leq \omega_p$

α : 0.09 eğer $\omega > \omega_p$

γ : Tepe parametresi

Us ve Tp uzun tepeli dalgalardan elde edilip deniz tabanına azaltma katsayılarıyla çarpıp boruya etkiyebilecek şekilde elde edilebilir.

$$S_{uu} = (\omega / \sinh(kd))^2 S_{\eta\eta}(\omega) \quad (4.4)$$

Burada;

$S_{\eta\eta}(\omega)$: spektrum su yüzeyi yüksekliği (uzun tepeli)

k : dalga sayısı

ω : dairesel frekans $\omega^2 = gk \tanh(kd)$

$$U_s = U_s^* R \quad (4.5)$$

$$T_u = 2\pi(m_0 / m_2)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$U_s^* = 2\sqrt{m_0} \quad (4.7)$$

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_{uu}(\omega) d\omega \quad (4.8)$$

R: azaltma katsayısı

U_s^* ve T_u Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de gösterilen boyutsuz eğriler aracılığıyla bulunabilir [40]. Birinci dereceden dalga teorisine göre dalga sığ suya doğru yaklaştığında, dalga dönüşümleri etkili olduğundan, azaltma katsayısı yeniden hesaplanmalıdır.

Azaltma katsayı faktörü dalga yönünden ve dalga yayılmasından dolayı bir kosinüs fonksiyonu ile tanımlanabilir.

$$R = \left[\int_{\theta-\pi/2}^{\theta+\pi/2} \psi(\beta, \theta) (\cos^2(\theta_p - \beta)) d\beta \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

θ_p : boruya dik yön

θ : Hâkim dalga yönü

β : İkincil dalga yönü

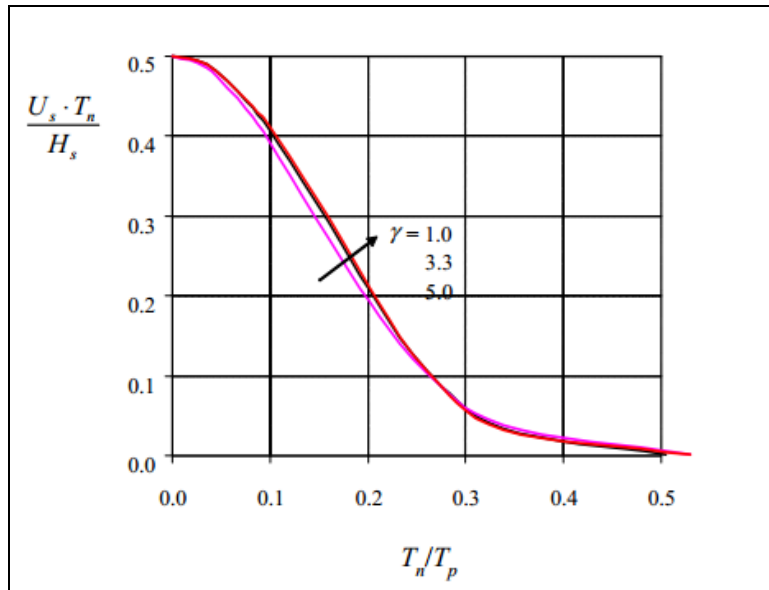
$\psi(\beta, \theta)$: yayılma fonksiyonu $\psi(\beta, \theta) = C \cos^n(\beta - \theta)$

$\psi(\beta, \theta) = C \cos^n(\beta - \theta)$ (3.10)

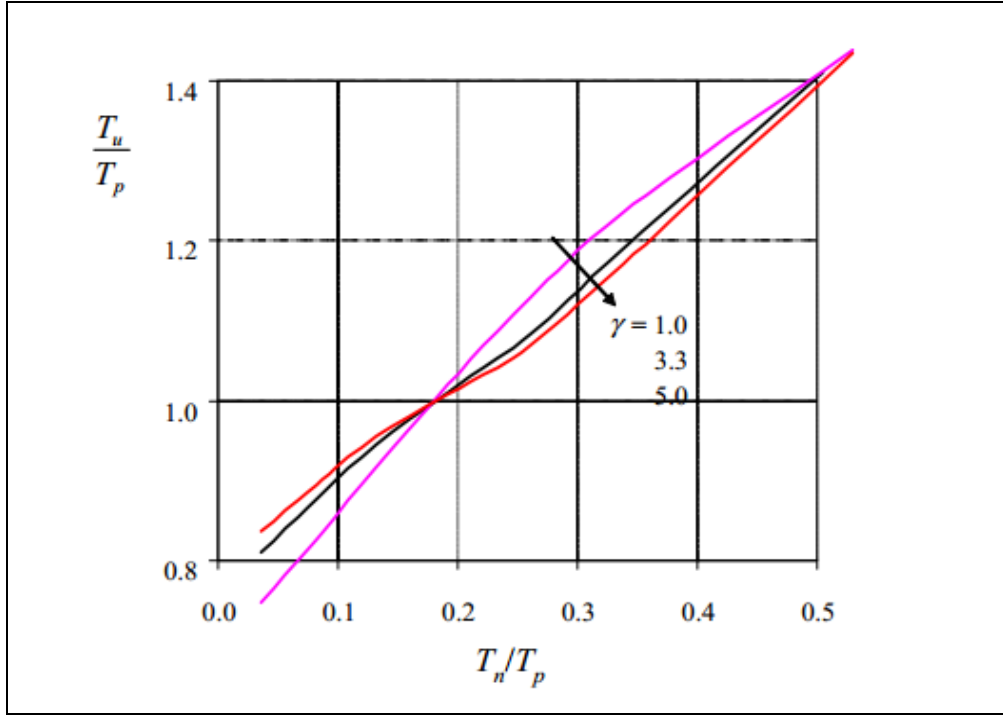
n: üstel yayılma sabiti

C: sabit

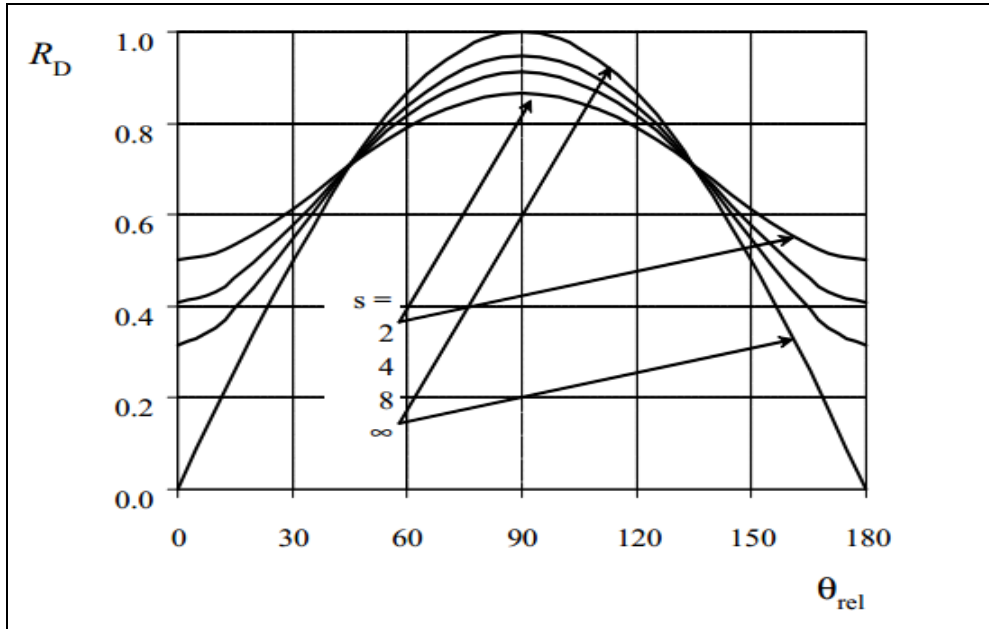
R katsayısı Şekil 4.5.'den elde edilir.



Şekil 4.3. Deniz tabanındaki belirgin hız U_s değerinin tahmin grafiği (Veritas, 2007, 12)



Şekil 4.4. Deniz tabanındaki T_u değerinin tahmin grafiği (Veritas, 2007, 12)



Şekil 4.5. Yayılma ve yönden dolayı azaltma katsayısı (Veritas, 2007, 12)

4.3.4. Geoteknik koşullar

Boru tasarımının yapılacağı güzergâhta inceleme yapılmalı ve uygun aralıklarda (örneğin borunun tüm uzunluğu düşünüldüğünde, kilometrede bir) deniz tabanı topografyası, deniz koşulları gibi alanlarda saha verileri değerlendirilmelidir. Aralıkların sayısı; borunun

uzunluğuna bağlı olarak ve geoteknik koşullara bağlı olarak değişebilir [41].

Boruların dōřeneceđi gūzergāhta ve borunun stabilitesi için ařađıda verilen deniz tabanı özellikleri göz nūne alınmalıdır [42].

- Zemin sınıfı
- Zeminin yoğunluğu (kum)
- Zemin dayanımı (kil)
- Olası zemin kayması veya sıvılaşma riski

4.3.5. Batimetri koşulları

Boru gūzergahı boyunca, topođrafya ve batimetrik kořullar saha çalıřmaları ile belirlenmelidir [43]. Stabilite için deđerlendirilecek parametreler:

- Engelleyici yapılar (kayalar, taşlar)
- Eğim gibi topoğrafya zellikleri
- Boruların gūzergahı boyunca derinlik deđiřimidir.

4.3.6. Boru karakteristikleri

Deniz tabanındaki boruların stabilitesi aşağıdaki boru parametrelerine göre değiştiğinden tasarımda bu parametrelerin belirlenmesi gerekir [44]:

- Boru dış apı
- Borunun et kalınlığı
- İşletme basıncı ve boruda iletilen maddenin ortam yoğunluğu
- Kullanılan malzemeye bağlı olarak kaplama kalınlığının yoğunluğu
- Boru malzemelerinin mekanik zellikleri

Tasarım yöntemi olarak, Bölüm 4.3'te borunun yatay yönde belli bir miktarda izin verilebilir yer değiştirme hesaplamaları sunulmuştur. Sonuç olarak, borunun kısmen veya tamamen hareket etmesi, borunun hiç hareket etmemesi istenilen bölgeler tasarımda belirlenmelidir. Bu alanlar;

- Boru/dirsek ve yükseltici bağlantıları
- Boru hattı geçişi
- Deniz tabanı valfleri
- Genleşme dirseği
- Hendekli borular

4.4. Tasarım Yöntemi

Bu bölümde deniz tabanındaki boruların ekonomik ömrü ve borularla ilişkili diğer stabilite koşulları irdelenecektir (hendek, gömme, çökme problemlerine karşı anroşman koruması). Boruların stabilitesi batık ağırlık (su altındaki ağırlık) ile ilişkilidir. Ortamdaki kuvvetler ve direnç kuvveti gibi kuvvetler deniz tabanındaki zemine bağlı olarak değişir. Sonuç olarak tasarım dengesinin amacı borunun batık ağırlığının denge kıstaslarını karşılayıp karşılamadığını doğrulamaktır [45].

Aşağıda verilen tasarım kriterleri, denge tasarımı esnasında göz önüne alınmalıdır.

- Yatay yer değiştirme
- Boruya etkiyecek basınç/çekme gerilmeleri
- Eksenel kuvvetlerden dolayı yanal burkulma
- Kaplamanın yıpranması ve aşınması
- Zamanla malzemesini kaybeden anodun zarar görmesi

Genelde yanal yer değiştirme miktarı ve basınç/çekme dayanımları borunun tasarım dizayn kriterlerine göre değerlendirilir.

4.4.1. Yük durumu

Borunun stabilitesi için oluşabilecek bütün yükler göz önüne alınmalıdır. Genelde aşağıdaki iki yük durumu koşul olarak değerlendirilir [46]:

- Yerleştirme koşulu
- İşletme koşulu

Yerleştirme koşulları borunun yerleştirildikten sonra işletmeye açılmadan önceki durumda, deniz tabanında bulunan borunun içindeki test akışkanının (hava) hareketsiz hali ile ilişkilidir. Bu durumda en kritik koşul için denge hesabı yapılır. Yerleştirme koşulunda $(W_s + B) / B = 1.1$ Belirsizlik faktörünün en az 1.1 olması istenir.

W_s : batık ağırlık (su altındaki ağırlık)

B : kaldırma kuvveti

Bunun yanı sıra borunun düşeydeki dengesi ise: $\gamma_{sc} \frac{F_L}{W_s} \leq 1.0$ koşulunu sağlanmalıdır [47].

İşletme koşulu borunun işletmeye alınma safhasından itibaren başlar ve borunun ekonomik ömrü ile ilişkilidir. Bu stabilite koşulunda, boru iletilecek akışkan ile dolu olduğundan (gaz, su, petrol vb) işletme basıncının tasarımıdaki değerinde olduğu varsayılır.

İşletme aşaması boyunca boru yer değiştirmelere, basınç/çekme gibi iç kuvvetlere ve dalga/akıntı gibi dış kuvvetlere maruz kalabilir. Borunun fırtına durumlarında bile bu kuvvetlerin etkisi altında, tasarımıda belirlenen denge koşullarını sağlaması gerekir. Dalga ve akıntının birleşik etkisi altında, limit durumun aşılma olasılığı 10^{-2} /yıl düzeyinde kalması beklenir.

Çevre koşullarının (akıntı ve dalga) etkileri Bölüm 2.2.2. de verilen koşullar göz önüne alınarak işletme aşamasında değerlendirilmelidir.

4.4.2. Analiz yöntemleri

Boruların limit durum analizi için kullanılabilecek çeşitli yöntemler mevcuttur [48]:

- Dinamik Analiz
- Genelleştirilmiş Analiz
- Basitleştirilmiş Analiz

Dinamik Analiz deniz tabanındaki borunun zemin direnci, hidrodinamik kuvvetler, sınır koşulları ve dinamik tepki dâhil olmak üzere tüm dinamik kuvvetlerini içerir.

Genelleştirilmiş Stabilite Analizi; Dinamik Analizden elde edilen boyutsuz eğrilerin kullanılmasıdır.

Basitleştirilmiş Stabilité Analizi boru üzerine etkiyen kuvvetlerin yarı statik dengesi ile ilişkilidir. Genelleştirilmiş Analiz Yöntemi ile kalibre edilmesi gerekir.

Eğer boru kısmen gömülü ise (denge durumundaki boru) stabilité tasarımında, stabilitenin hesaplanması için aşağıdaki girdi parametrelerinin göz önüne alınması gerekir.

- Kullanılacak metot sadece statik değerlendirmeye tabii tutulabilir. (Borunun patlaması gibi koşullar değerlendirmeye alınmaz)
- Dalgadan dolayı oluşan hızın 100 yıllık yinelenme dönemine bağlı değeri, hidrodinamik kuvvetlerde kullanılmalıdır.
- Zemin direnci ve zemin ile boru arasındaki etkileşim değerleri saha çalışması gözetilerek gerçekçi şekilde değerlendirilmelidir.

4.4.3. Batma/askıda kalma durumu

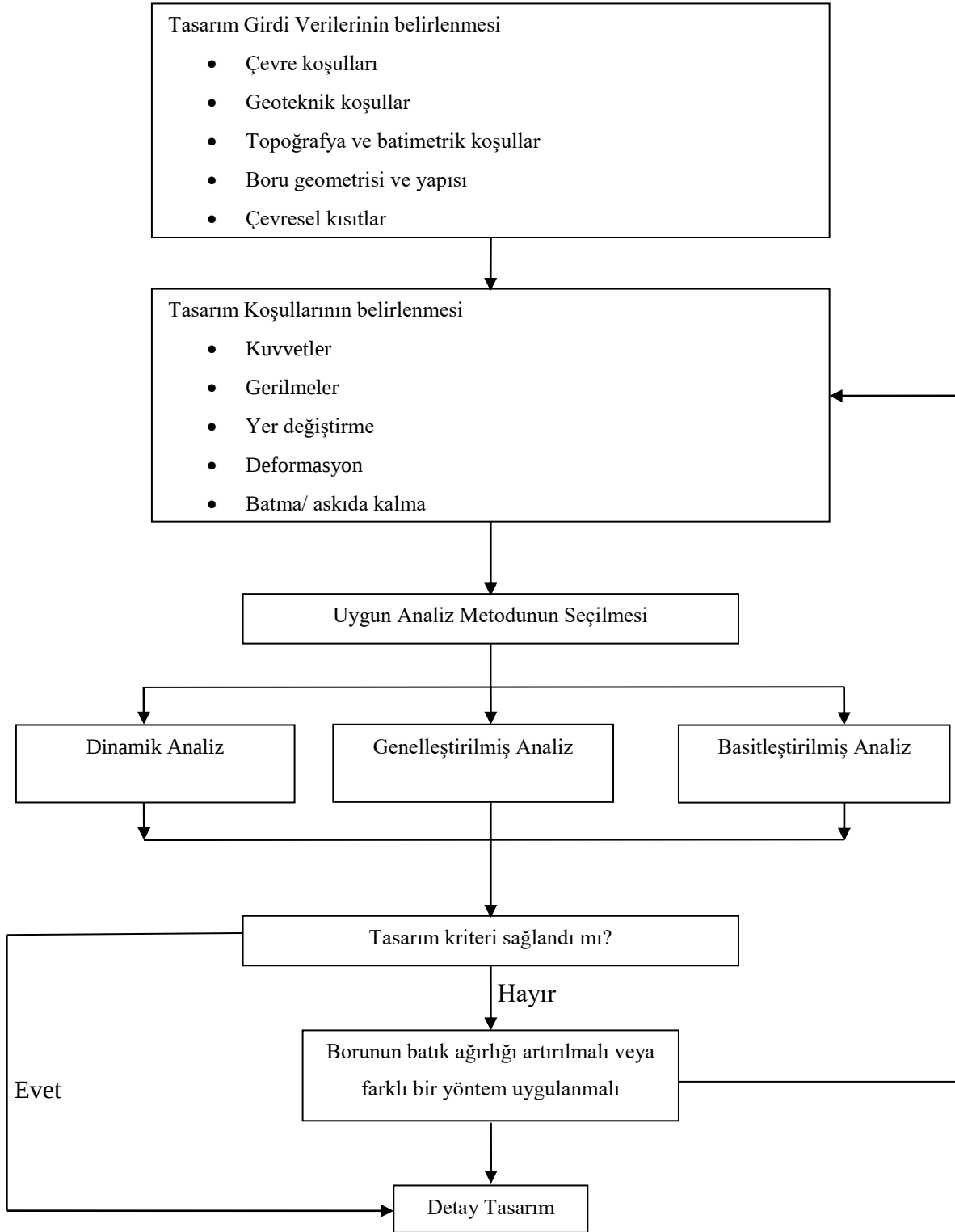
Hem sıvılar hem gazlar için boruların batma ve askıda kalma olasılığı değerlendirilmelidir. Batma durumunda borunun su ile dolu olduğu, askıda kalma durumunda ise borunun hava veya gaz ile dolu olduğu tasarımda varsayılır [49].

Eğer su ile doldurulmuş borunun ağırlığı zeminin taşıma kapasitesinden az ise batma analizi yapmaya gerek yoktur. Eğer zemin sıvılaşmaya meyilli ise, sıvılaşma derinliği göz önüne alınmalıdır.

Gaz ile doldurulmuş borunun ağırlığı, askıda kalma durumu ve zemin mukavemeti gözetilerek gömülmesini gerektirebilir.

4.4.4. DNV tasarım akış diyagramı

Aşağıdaki akış diyagramında, DNV standardında sunulan genel tasarım akış diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.6. Tasarımın genel akış şeması

4.5. Tasarım Kriterleri

Stabilite için kullanılacak tasarım kriterleri bir önceki bölümde anlatılmıştı. Bu bölümde çeşitli durumlara bağlı olarak değişebilecek durumların göz önüne alınması gereken bölgeler üzerinde durulacaktır. Aşağıda sıralanacak olan her bir adımın olası bir failure mekanizması dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.

Verilen bilgilerin tasarım kriterleri açısından genel anlamda değerlendirilmeli. Belirli kriterler olay bazında göz önüne alınmalıdır.

Aşağıda sunulan tasarım kıstasları önceki bölümde tanımlanan tasarım kriterleri ile ilgili olmuş olup genel bilgi edinmek amacıyla verilmiştir.

Bölge 1: Platformdan veya deniz gabarisinden belli bir uzaklıktan fazla olan yeri tespit edilmiş bir deniz tabanının (Genel olarak 500m alınır)

Bölge 2: Platformdan veya deniz gabarisinden daha yakın olan yeri tespit edilmiş bir deniz tabanının (Genel olarak 500m alınır)

Bu amaçla stabilize koşullarının temel ilkeleri, örneğin valve bağlantıları, boru geçiş hattı, genişleme dirseği gibi yerlerde Bölge 1 olarak düşünülmelidir. Bununla beraber, Bölge 2 tanımı normalde insan hayatını tehlikeye atabilecek olası potansiyel durumlarda, önemli ölçüde kirlilik veya kayda değer ekonomik sonuçlar için uygulanır.

4.5.1. Yatay yer değiştirme

İzin verilebilir yer değiştirme çeşitli parametrelere bağlıdır [50]:

- Yerel standart ve uygulama yönetmelikleri
- Deniz tabanı şekilleri
- Saha çalışması koridor genişliği
- Sabitleme blokları ve kıyı deşarj ünitesi mesafesi

İzin verilen yer değiştirmenin miktarı, boru koridor genişliğinin yarısından fazla olmamalıdır. Yerel standart ve uygulama yönetmelikleri gözetilmelidir.

5. BORU TASARIMI LİMİT DURUM FONKSİYONLARI

5.1. Yatay Limit Durum Fonksiyonu

Limit durum fonksiyonu yapının denge durumunu ifade eder. (neden ayrı bir bölüm diye not geçilmiş) Limit durum fonksiyonunun altında kalan alan yapı için güvenilir olmayan durumu ifade eder [51]. Rastsal değişkenler $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ şeklinde tanımlanırsa, yapının performansını gösteren limit durum fonksiyon $g(X)$ şeklinde gösterilir. Bu fonksiyonun üç olası durumu aşağıda tanımlanmıştır:

$$Z = g(X) > 0 \quad (5.1)$$

$$Z = g(X) = 0 \quad (5.2)$$

$$Z = g(X) < 0 \quad (5.3)$$

Eşitlik (5.1) yapının güvenilir olduğunu belirtir. Eşitlik (5.2) yapının limit durumunda olduğunu ifade eder. Eşitlik (5.3) ise yapıda hasar veya göçme olduğunu gösterir [52]. Limit durum (performans) fonksiyonu yapının yük kapasitesi (dayanım) ile (C) dış yükler (etki eden kuvvetler) arasındaki fark olarak tanımlanabilir.

$$Z = C - L \quad (5.4)$$

Burada Z yapının performans fonksiyonu; C yapının yükleme kapasitesi; L dış yüklerdir. Limit durum fonksiyonunda borunun yatay ve düşey dengesi, deniz tabanında bulunan boruya etkiyen kuvvetler dengesi ile elde edilir [53]. Eşitlik (5.4)'ün düzenlenmesiyle Eşitlik (5.5) yazılabilir:

$$Z_L = 1 - F_w \left(\frac{F_D + F_I + \mu F_L}{\mu W_s + F_R} \right) \quad (5.5)$$

F_w Değeri KC sayısına bağlıdır ve Şekil 3.26.'dan KC değerine karşılık gelen M (akıntı hızının dalga hızına oranı) değerine karşılık kalibrasyon katsayısı olarak elde edilir [54].

Pik (en uç değer) kuvvetleri F_Y (yatay) ve F_Z (düşey) olmak üzere gömülü boru tasarımında Eşitlik 5.6 kullanılır.

$$Z_L = \gamma_{sc} \cdot \frac{F_Y + \mu \cdot F_Z}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1.0 \quad (5.6)$$

5.2. Düşey Limit Durum Fonksiyonu

W_s : batık ağırlık (su altındaki ağırlık),

F_L : kaldırma kuvveti olmak üzere borunun düşeydeki dengesi ise:

$$Z_V = \gamma_{sc} \cdot \frac{F_L}{w_s} \leq 1.0 \quad (5.7)$$

koşulunu sağlamalıdır.

F_Z düşey yöndeki pik (en uç değer) kuvveti olmak üzere gömülü borunun düşeydeki dengesi için Eşitlik 5.8 kullanılır.

$$Z_V = \gamma_{sc} \cdot \frac{F_Z}{w_s} \leq 1.0 \quad (5.8)$$

6. MONTE CARLO BENZEŞİMİ (MCB)

6.1. Model Oluşturma ve Monte Carlo Risk Analizini Genel Bakış

Monte Carlo Benzeşimi (MCB) hesap tablosunda oluşturulan çalışmaları analiz etmeye, karar vermeye yardımcı olan bir simülasyon aracıdır. Bu benzeşim yöntemi risk analizi ve tahmini yapmayı sağlar.

Benzeşimin temel üç kullanımı vardır;

1. Bilinmeyen bir durum için hesap tablo modeli oluşturmak (tanımlamak)
2. Oluşturulan hesap tablosunu çalıştırmak
3. Sonuçları analiz etmek

6.1.1. Model oluşturma

Benzeşim hesap tablo modelleri, Microsoft Excel hesap tablo modelleri ile beraber çalışır. Hesap tablosu oluşturulan modelde girilen değerlerin ve çıkan değerlerin yorumlanmasında oldukça önemlidir. Bu modele girilen fonksiyonlar, formüller, ve veriler gibi değişkenler ile çıkan değerler arasındaki ilişkiyi irdelememizi sağlar.

6.1.2. Varsayım aralığı

Simülasyondaki deterministik olmayan her bir değer için bir olasılık dağılımıyla beraber olası değerler tanımlanabilir. Simülasyon bir model için olasılık dağılımından çok sayıda senaryolar üreterek her bir hücre için varsayımımıza ve verdiğimiz aralıklara göre değişkenlik gösterir.

6.1.3. Tahmin aralığı

Üretilen her bir senaryo verdiğimiz aralıklara göre tahmin değerleri oluşturur ve girdilerin değişim aralığına bağlı olarak tahmin değerleri bu aralıkların dışına çıkmaz.

6.1.4. Analizin kesinliği

Tahmin sonuçlarından elde edilen farklı sonuçlar her bir tahmin için rastsal değışimi gösterir ve olasılık dağılımından sabit bir olasılık değeri için benzeşim sayısı kadar elde edilir.

Tahmin değerin değeri $-\infty$ ile $+\infty$ arasındadır. Belirli bir risk aralığı tahmini istendiğinde değışkenlerin değeri yerine yazılarak aralığı sağlayan risk belirlenir.

6.1.5. Kullanımı

Monte Carlo Simölasyonu 3 tekrarlı aşamadan oluşur. Her bir simölasyon denemesinde, simölasyonda aşğıdaki üç adım tekrar eder.

- 1) Hesap tablosunda tanımladığımız hücrenin olasılık dağılımına ve verdiğimiz aralıklara bağlı olarak rastsal sayılar üretilir.
- 2) Hesap tablosu yeniden hesaplanır.
- 3) Her bir hücredeki değeri tahmin penceresinde istatistiksel sonuçlar şeklinde raporlanır.

Simölasyon istenilen limit değere (örneğin 10000, 100000) ulaştığında durdurulur.

6.2. Modelin Varsayım Tanımları

Hücre tanımları ve olasılık dağılımı çeşitleri aşğıdaki şekilde tanımlanır:

6.2.1. Veri hücrelerinin tipleri

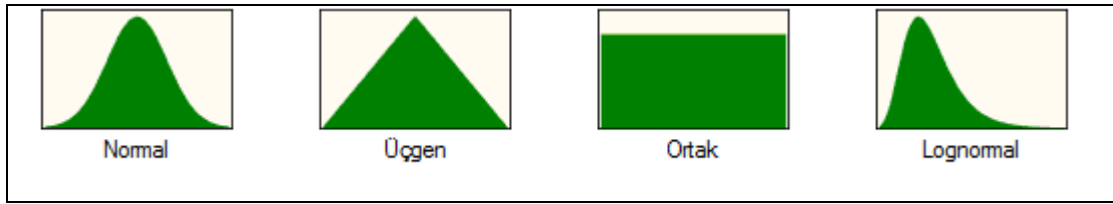
Üç farklı veri hücre çeşidi girdi ve çıktı olarak kullanır:

- Varsayım hücreleri rastsal girdi değeri içerir. Bu varsayım hücreleri sayısal değeri alır.
- Karar değeri hücreleri kontrollü değıştırilen girdi değeri içerir. Karar değeri hücreleri sayısaldır.

- Tahmin hücreleri (bağımlı değişkenler) bir veya daha fazla varsayım içeren çıktı hücreleridir. Tahmin hücreleri varsayım içindeki değerleri ve karar değişkenleri gibi değerleri hesaplar, denklemler ve formüller içerebilir.

6.2.2. Olasılık dağılımları

Simülasyondaki bilinmeyen her bir değer için veya varsayım olarak tanımlanan değer için olası dağılımlara uyup uymadığıyla ilgili olarak olasılık dağılımı tanımlanır. En yaygın dağılımlar; normal, üçgen, uniform, log-normal dağılımlardır (Şekil 6.1).

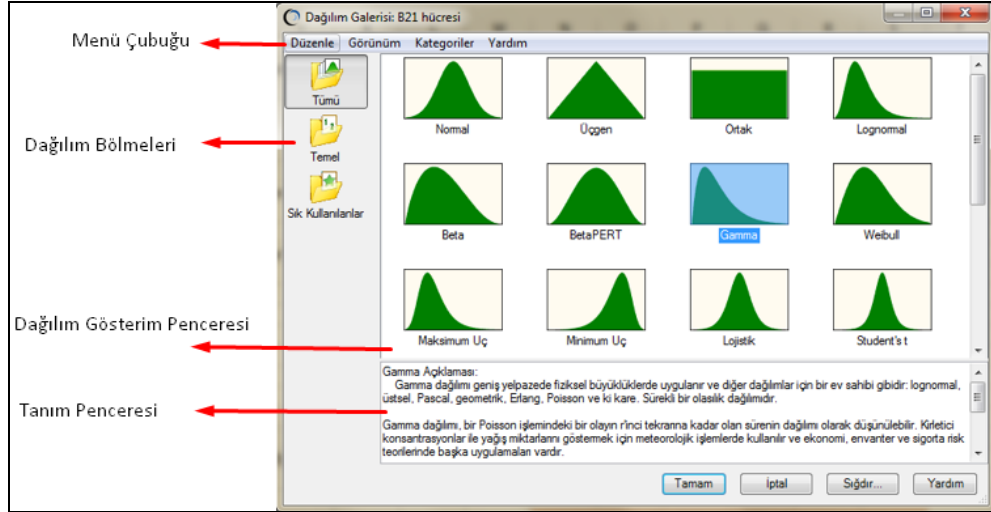


Şekil 6.1. En yaygın olasılık dağılımları (olasılık yoğunluk fonksiyonu)

- Varsayımların tanımlanması

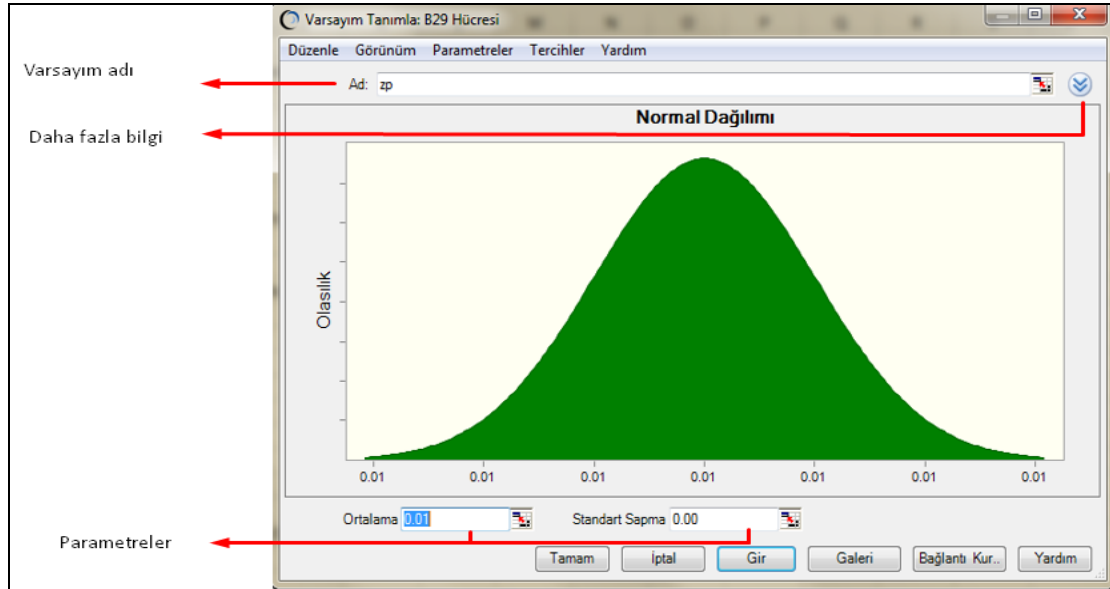
Bir varsayımı tanımlamak için; bilinmeyen her bir değişken için en uygun dağılım seçilir.

- 1) Hücre veya hücrelerin aralığı seçilir. Hücrelerin sayısal değerleri varsayıma dâhil edilebilir.
- 2) Varsayım için uygun olasılık dağılımı seçilir. Bunun için kullanılan programın, örneğin Crystall Ball, Olasılık Dağılım Galerisi kullanılabilir (Şekil 6.2).

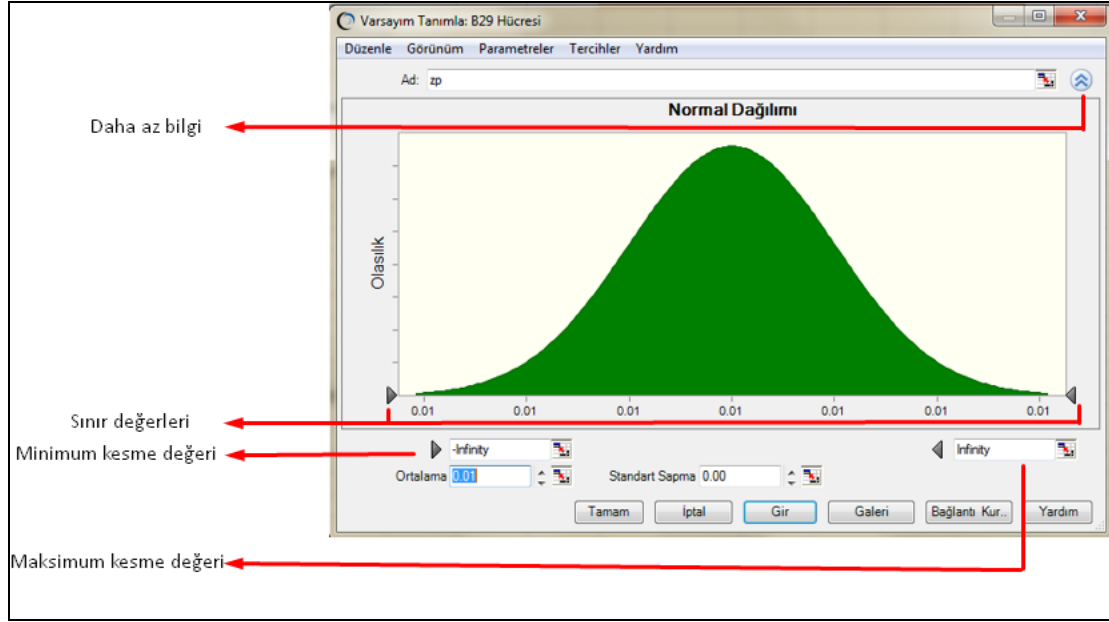


Şekil 6.2. Benzeşimde kullanılabilen olasılık yoğunluk fonksiyon galerisi

3) Dağılım seçildikten sonra dağılım parametreleri, en büyük ve en küçük değerler tanımlanır, böylece prototip koşullarını yansıtan gerçekçi olasılık aralığı benzeşimde tanımlanmış olur. Sınır değerler sekmesi de bu işlem için kullanılabilir (Şekil 6.3 ve 6.4).



Şekil 6.3. Seçilen dağılım ve temel parametrelerin gösterimi



Şekil 6.4. Varsayım penceresinin genişletilmesi

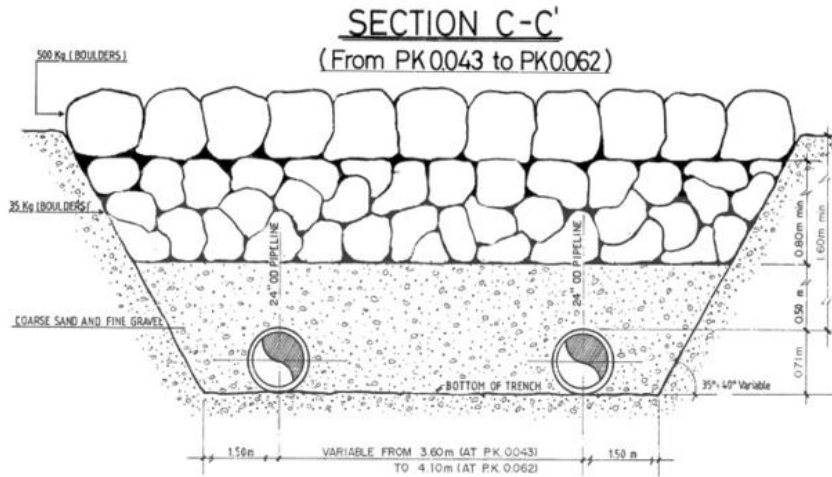
7. SAHA UYGULAMASI

Uygulamada BOTAŞ boru hattı değerleri kullanılmıştır. Antiseptik kaplama olarak Nikel kabul edilmiştir.

Bu değerleri kullanarak Excell tablosunda deterministik tasarım uygulaması hazırlanmıştır. Aynı Excel üzerinde Monte Carlo Tasarım programı geliştirilmiş ve ekte sunulmuştur.

Özata Tersanesi deniz yöresinin saha ile ilişkin bilgiler: çalışma alanının meteorolojik özellikleri ve rüzgâr iklimi, çalışma alanının dalga ve akıntı iklimi, vaziyet planı sırasıyla EK-3, EK-4 ve EK-5’da verilmiştir.

Boru Hattı	Uzunluk (m)	Çap ve kalite	Et kalınlığı (mm)	Su derinliği (m)	İşletmeye alma tarihi	Giriş Çıkış Noktaları	Korunma Şekli	Dış Kaplama Özelliği	Çalışma Basıncı
Muallim-Hersek									
Doğu	6.220	24" API 5L X65	14,3	0-62,5	1987	Giriş: Muallim-Çıkış: Hersek	Katotlama akımı	54,5 mm beton kaplama	Maop 75 barg, ortalama basınç 65-60 barg
Batı	6.225								



Şekil 7.1. BOTAŞ boru hattı ve özellikleri (BOTAŞ)

(a) Dalga Karakteristikleri		
Dalga Periyodu (T)		9.0 s
Su Derinliği (d)		50 m
Dalga Boyu (L)		125 m
Dalga Yüksekliği (H)		1.7–3.8 m değişken
(b) Zemin Karakteristikleri		
Ortalama tane çapı (d_{50})		0.38 mm
Birim ağırlık (γ)		$0.9 \times 10^3 \text{ N/m}^3$
Rölatif Yoğunluk (D_r)		0.37
(c) Boru Karakteristikleri		
Borunun iç çapı (D_i)		0.36 m
Çelik boru duvarı kalınlığı (t_{st})		0.01 m
Antiseptik kaplamanın kalınlığı (t_{ac})		0.005 m
Çelik boru duvarı yoğunluğu (ρ_{st})		$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Taşınan malzemenin yoğunluğu, örnek: ham petrol (ρ_i)		$0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Deniz suyu yoğunluğu (ρ_w)		$1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Beton kaplama yoğunluğu (ρ_c)		$2.40 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

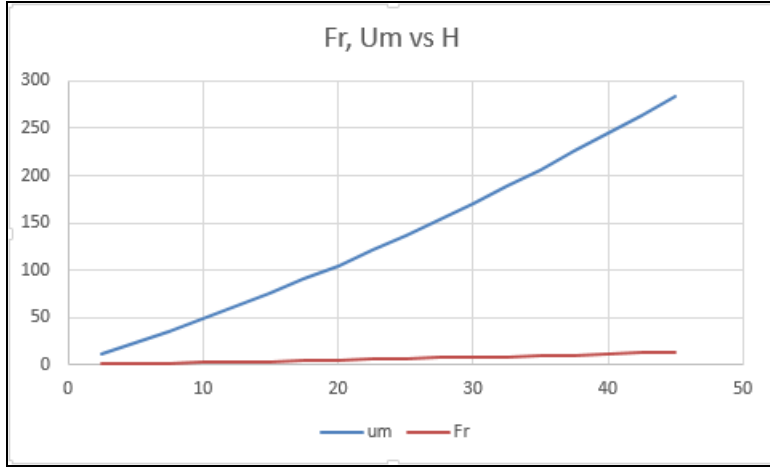
Şekil 7.2. Örnek boru özellikleri

Çizelge 7.1. Excel tablosu

D' (m)	T (sn)	H (m)	Z (m)	Um1 (m/s)	Um2 (m/s)	Um1+Um2 (m/s)	Froude Number	D' (m)	Ws (kN/m)	D2 (m2)	D (m)	D-D' /D
0,15	9	2,5	49,85	10,75042	0,3334	11,08382	0,50121284	150	48,33285	0,058036	0,240906	0,37735
0,2		2,5	49,8	10,72345	0,331729	11,05518	0,50016864	200	66,16785	0,080139	0,283089	0,293508
0,25	d(m)	2,5	49,75	10,69655	0,330066	11,02661	0,49912695	250	84,00285	0,105127	0,324232	0,228948
0,3	50	2,5	49,7	10,66971	0,328411	10,99812	0,49808778	300	101,8379	0,132997	0,364688	0,177379
0,35		2,5	49,65	10,64295	0,326765	10,96971	0,49705112	350	119,6729	0,163751	0,404662	0,135081
0,4	L(m)	2,5	49,6	10,61625	0,325127	10,94137	0,49601695	400	137,5079	0,197389	0,444285	0,099677
0,45	125	2,5	49,55	10,58961	0,323498	10,91311	0,49498528	450	155,3429	0,23391	0,483643	0,069561
0,5		2,5	49,5	10,56305	0,321876	10,88493	0,4939561	500	173,1779	0,273315	0,522795	0,043603
0,55		2,5	49,45	10,53655	0,320263	10,85681	0,49292939	550	191,0129	0,315603	0,561786	0,020979
0,6		2,5	49,4	10,51012	0,318658	10,82878	0,49190517	600	208,8479	0,360775	0,600645	0,001075
0,65		2,5	49,35	10,48375	0,31706	10,80081	0,49088341	650	226,6829	0,40883	0,639398	0,016581
0,7	k	2,5	49,3	10,45745	0,315471	10,77292	0,48986411	700	244,5179	0,459769	0,678063	0,032353
0,75	0,05024	2,5	49,25	10,43122	0,31389	10,74511	0,48884727	750	262,3529	0,513591	0,716653	0,046532
0,8		2,5	49,2	10,40505	0,312317	10,71737	0,48783288	800	280,1879	0,570297	0,75518	0,05935
0,85		2,5	49,15	10,37895	0,310751	10,6897	0,48682093	850	298,0229	0,629886	0,793654	0,070996
0,9		2,5	49,1	10,35291	0,309193	10,66211	0,48581143	900	315,8579	0,692359	0,832081	0,081626
0,95		2,5	49,05	10,32694	0,307644	10,63458	0,48480435	950	333,6929	0,757715	0,870468	0,091367
1		2,5	49	10,30103	0,306102	10,60714	0,4837997	1000	351,5279	0,825955	0,90882	0,100327

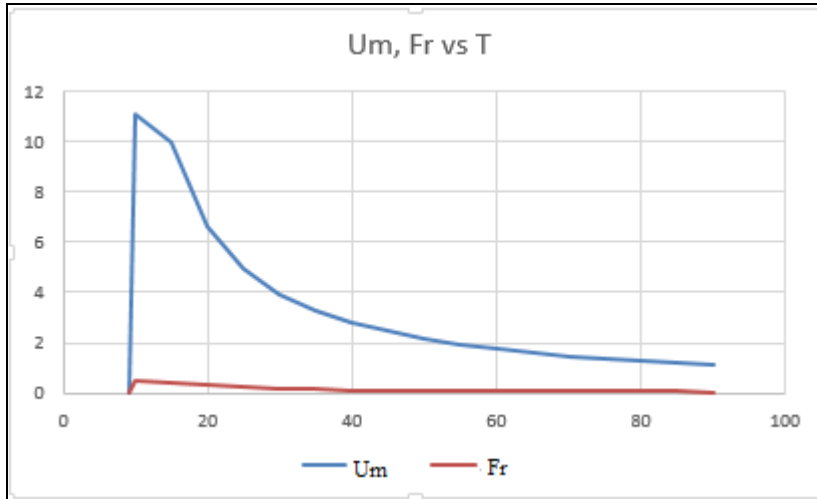
Dalga yüksekliği ve dalga periyodu değerlerinde artış veya azalmaya bağlı olarak deterministik tasarım değişkenlerindeki değişimler elde edilmiştir.

Dalga Yüksekliği: Dalga yüksekliğinde değişkenlik tasarımı etkiler. Bu tasarımda en çok etkilenen parametreler Froude numarası ve dalga parçacık hızıdır. Bu parametrelerdeki değişim Şekil 7.3'te sunulmaktadır.



Şekil 7.3. Dalganın yüksekliğinin tasarıma olan etki grafiği

Dalga Periyodu: Dalga periyodunda ise dalga yüksekliğine zıt olarak parçacık hızı ve Froude numarası arasında ters bir orantı vardır. Yani dalga periyodu artış gösterdiğinde diğer parametreler azalır. Bu değişim aşağıda grafikte de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Dalganın periyodu değişiklik grafiği

Borunun İçindeki Malzeme: Borunun içinde taşınan malzemenin değişmesi durumunda elde edilecek çapın değerleri de değişecektir. Eğer borunun içindeki malzemenin yoğunluğu artarsa elde edilecek çap azalacaktır. Eğer malzemenin yoğunluğu azalırsa çapın değeri artacaktır.

Antiseptik Kaplama: Antiseptik kaplamanın yoğunluğunun değişmesi de borunun içindeki malzemeye zıt olarak çap ile doğru orantılı haldedir. Yani malzemenin yoğunluğu azalırsa çap da azalacaktır. Eğer malzemenin yoğunluğu artarsa çap da artardır.

Et Kalınlığı: Et kalınlığının arttığında çapta azalma meydana gelmektedir.

Kararlı akış durumunda akıntı hesabı: Kararlı akım koşullarında akıntı hızının hesaplanmasında bölüm 3.1.2 ile ilişkilidir. Çizelge 3.1’de verilen deniz tabanı malzemesine bağlı olarak d_{50} değerine karşılık gelen zemin pürüzlülük katsayısı z_0 değeri Çizelge 3.1’den elde edilir. Çapı ve referans hızı belli olan boruya etkileyen akıntı hızı;

$$V(z) = V(z_r) \left(\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right) \sin \theta_c \text{ denkleminde elde edilmiştir.}$$

Örneğin boru çapı 0.5 metre, referans hızı 1 m/sn, referans derinliği 5 metre, deniz tabanı malzemesinin iri kum olduğu şartlarda akıntı hızı 0.7 m/sn olarak bulunmuş olunur. Açı değeri 90 derece olarak alınmıştır.

Akıntı ve dalga etkisi bir arada hesaplandığında:

Akıntı ve dalga etkisinin bir arada çözümlenmesi Bölüm 3.1.3’te verilmişti. Buna göre deniz tabanı zemininin orta kum, referans derinliği 3m, referans hızı 3m/sn, açı 21 derece ve boru çapının 0.25 ile 1.75 m arasındaki değişimine karşılık borunun tam ortasına etkileyen akıntı hızının değişimi Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Farklı boru çaplarına karşılık gelen akıntı hızı değerleri

D (m)	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.5	1.75
V(z) (m/s)	0.74	0.81	0.84	0.87	0.89	0.91	0.93

Dalga parçacık hızı hesabı: Dalga parçacık hızının hesaplanması Bölüm 3.1.4’te anlatılmıştı. Buna göre: Dalga periyodunun 9s, su derinliğinin 50m, dalga uzunluğunun

125m ve dalga yüksekliklerinin 1.7 ile 3.8 m arasındaki değişen dalga parçacığının maksimum hızı değerleri (Le Mehaute (1976) tarafından önerilen ikinci dereceden Stokes teorisi kullanılmıştır) Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Farklı dalga yüksekliklerine karşılık gelen dalga parçacık hızı değerleri

H (m)	1.7	2.1	2.4	2.8	3.1	3.4	3.8
U_m (m/s)	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55

Basitleştirilmiş ve genelleştirilmiş analiz kullanılarak boru batık ağırlık hesabı: Boru tasarım parametreleri:

Çelik boru dış çapı,	$D_s=0.4064m$
Boru kalınlığı,	$t_s=0.0127m$
Boru iç çapı,	$D_i=0.3810m$
Kaplama kalınlığı,	$t_{cc}=0.05m$
Korozyona karşı kaplama kalınlığı yoğunluğu,	$\rho_{cc} =1300kg/m^3$
Beton kaplama yoğunluğu,	$\rho_c =2400kg/m^3$
Boru içerisindeki içeriğin yoğunluğu,	$\rho_i =10kg/m^3$
Deniz suyunun yoğunluğu,	$\rho_w =1025kg/m^3$
Çeliğin yoğunluğu,	$\rho_{st} =7850kg/m^3$
Zemin tipi: orta kum,	$\rho_s =1860kg/m^3$
Çevresel veriler:	
Belirgin dalga yüksekliği,	$H_S=14.5 m$
Spektral pik periyot,	$T_P=14.5 s$
Su derinliği,	$d=110m$
Deniz tabanından 3m yükseklikteki akıntının hızı,	$U_r =0.6m/s$

Basitleştirilmiş metot ile su parçacığı hizinin bulunması;

$$T_n=\sqrt{(d/g)}= \sqrt{(110/9.81)} = 3.348$$

$$T_n/T_p =3.348/15= 0.223$$

Şekil 4.4 kullanılarak T_u (yukarı kesme) periyot $T_u/T_p =1.06$ elde edilir.

Buradan $T_u = 16.05s$ sonucu elde edilir. Şekil 4.3'ten $U_s = 0.606$ m/s olarak bulunur.

Yön ve yayılma faktörü 1 olarak kabul edildiğinden azaltma yapılmadan $U_r = 1 * U_s = 0.606$ m/s olarak bulunur (Şekil 4.5).

$Z_r = 3m$, $U_r = 0.606$, $T_u = 16.05s$

Çizelge 3.1'den $d_{50} = 0.5mm$, $z_0 = 4.17E-5$ m

$D/z_0 = 11990$ ve $z_r/z_0 = 71942$ olur.

$\frac{U_D}{U_r} = \frac{1}{\ln(z_r/z_0 + 1)} \{ [1 + z_0/D] \ln[D/z_0 + 1] - 1 \}$ eşitliğinden boru eksenine etkiyen hız

$U_D = 0.45m/s$ olarak elde edilir.

Basitleştirilmiş statik analiz kullanılarak batık ağırlığının hesaplanması;

Orta kumun sürtünme katsayısı $\mu = 0.7$ olarak alınır.

$C_L = 0.9$, $C_D = 0.7$, $C_M = 3.29$ ve borunun yaklaşık çapı $D = 0.5m$ olarak alındığında, $A_s = 2\pi U_s/T_u = 2\pi * 0.606/16.05 = 0.2372m/s^2$ elde edilir (significant acceleration).

Hızların (akıntı hızı/ dalga hızı) oranı $M = U_D/U_s = 0.45/0.606 = 0.75$

Kuelegan Carpenter sayısı $K = (U_s T_p)/D = (U_m T_p)/D = (0.606 * 16.05)/0.5 = 19.45$ elde edilir.

Şekil 3.26'dan güvenlik katsayısı $F_w = \gamma_{sc} = 1.25$ olarak elde edilmiştir.

Açı 21 derece alınarak hidrodinamik kuvvetler aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$F_L = 237,9$ N/m, $F_D = 185.1$ N/m ve $F_I = 56.4$ N/m

Hidrodinamik kuvvetler elde edildikten sonra borunun batık ağırlık hesabı için

$W_s = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu F_L}{\mu} \right]_{\max} F_w$ denklemi kullanılarak hesaplanır. Buradan boru batık

ağırlığı, $W_s = 728.75 \text{ N/m}$ olarak elde edilir. Buna göre batık ağırlık minimum 728.75 N/m olmalıdır.

Genelleştirilmiş methodtan değerlerin revize edilmesi;

$W_s = 728.75 \text{ N/m}$, $D = 0.5 \text{ m}$ (borunun dış çapının başlangıç değeri)

Bu durumda boru çapının batık ağırlığa karşılık değeri kontrol aşağıdaki formülle kontrol edilir.

$$D^2 = \frac{1}{\rho_c - \rho_w} \left[\frac{W_s}{0.25\pi g} + D_i^2(\rho_{st} - \rho_i) + D_s^2(\rho_{cc} - \rho_{st}) + D_{cc}^2(\rho_c - \rho_{cc}) \right]$$

Bu eşitlikten $D = 0.5 \text{ m}$ olarak hesaplanmıştır.

$K = (U_s T_p)/D = (U_m T_p)/D = (0.606 * 16.05)/0.5$, $M = U_D/U_S = 0.45/0.606 = 0.75$, $T = T_L/T_u = (3 * 60 * 60)/16.05 = 672.90$ (3 saatlik fırtına süresi)

Hedef yer değiştirme 10 m seçilirse; $\delta = \text{yerdeğitirme}/\text{çap}$, $10/0.5 = 20$ elde edilir.

$\delta = 20$, $T = 672.90$ olduğundan Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 kullanılarak iki grafik arasında interpolasyon yapılarak boru ağırlık parametresi belirlenir.

$\delta = 20$, $T = 500$ için $\sqrt{L} = 2.65$
 $\delta = 20$, $T = 1000$ için $\sqrt{L} = 2.85$

} Bu değerler arasında interpolasyon yapılarak $\sqrt{L} = 2.72$

$W_s = L \cdot 0.5 \rho_w D U_s^2$ eşitliğinden $W_s = 7.40 * 0.5 * 1025 * 0.5 * (0.606)^2 = 696.4 \text{ N/m}$ elde edilir.

Bu durumda borunun yeni (nihai) çapı:

$$D^2 = \frac{1}{\rho_c - \rho_w} \left[\frac{W_s}{0.25\pi g} + D_i^2(\rho_{st} - \rho_i) + D_s^2(\rho_{cc} - \rho_{st}) + D_{cc}^2(\rho_c - \rho_{cc}) \right] \quad \text{denklemden}$$

D=0.497m olarak elde edilmiş olunur (%0.6lık fark 0.50m ye göre).

Bu saha uygulamasında, boru tasarımı ve risk analizi geliştirilen Excel dokümanı ile gerçekleştirilmiştir. Boru için önemli olan çevresel koşullar, dönüş periyodu; geoteknik, topoğrafya ve batimetri koşulları, borunun karakteristik özellikleri kullanılarak tasarıma yansıtılmıştır. Risk analizi tasarımın duyarlılık grafikleri ve senaryo analizleri ile detaylandırılmıştır.

Boru tasarımının temel değişkenleri yük ve dayanım şeklinde sınıflandırılarak (kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, atalet kuvveti, pasif zemin direnç kuvveti, boru batık ağırlığı vb.) askıda kalma ve yüzme durumuna göre risk analizi yapılmıştır.

Tasarım değişkenleri borunun geometrik özellikleri (boru çapı, borunun yapıldığı malzeme, beton kaplama kalınlığı vb.), izin verilen yer değiştirme miktarına bağlı olarak bulunmaktadır. Akıntı hızının değişimine bağlı olarak boru eksenine dik etkiyen akıntı bileşeninin; kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi, sürüklenme kuvveti üzerindeki etkisi, atalet kuvveti üzerindeki etkisi, KC sabiti üzerindeki etkisi, boru batık ağırlığı üzerindeki etkisi incelenmiş ve buna bağlı olarak akıntı hızı/dalga hızı oranına göre kalibrasyon katsayısının değişimi incelenmiştir. Buna benzer olarak dalga parçacık hızı için de aynı analizler yapılmıştır.

Benzer şekilde boru çapının değiştirilmesi sonucunda;

- Hidrodinamik kuvvetlerinin (atalet, kaldırma, sürüklenme) değişimi,
- Boru ile zemin arasındaki düşey kuvvet (F_c) ve sürtünme katsayısının μ (zeminin türüne bağlı olarak değişir.) F_c kuvveti ile çarpımı sonucunda elde edilen zemin pasif direnç kuvveti üzerindeki etkisi,
- Hidrodinamik kuvvetlerin, zemin pasif direnci değişimin borunun batık ağırlığa etkisi,
- Batık ağırlığının değişmesi sonucunda elde edilen risk değerleri elde edilmiştir.

Mühendislikte çoğunlukla kritik değerlere (en büyük dalga yüksekliği, borunun dayanabileceği maksimum basınç, borunun içinden geçen akışkan malzemenin hızı vb.)

göre tasarım yapıldığından en kritik tasarım açıktaki boruların tasarımı olarak değerlendirilmiştir.

Borunun zemin etkileşiminden dolayı yük azaltma (örneğin hendek yapılarak borunun gömülmesi) boru üzerindeki riski azalttığından; azaltma (reduction) katsayıları (geçirimlilik katsayısı, batma katsayısı, hendekten dolayı azaltma katsayısı) göz önüne alınarak risk üzerindeki değişim incelenmiştir.

Monte Carlo Benzeşimi kullanılarak yük durumları, yük durumlarını etkileyen parametreler, batık ağırlık ve batık ağırlığı etkileyen parametreler (kaldırma kuvveti, zeminin pasif direnci, sürüklenme kuvveti, vb.), borunun yanal ve düşey yer değiştirmelerine neden olabilecek temel parametreler (Kuelegan Carpenter sayısı, periyot, vb.) kullanılarak risk analizleri yapıldı. Her bir parametre için uygun olasılık dağılımı atanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Limit durum fonksiyonundaki her bir değişkene olasılık dağılımı atanarak istatistiksel model oluşturulmuştur (Şekil 7.5). Şekil 7.5.'de yeşil değerler: değişkenler yani olasılık dağılımı atanan değerler, mavi değerler: tahmin tanımlanması yapılan çıktı parametreleridir. Örnek bir çalışma olarak, $D = 0.5$ metre ve boru su ile doluyken gerçekleştirilen benzeşimler bu bölümde sunulmuştur.

Row	Column	Value/Formula	Description
4	CL	0.9	
5	Vs	0.7	
6	cosθ	1	
7	Vc	0.45	
8	Fd parameters		
9	Fd	$0.5 * pw * D * Cd * (((Vs * cosθ + Vc)^2 * 0.5) * (Vs * cosθ + Vc))$	Drag Force
10	Fi parameters		
11	Fi	$(pi * D^2 / 4) * pw * Cm * As * sinθ$	Inertial Force
12	As	0.2372	
13	sinθ	1	
14	Ks parameters		
15	Ks	$(ys * D^2) / Fc$	Constant
16	ys	11250	
17	Fc parameters		
18	Fc	ws-FL	Vertical Contact Force Between Pipeline and Soil
19	FR parameters		
20	FR	$Ks * (Zp/D)^{1.25}$	Passive Resistance of Soil
21	ysc	1.7	
22	μ	0.6	
23	ws parameters		
24	WT	1072.733	Steel Weight of Pipeline
25	Wc	224.5936	Coating Weight of Pipeline
26	Ws	1297.327	Submerged Weight of Pipeline
27	pconcrete	2400	
28	pwater	1025	
29	c	0.01	
30	zp	0.01	
31	ZL parameters		
32	ZL	$1 - ((ysc * ((Fd + Fi * μ * FL) / μ * ws + FR))$	The Limit State Function of Vertical Instability of Pipeline
33	ZL	0.20845	

Şekil 7.5. Benzeşimdeki temel varsayımlar ve tahminler

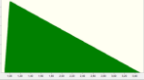
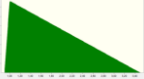
Yeşil değerler: kaldırma kuvveti katsayısı, dalga hızı, dalga geliş açısı, sürüklenme kuvveti katsayısı, atalet kuvveti katsayısı, belirgin ivme değeri, faz açısı, zemin batık birim ağırlığı, güvenlik katsayısı, zemin sürtünme katsayısı, boru et kalınlığı, çeliğin yoğunluğu, beton kaplama yoğunluğu, suyun yoğunluğu, kaplama kalınlığı, borunun zemine batma miktarı sırasıyla verilmiş olup girdi değerlerini göstermektedir. Her bir değişken için minimum, maksimum, ortalama değerler tanımlanmıştır. Minimum, ortalama ve maksimum değerler girildikten sonra program verilen aralıkta on bin adet değişken üretmiştir. Parametre değerlerinin çıktı değerleri benzeşim istatistiği çizelgelerinde ve senaryo analizlerinde verilmiştir.

Qiang Bai ve Yong Bai boru yerdeğiştirmenin, olası göçme ve çökmenin birinci dereceden güvenilirliğe (first order reliability) bağlı olarak belirlendiğini ispatlamışlardır ve modelleme çalışmalarında kesinlik içermeyen denizsel değişkenlerin dağılımları normal dağılıma uyduğu gözlemlenmişlerdir. Bu yüzden çoğunlukla (12 girdi değişken) normal dağılım seçilerek modelleme yapılmıştır. Üç değişkenin ortalama değerlerinin normal dağılımda ortalama değerine denk düşmediği gözlemlenmiştir. Bu değerlerin ortalama değerleri

düşük değerli tarafa daha yakın olduğu bu nedenle değişkenlerin dağılımı sola yatık üçgen olarak seçilmiştir. Geriye kalan diğer değişkenler ise eşitlikler kullanılarak girdi değerleri girilmiştir.

Deniz tabanına bulunan boruların tasarımında kullanılan katsayılar: kaldırma kuvveti katsayısı, sürüklenme kuvveti katsayısı, atalet kuvveti katsayısı değerleri, boru deniz tabanına oturduğu için potansiyel akım ilkesine göre değerler verilmiştir (Wilson ve Reid, 1963). Bu katsayılar aşağıdaki gibi verilmiştir.

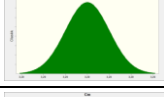
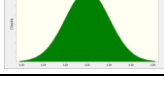
Çizelge 7.4. Kuvvet katsayıları girdi değerleri ve değişim katsayıları

Kuvvet katsayıları	Girdi değerleri	Değişkenlik katsayısı (%)	Dağılım Gösterimi
Kaldırma kuvveti katsayısı (C_L)	0.9	1.0	
Sürüklenme kuvveti katsayısı (C_D)	0.7	6.0	
Atalet kuvveti katsayısı (C_M)	3.29	50.0	

Girdi değerleri olarak girilen belirgin dalga ivmesi, akıntı hızı, dalga parçacık hızı değerleri ise sırasıyla Eşitlik 3.11, Eşitlik 3.6, Eşitlik 3.15 eşitliklerinden elde edilerek programa girdi olarak verilmiştir.

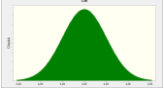
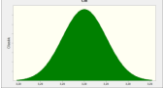
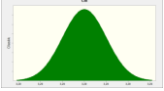
Borunun zemine batma miktarı: batma miktarı girdi değeri Bölüm 3.1.5'te verilen Eşitlik 3.18, Eşitlik 3.19 ve Eşitlik 3.21 eşitlikleri kullanılarak elde edilmiştir. Borunun çapı girdi değeri ise fabrikadan kaynaklı olabilecek hatalardan dolayı değişim minimum değeri 0.48 metre, ortalama değeri 0.5 metre ve maksimum değeri 0.52 olarak girilmiştir. Borunun kaplama kalınlığı değeri borudan kaynaklı olabilecek fabrika hatalarını önelemek için minimum değer 0.06 metre, ortalama değeri 0.01 metre ve maksimum değeri 0.014 metre olarak girilmiştir. Boru et kalınlığı girdi değerleri minimum 0.0063 metre, ortalama 0.01 metre ve maksimum değeri 0.0135 metre olarak girilmiştir. Girdi değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 7.5. Boru çapına bağlı girdi değerleri ve değişim katsayıları

Boru kaynaklı parametreler	Girdi değerleri	Değişkenlik katsayısı (%)	Dağılım Gösterimi
Boru çapı (D)	0.5	4	
Boru kaplama kalınlığı (c)	0.01	38	
Boru batma miktarı (Z _P)	0.01	38	
Boru et kalınlığı (t)	0.01	38	

Su yoğunluğu değişken girdi değeri: boruda taşınan suyun (sıcak su, tatlı su, tuzlu su) özelliklerine bağlı olduğundan yoğunluğunun değişmesine sebebiyet verir. Su yoğunluğunun minimum girdi değeri 993 kg/m^3 , ortalama değeri 1015 kg/m^3 , maksimum değeri 1025 kg/m^3 olarak girilmiştir. Çelik borunun yoğunluğu kullanılan malzemenin kalitesine bağlı olarak değişir. Çelik yoğunluğunun minimum girdi değeri 7071 kg/m^3 , ortalama değeri 7580 kg/m^3 , maksimum değeri 7850 kg/m^3 olarak atanmıştır. Beton kaplama kalınlığının yoğunluğu da kullanılan beton malzemenin kalitesine ve içerisinde bulunan (demirli, demirsiz) malzemeye bağlı olarak değiştiğinden: beton kaplama yoğunluğunun minimum girdi değeri 2271 kg/m^3 , ortalama değeri 2400 kg/m^3 , maksimum değeri 2518 kg/m^3 olarak atanmıştır. Sürtünme katsayısı değeri kumlu bir zemin düşünüldüğünde ortalama olarak 0.6 olarak alınır, fakat kumun türlerine göre ve zemin türüne göre de bu katsayı değiştiğinden: sürtünme katsayısının minimum girdi değeri 0.46, ortalama değeri 0.6, maksimum değeri 0.74 olarak atanmıştır. Bu değerlerin özetlenmiş hali aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

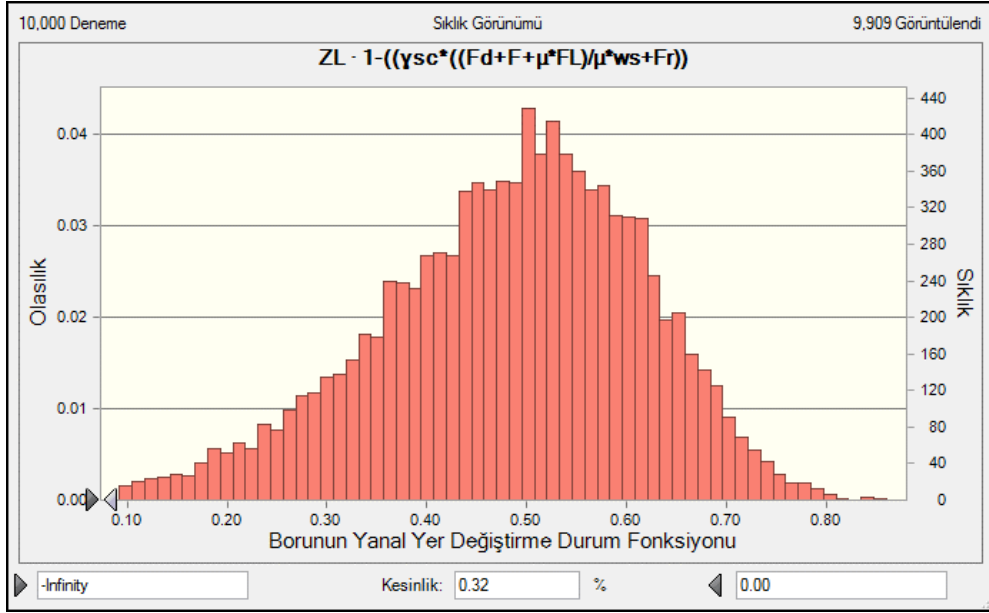
Çizelge 7.6. Malzeme yoğunlukları girdi değerleri ve değişim katsayıları

Malzeme yoğunlukları	Girdi değerleri	Değişkenlik katsayısı (%)	Dağılım gösterimi
Su yoğunluğu	1015	2.0	
Çelik yoğunluğu	7580	5.0	
Beton yoğunluğu	2400	5.0	

Zemin batık birim ağırlığı zeminin türüne göre bağlı olarak değiştiğinden kumlu zemin için zemin batık ağırlığının minimum değeri 10168 N/m³, ortalama değeri 11260 N/m³ ve maksimum değeri 11240 N/m³ olarak girilmiştir.

Belirsizlik faktörünün değeri mevsimsel ve bölgelere göre değişkenlik gösterdiğinden DNV standartlarında önerilen değerler alınmıştır. Belirsizlik faktörünün minimum değeri 1.0 ortalama değeri 1.27 ve maksimum değeri 1.60 olarak programa girdi olarak girilmiştir.

Buna göre yukarıda tanımlanan değerlere göre Z_L olasılık değeri (borunun limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı) %0.32 olarak belirlenmiştir. Sıklık (frekans) grafiğine bağlı istatistiksel değerler (ortalama, ortanca vb) Çizelge 7.2’de sunulmuştur.



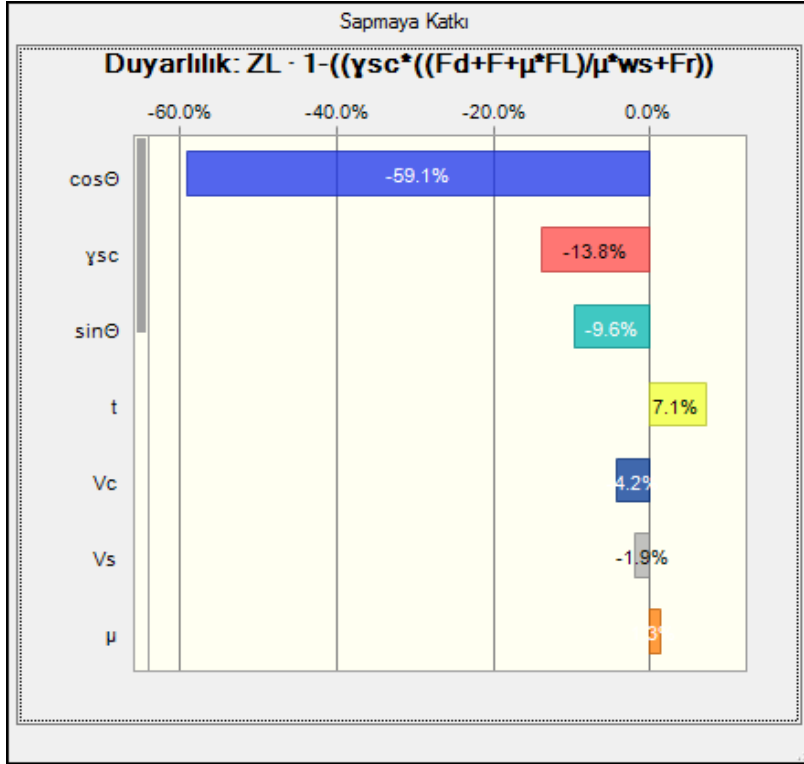
Şekil 7.6. Limit durum frekans dağılımına göre (Z_L) yıllık aşılma olasılığı (limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı) ($D=0.5m$ için)

Girdi parametrelerinin limit durum fonksiyonuna (Z_L) olan etkisi hassasiyet analizi olarak Şekil 7.7.'te verilmiştir. Z_L değeri en çok dalga ve akıntının geliş açısından ($D=0.5m$ boru çapı için) ve dalga faz açısından ters orantılı şekilde etkilenmekteyken, doğru orantılı şekilde en çok ts (çelik boru et kalınlığı) değerinden etkilenmektedir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir, dalga geliş açısı kuvvetler açısından önem arz etmektedir. Eşitliği

incelediğimizde;
$$Z_L = 1 - F_w \left(\frac{F_D + F_I + \mu F_L}{\mu W_s + F_R} \right)$$
 Z_L denkleminin içinde; sürüklenme kuvveti,

atalet kuvveti, kaldırma kuvveti Z_L fonksiyonunun bileşenidir. Her kuvvetin hesabında geliş açısı etkili olduğu ve açıya bağlı olarak kuvvetlerin sıfır olma olasılığı bulunduğu risk değeri açısı parametresinden ters orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir (Şekil 7.7.).

Kıyı mühendisliğinde dalga geliş ve faz açıları önemli bir yere sahiptir: Dalga tepesinde akıntı ve dalga aynı yönde bileşen oluştururken, dalga çukurunda ise akıntı ve dalga ters yönde bileşen oluşturur.



Şekil 7.7. Z_L Limit Durum Fonksiyonunun ters ve doğru orantılı şekilde etkileyen temel değişkenler ve değişkenliğe katkı yüzdeleri ($D= 0.5m$ için)

Şekil 7.7 incelendiğinde; dalga yaklaşım açısı ve dalga faz açısı değerlerinin (karşılıklı olarak kosinüs ve sinüs fonksiyonları) ters orantılı şekilde (sinüs için %59.1 ve kosinüs için %9.6) limit durum fonksiyonunu etkilediği görülmüştür. Değişkenliğe katkı yüzdeleri sıralandığında, güvenilirlik kalibrasyon katsayısının (Belirsizlik faktörü değeri) %13.8, akıntı hızının %4.2, dalga parçacık hızının %1.9 ters orantılı; zeminin sürtünme katsayısının %3 doğru orantılı şekilde limit durum fonksiyonunun değişkenliğini etkilediği gözlemlenmiştir.

Limit durum Fonksiyonunun benzeşim parametreleri ile istatistiksel benzeşim değerleri Çizelge 7.2.'de verilmiştir. Dağılım fonksiyonunun matematiksel ifade şekli (çıkarma veya bölme) benzeşim sonuçlarını güvenilirlik aralığı dâhilinde etkilemiştir. Prototip koşullarında ölçüm değerleri ile en az bir yıllık veriler için veya aynı koşullarda değişkenlerin hangi dağılıma uyduğunu belirlemek amacıyla stokastik (rastgele/olasılıksal) model sonuçları kullanılabilir. Bu saha uygulamasında çevresel koşullar (dalga ve rüzgâr istatistiği) Hydrotam-3D model sonuçlarından elde edilmiştir (EK-3 ve EK-4). Ekstrem değer olasılık dağılımları Ki-kare testi ile belirlenmiştir.

Aynı şekilde Normal ve Log-normal dağılımları ölçüm verileri ile belirlenebileceği gibi, akıntı modeli sonuçları kullanılarak da belirlenebilir. Yük veya dayanım değişkenlerinin sahaya özel ölçüm veya model sonuçlarının bulunmadığı durumda sınırlandırılmış Normal Dağılım ile modellenmesi önerilir (Yong Bai ve Qiang Bai, 2005: 686). Negatif değer almayan yük veya dayanım değişkenlerinde bu değerlerin benzeşimde oluşmaması için, olasılık yoğunluk fonksiyonunun altında kalan toplam alan bir olacak şekilde sınırlandırılması gerekir. Tasarım uygulamalarında, bu konuda deneyim sahibi olmayan mühendislerin genelde bu yaklaşımı benimsemeleri öngörülen bir yaklaşımdır. Bu tez çalışmasında da, çoğunlukla uygulamadakilere benzer şekilde değişkenlerin dağılımları Sınırlandırılmış Normal Dağılım olarak alınmış ve bu şekilde kabul edilen tasarımın etkisi tez çalışmasında değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.7. Z_L limit durum fonksiyonu benzeşim istatistiği (D= 0.5m için)

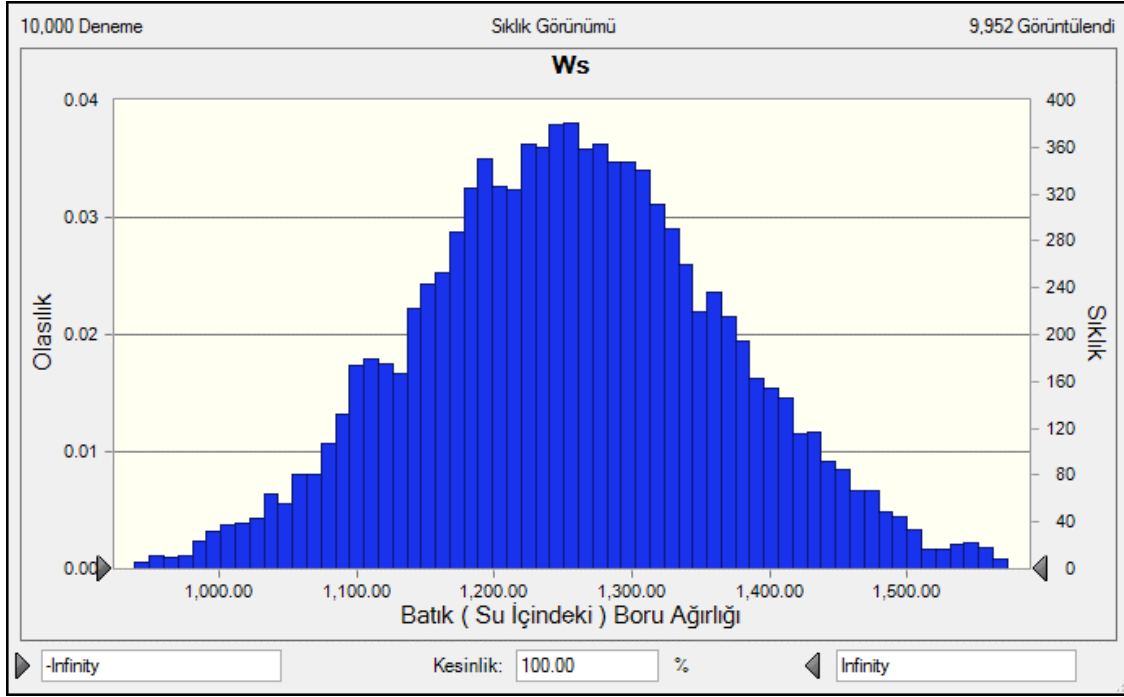
Semboller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
ZL	Yatay deplasman sınır değerini geçme durumu	Ana değişken (etkilenen değer)	-0.374615058	0.48065084	0.876330733	0.13900094	-	
AS	Belirgin dalga ivmesi (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.154055971	0.237215076	0.32539953	0.023792792	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.00618945	0.009987173	0.013716858	0.0010056	Normal Dağılım	
CD	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.663949212	0.700044552	0.743283075	0.010039166	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896442414	0.899990303	0.904513125	0.000997709	Sola yatık Üçgen Dağılım	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	1.933819795	3.287748272	5.181583071	0.401304318	Normal Dağılım	
cosΘ	Dalga yaklaşım açısı kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.04390484	0.500118097	1.050345203	0.149307464	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.481233003	0.500007271	0.519716576	0.004970898	Normal Dağılım	

Çizelge 7.7. (devam) limit durum fonksiyonu benzeşim istatistiği (D= 0.5m için)

γ_s'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10168.80285	11259.22599	12339.45559	421.5790309	Normal Dağılım	
γ_{sc}	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.003422366	1.267767566	1.592966899	0.125017803	Üçgen Dağılım	
$\sin\Theta$	Dalga faz açısı sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.47225146	0.499086407	1.155959565	0.181957998	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006284437	0.010021552	0.013553114	0.000990975	Normal Dağılım	
V_c	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.450273448	0.516049096	0.599474295	0.031036478	Normal Dağılım	
V_s	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.700798144	0.799807058	0.89785656	0.040750183	Normal Dağılım	
Z_p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006269884	0.010000671	0.013868531	0.000997739	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.459998481	0.599941585	0.737606733	0.035026401	Normal Dağılım	
ρ_{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2271.443378	2400.032298	2518.431868	30.07762175	Normal Dağılım	
$\rho_{\text{çelik}}$	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7071.578593	7576.530868	7849.962976	177.5701657	Normal Dağılım	
ρ_w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	993.7914324	1015.027144	1025.184226	5.943886248	Normal Dağılım	

Çizelge 7.4 incelendiğinde, Z_L fonksiyonunun temel bağımlı değişken (etkilenen değer) yani incelenen parametre, diğer girdilerin bağımsız değişken (ana parametreyi etkileyen) olarak tanımlandığı görülmektedir. Benzeşim senaryolarında, değişken sayısı (etkileyen parametreler) 18, bağımlı değişken (etkilenen parametre) 1 ve bu parametrelerin istatistiksel değerleri senaryo çizelgesi şeklinde verilmiştir.

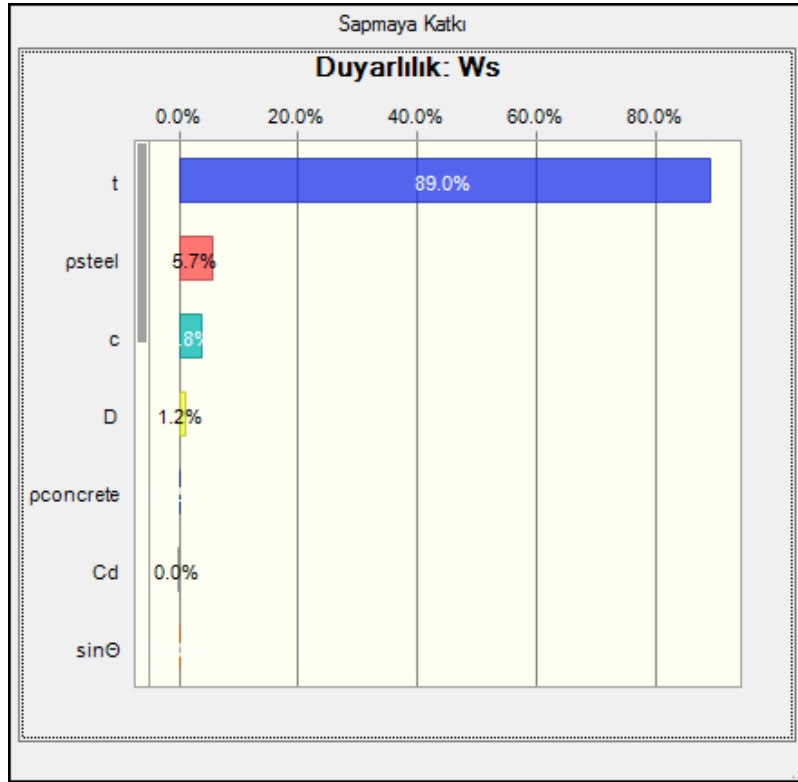
Diğer bir önemli parametre ise batık ağırlıktır. Batık ağırlık işletmeye alınma aşamasında su ile dolu olduğunda en güvenilir durum, boş (hava ile dolu) iken en kritik durum olarak adlandırılmıştır.



Şekil 7.8. Boru batık ağırlığının istatistiksel değişimi ve benzeşim histogramı (D= 0.5m için)

Batık ağırlığın değişkenliğine doğru orantılı olarak katkıda bulunan en önemli parametre t (% 89,0) çelik borunun et kalınlığıdır. Diğer yandan borunun hangi malzemeden yapıldığı da önemlidir. Borunun birim ağırlığının fazla olması borunun denge koşulunu olumlu yönde %5,7 oranında etkilemektedir, bunun yanı sıra boru et kalınlığının ve boru çapının da artması instabilite riskini diğer parametrelerin değişmediği (ceteris paribus) koşulda gözlemlenmiştir. Deniz tabanındaki boruların risk analizi incelendiğinde; borunun çapı sabitken boru kalınlığının artması durumunda bile yer değiştirmelere karşı riskin bir miktar azaldığı görülmektedir.

Batık ağırlık ayrıca beton ile kaplanmış olan borunun ağırlığını da içermekte olup kaplama kalınlığı arttığında riskin azaldığı, kaplamada kullanılan malzemenin cinsine (türüne) bağlı olarak kaplamanın birim hacim yoğunluğunun (2000 N/m^3 ile 2400 N/m^3 arasında) etkili olduğu görülmektedir. Batık ağırlığın duyarlılık grafiği Şekil 7.9.'de verilmiştir.



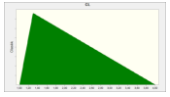
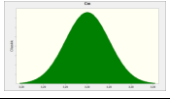
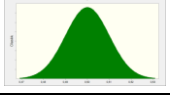
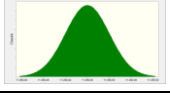
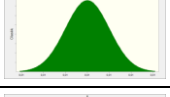
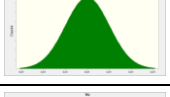
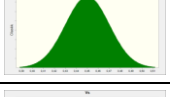
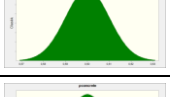
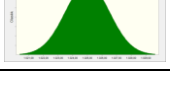
Şekil 7.9. Boru batık ağırlığının duyarlılık grafiği (D= 0.5m için)

Batık ağırlığın saha koşullarındaki benzeşim senaryosu incelendiğinde (Şekil 7.9), en düşük değerinin 813.03 N/m, en büyük değerinin 1670.97 N/m ve ortalama değerinin de 1258.10 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra diğer parametrelerin istatistiksel değişim parametreleri Çizelge 7.3.'de sunulmuştur.

Çizelge 7.8. Batık ağırlığın benzeşim istatistiği (D= 0.5m için)

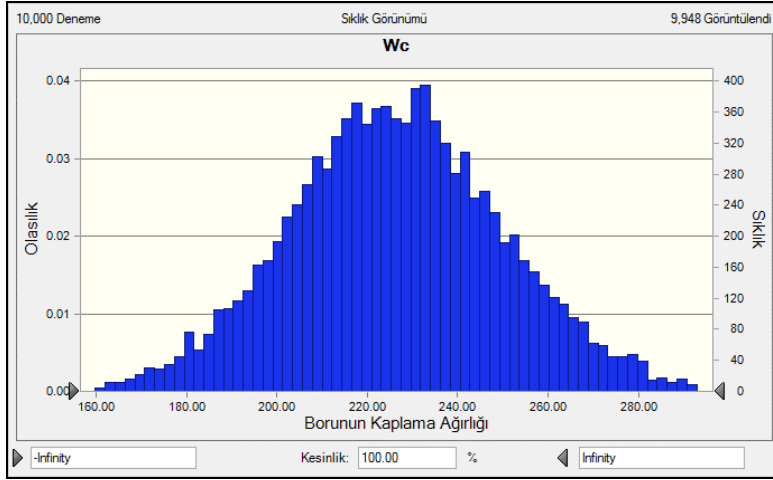
Semboller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
Ws	Boru batık ağırlığı (N/m)	Ana değişken (etkilene değer)	813.03	1,258.10	1,670.97	112.17	-	
As	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.16	0.24	0.34	0.02	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.01	0.01	0.01	0	Normal Dağılım	
Cd	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.66	0.7	0.74	0.01	Sola yatık Üçgen Dağılım	

Çizelge 7.8. (devam) Batık ağırlığın benzeşim istatistiği (D= 0.5m için)

CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.9	0.9	0.9	0	Sola yatık Üçgen Dağılım	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	2.04	3.3	4.98	0.4	Normal Dağılım	
cosΘ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.08	0.5	1.01	0.15	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.48	0.5	0.52	0.01	Normal Dağılım	
ys'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10,170.82	11,248.31	12,311.09	424.54	Normal Dağılım	
γ _{sc}	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.01	1.26	1.6	0.12	Üçgen Dağılım	
sinΘ	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.17	0.5	1.16	0.18	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.01	0.01	0.01	0	Normal Dağılım	
V _c	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.45	0.52	0.6	0.03	Normal Dağılım	
V _s	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.7	0.8	0.9	0.04	Normal Dağılım	
z _p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.01	0.01	0.01	0	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.45	0.6	0.74	0.03	Normal Dağılım	
ρ _{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2,285.36	2,400.39	2,529.52	30.11	Normal Dağılım	
ρ _{çelik}	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7,072.05	7,572.69	7,847.28	178.34	Normal Dağılım	
ρ _w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	991.57	1,015.06	1,039.28	6.06	Normal Dağılım	

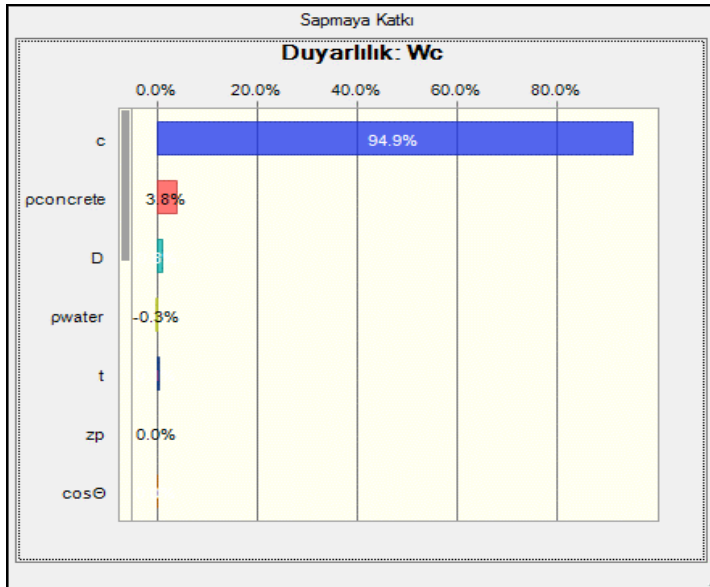
Batık ağırlığın iki bileşeni olan kaplama ağırlığı W_c (kaplama kalınlığı ne kadar büyükse buna bağlı olarak batık ağırlık artar, fakat maliyetin de göz önüne alınması gerekir) ve çeliğin et kalınlığı W_t boru ağırlığına etki etmektedir. Bu etkilerin benzeşimdeki

değişimleri Şekil 7.10. ve Şekil 7.11.'de, duyarlılık grafikleri ile (Şekil 7.13. ve Şekil 7.14) sunulmaktadır. Benzeşimin senaryo çizelgeleri Çizelge 7.4. ve Çizelge 7.5.'de sırasıyla verilmiştir.



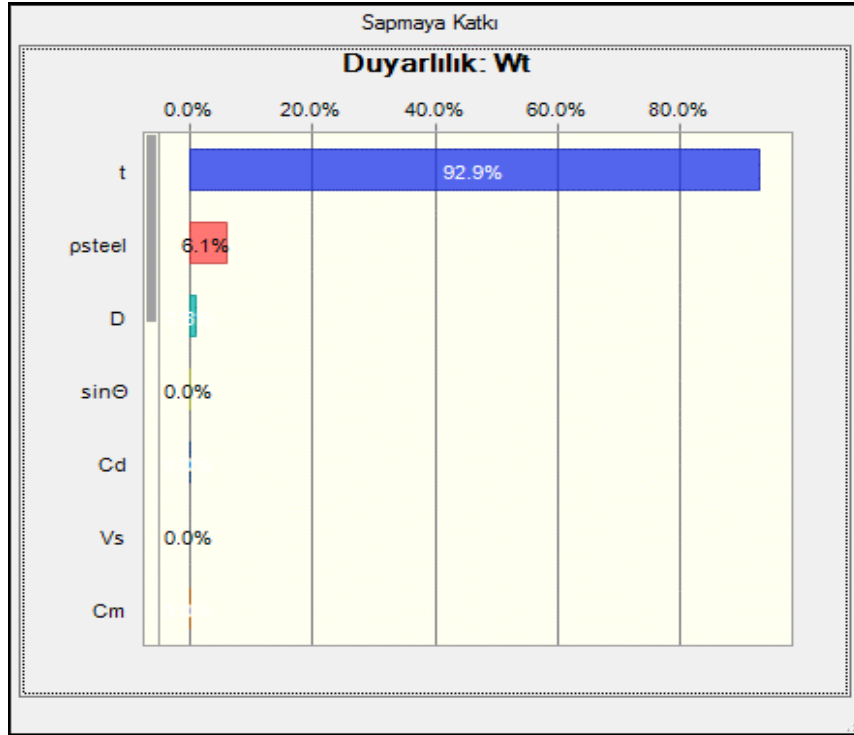
Şekil 7.10. Batık ağırlığı etkileyen kaplama ağırlığı dağılımı (D= 0.5m için)

Kaplama kalınlığının ağırlık hesabı yapılırken: kaplama kalınlığı ve borunun çapı (iç çap+ boru et kalınlığı) toplamının karesi orantılı olarak borunun kaplama ağırlığı değişir. Örneğin 0.5m boru çapı için boru kaplama ağırlığı 225 N/m iken boru çapı 1m olduğunda bu ağırlık 436 N/m, 1.5m boru çapı için 648.35 N/m ve 2m boru çapı için 860 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca borunun kaplama kalınlığı borunun toplam batık ağırlığını etkilediğinden, boru tasarımında etkili bir parametre olduğu gözlemlenmiştir.



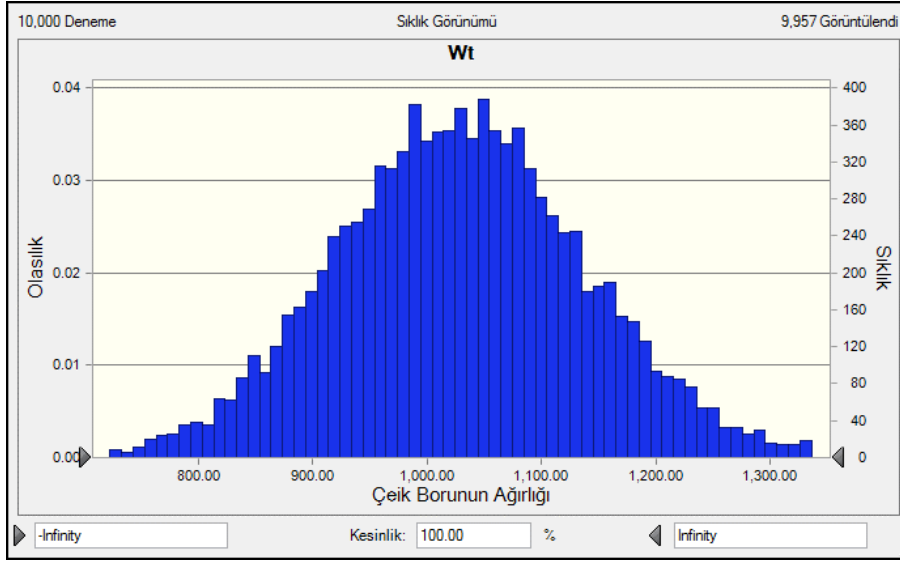
Şekil 7.11. Kaplama kalınlığı için duyarlılık grafiği (D= 0.5m için)

Boru kaplama kalınlığının duyarlılığı incelendiğinde (Şekil 7.11) beton kaplama yoğunluğunun %3.8 stabiliteyi olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca borunun çapının artması da yüzeyi artırttığından (borunun yüzeyi büyüdüğünden kaplama kalınlığı yüzeyini de artırır) olumlu yönde etkilenir.



Şekil 7.12. Çelik et kalınlığı için duyarlılık grafiği (D= 0.5m için)

Benzer şekilde borunun et kalınlığının duyarlılık grafiği Şekil 7.12. incelendiğinde; çelik borunun yoğunluğu stabiliteye %6,1 oranında olumlu katkı sağlamıştır. Kplama kalınlığında olduğu gibi boru çapının artması da kaplama kalınlığı ağırlığının artmasına olumlu yönde katkıda bulunur.



Şekil 7.13. Batık ağırlığı etkileyen çeliğin et kalınlığının benzeşim dağılımı (D= 0.5m için)

Şekil 7.13.'e bakıldığında (D=0.5m için) çelik borunun ağırlığının kaplama ve et kalınlığına göre benzeşimdeki ortalama değeri 226,32 N/m, oluşma sıklığı 300, olasılık değeri ise yaklaşık olarak %3 mertebesindedir.

Çizelge 7.9. Kaplama kalınlığı için senaryo analizi (D= 0.5m için)

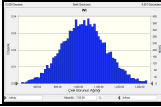
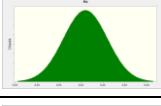
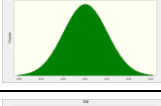
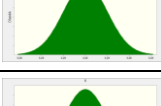
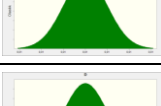
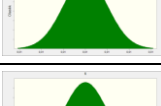
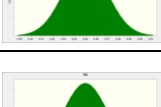
	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
Wc	Boru kaplama kalınlığının ağırlığı (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	145.2858536	226.3181408	308.8632192	23.7472623	-	
As	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.147650633	0.237320906	0.32365175	0.023724651	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006340282	0.010004884	0.013507293	0.001001469	Normal Dağılım	
Cd	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.66189666	0.699978422	0.738836039	0.010020004	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896361338	0.900007941	0.903632588	0.000986758	Sola yatık Üçgen Dağılım	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	1.970558469	3.296951925	5.14056912	0.399770761	Normal Dağılım	

Çizelge 7.9. (devam) Kaplama kalınlığı için senaryo analizi (D= 0.5m için)

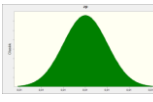
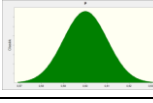
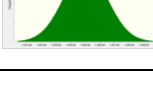
cos Θ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	- 0.145379638	0.498478855	1.086686992	0.149666176	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.479583845	0.499962745	0.519482147	0.005000066	Normal Dağılım	
γ_s'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10187.44872	11241.31951	12332.18284	426.5620176	Normal Dağılım	
γ_{sc}	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.001177441	1.266770983	1.593607023	0.125574061	Üçgen Dağılım	
sin Θ	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	- 0.235393817	0.502835562	1.164856467	0.181429719	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006534555	0.00999065	0.01382277	0.000992573	Normal Dağılım	
V _c	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.450795892	0.516991571	0.59943479	0.03123494	Normal Dağılım	
V _s	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.700576629	0.800051379	0.898949211	0.040711788	Normal Dağılım	
z _p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006311625	0.009990447	0.013765814	0.001003237	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.472682187	0.600478628	0.723439585	0.03465876	Normal Dağılım	
ρ_{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2291.873731	2399.767116	2506.975992	29.94310415	Normal Dağılım	
$\rho_{çelik}$	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7072.434971	7574.148548	7846.558535	177.7535418	Normal Dağılım	
ρ_w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	993.2883685	1014.974829	1039.608087	6.040965919	Normal Dağılım	

Kaplama kalınlığı senaryo analizi incelendiğinde; en üstte bulunan değer (etkilenen), diğer değerler ise (etkileyen değerler) sırasıyla gösterilmiştir.

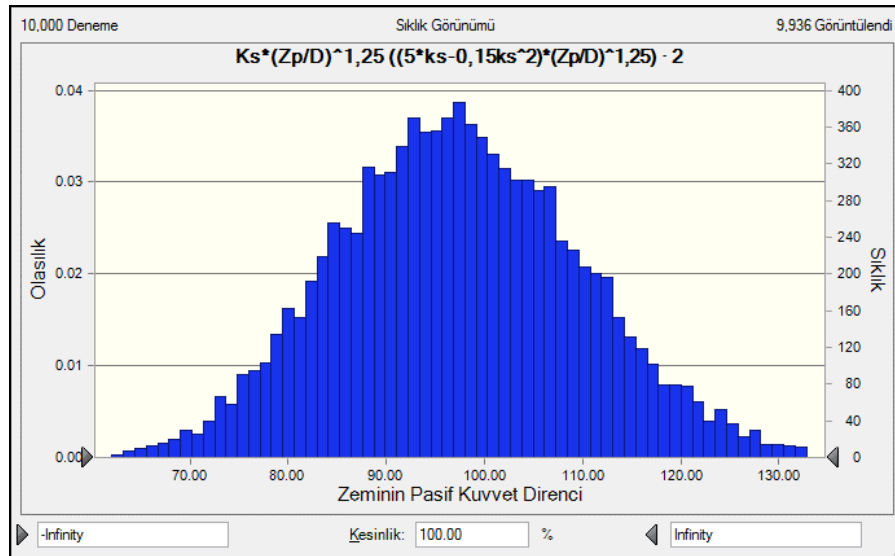
Çizelge 7.10. Çeliğin et kalınlığı için senaryo analizi (D= 0.5m için)

Semboller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
Wt	Boru et kalınlığı ağırlığı (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	641.1229	1030.32	1543.387	109.6724	-	
As	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.137311	0.237487	0.338074	0.023728	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006677	0.009996	0.013729	0.000994	Normal Dağılım	
Cd	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.66071	0.69983	0.737318	0.010047	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896333	0.899989	0.904072	0.000993	Sola yatık Üçgen Dağılım	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	2.110122	3.29234	5.195869	0.400927	Normal Dağılım	
cosΘ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.0713	0.502359	1.121554	0.150243	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.480109	0.500057	0.517576	0.004975	Normal Dağılım	
ys'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10170.25	11251.78	12349.78	426.696	Normal Dağılım	
ysc	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.003144	1.266882	1.593691	0.125472	Üçgen Dağılım	
sinΘ	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.16307	0.501645	1.210873	0.181565	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006356	0.009996	0.015012	0.001003	Normal Dağılım	
Vc	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.450846	0.516299	0.599584	0.030912	Normal Dağılım	
Vs	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.701365	0.800095	0.89758	0.040699	Normal Dağılım	

Çizelge 7.10. (devam) Çeliğin et kalınlığı için senaryo analizi (D= 0.5m için)

zp	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006298	0.010001	0.01381	0.001013	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.469933	0.600403	0.728227	0.034879	Normal Dağılım	
ρ_{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2270.704	2400.222	2503.55	29.77557	Normal Dağılım	
$\rho_{\text{çelik}}$	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7081.532	7570.678	7848.397	179.8971	Normal Dağılım	
ρ_w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	992.5592	1014.899	1039.016	6.019223	Normal Dağılım	

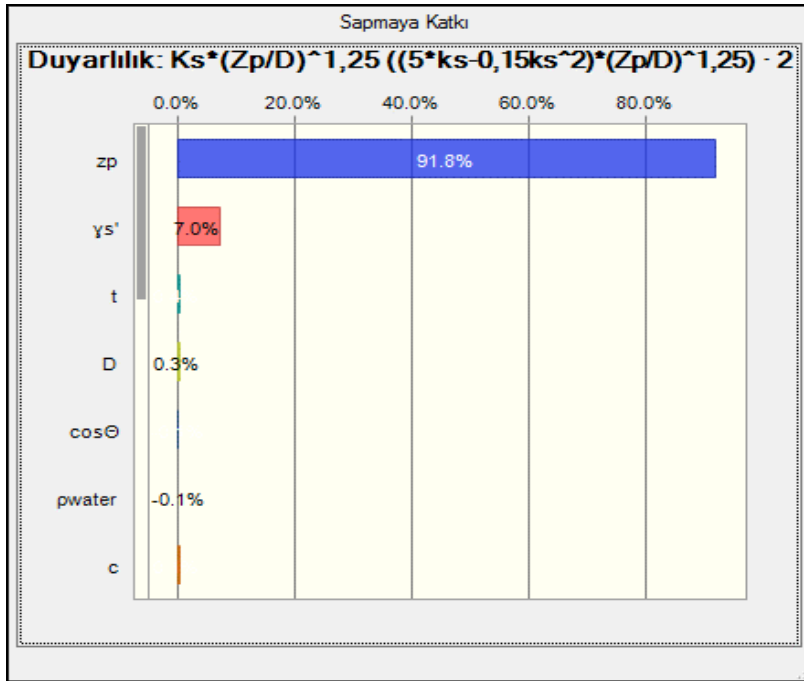
Çelik borunun et kalınlığının senaryo analizi incelendiğinde; en üstte bulunan değer (etkilenen), diğer değerler ise (etkileyen değerler) sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 7.14. Pasif zemin direncinin olasılık dağılımı (D= 0.5m için)

Pasif zemin direnci incelendiğinde; zeminin türüne ve k_s değerine bağlı olduğu görülür. Eğer zemin kum ise bu değer borunun çapına, batık ağırlığa, zeminin batık birim ağırlığına: kum için 7000 (çok gevşek) ile 13 500 N/m³ (çok sıkı) arasında değiştiği görülür. Kil zemin için: kil kayma direncine, borunun çapına, zemin ile boru arasındaki

düşey sürtünme kuvvetine bağlı olarak değişir. K_s değeri kum için 26,7'den büyük olduğunda Eşitlik 3.31.'te verilen ilk denklemden, bu değerden küçük ise ikinci denklemden elde edilir. K_s değeri 0.5m boru çapı için 6.25, 1m boru çapı için 8.54, 1.5m boru çapı için 13.11, 2m boru çapı için ise 17.71 olarak hesaplanır. K_s değeri elde edildikten sonra boru ile zemin arasındaki düşey direnç kuvveti hesaplanır ve bu değer elde edildikten sonra zeminin pasif direnci elde edilmiş olunur. Zeminin pasif direncinin olasılık dağılımı Şekil 7.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.15. Pasif zemin direncin duyarlılık grafiği (D=0.5m çelik boru çapı için)

Zemin pasif direncinin duyarlılık grafiği incelendiğinde; bu parametrenin en çok borunun batma miktarına, sonra sırasıyla zeminin birim ağırlığı, çelik borunun et kalınlığı, borunun çapı, kaplama kalınlığına olumlu yönde, su yoğunluğuna ise ters orantıda bağlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.11. Pasif zemin direncinin hesaplanmasında kullanılan Ks değerinin senaryosu (D= 0.5m için)

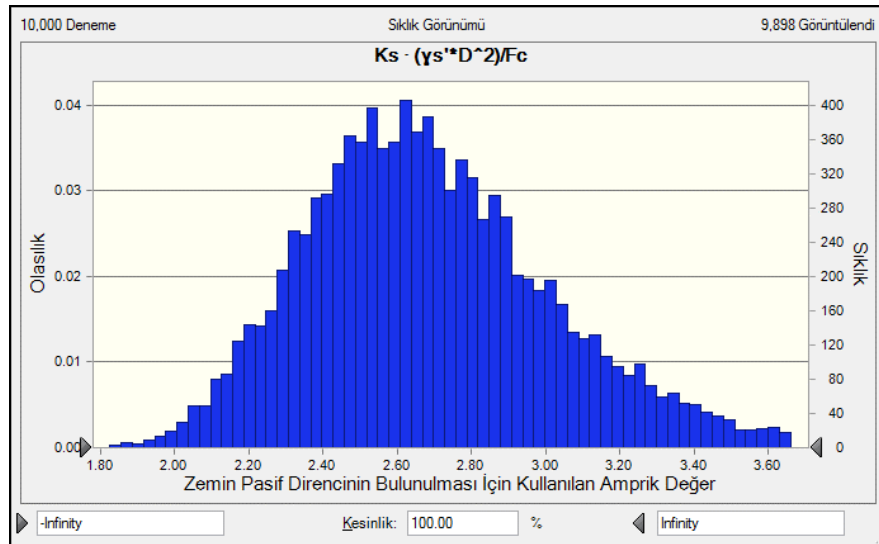
Sembo ller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılı m Türü	Dağılım Gösterim i
FR	Zemin pasif kuvveti (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	52.67842397	97.48175343	148.9704716	12.72784393	-	
s	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.151409919	0.237354714	0.33860666	0.023367737	Norma l Dağılı m	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006481242	0.010011624	0.013745855	0.000998085	Norma l Dağılı m	
Cd	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.664226474	0.699939782	0.737860105	0.010121751	Sola yatık Üçgen Dağılı m	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.8962732	0.900004747	0.904553171	0.000999441	Sola yatık Üçgen Dağılı m	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	2.08939771	3.294031441	5.071202336	0.400679273	Norma l Dağılı m	
cosΘ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.090955282	0.501791691	1.085558566	0.149449957	Norma l Dağılı m	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.483184415	0.500004288	0.51712059	0.004949537	Norma l Dağılı m	
γs'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10167.58644	11246.22128	12334.21857	424.5419001	Norma l Dağılı m	
γsc	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.003943582	1.266827245	1.593367082	0.124735434	Üçgen Dağılı m	
sinΘ	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.119166072	0.501375814	1.210467221	0.182028956	Norma l Dağılı m	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006076147	0.009998568	0.01386073	0.001001012	Norma l Dağılı m	
Vc	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.451244322	0.517031604	0.599165337	0.031375567	Norma l Dağılı m	
Vs	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.701161678	0.800307904	0.899265927	0.040320438	Norma l Dağılı m	

Çizelge 7.11. (devam) Pasif zemin direncinin hesaplanmasında kullanılan Ks değerinin senaryosu (D= 0.5m için)

zp	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006298549	0.010011484	0.013640395	0.001006248	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.444282338	0.599966384	0.742777605	0.034840289	Normal Dağılım	
p _{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2289.459031	2400.11897	2518.400132	29.70159171	Normal Dağılım	
p _{çelik}	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7073.495379	7569.761574	7849.092965	180.2628723	Normal Dağılım	
p _w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	992.4686673	1014.922481	1037.270346	5.964589903	Normal Dağılım	

Pasif zemin direncinin senaryo analizi incelendiğinde; en üstte bulunan değer (etkilenen), diğer değerler ise (etkileyen değerler) sırasıyla gösterilmiştir.

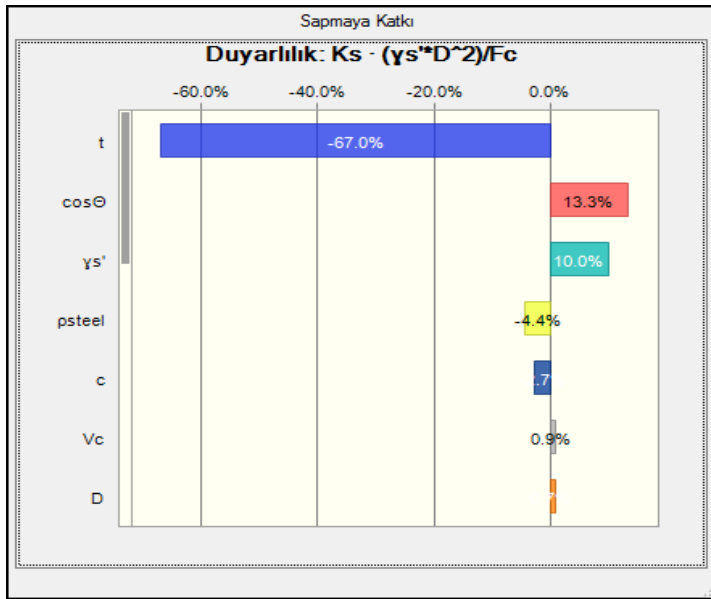
Pasif zemin direncin hesaplanmasında kullanılan Ks değerinin olasılık dağılımı ve duyarlılık grafikleri Şekil 7.16. ve Şekil 7.17.'te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 7.16. Zemin pasif direncin hesaplanmasında kullanılan Ks değerinin olasılık dağılımı (D=0.5m çelik boru çapı için)

Zemin türüne bağlı olarak değişen bu parametrenin kum için (D=0.5m) ortalama benzeşim değeri 2.60'dır. Ks boru çapının karesiyle, kumun birim ağırlığıyla, boru ile zemin arasındaki düşey kuvvet (borunun batık ağırlığı – kaldırma kuvveti) ile ters orantılı olarak

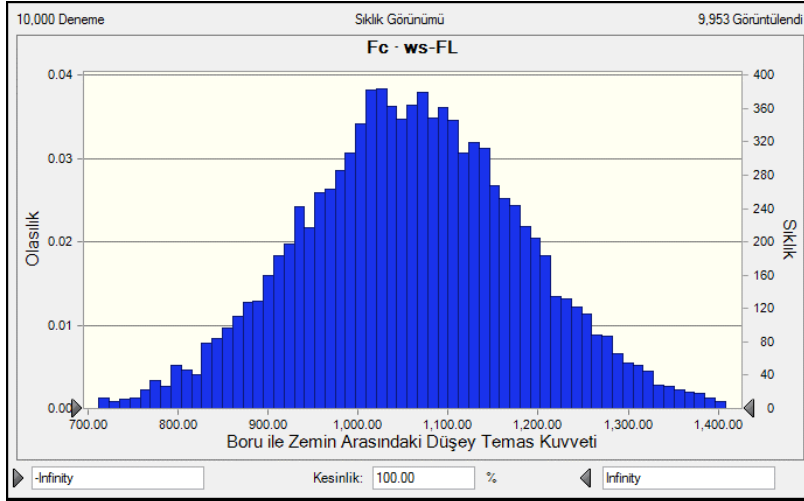
değişir. Batık ağırlığın hesaplanmasında, çelik borunun et kalınlığı arttığında batık ağırlığı arttığından K_s değerinin düştüğü görülür. Kaldırma kuvveti Eşitlik 3.26.'da verilmiştir. Eşitlikte yaklaşım açısı parametresi etkili olduğundan: sırasıyla kaldırma kuvveti, borunun batık ağırlığı elde edilip $F_C = w_s \cdot F_L$ denkleminde boru ile zemin arasındaki düşey kuvvet hesaplanır. Zemin ile boru arasındaki düşey kuvvet hesaplandıktan sonra K_s değeri Eşitlik 3.31.'ten elde edilir. Dolayısıyla K_s değeri bu kuvvet ile ters orantılıdır. Zemin ile boru arasındaki düşey kuvvet, borunun batık ağırlığı ile doğru orantılıdır (Eşitlik 3.30.) Dalga yaklaşım açısının artması (kosinüs) kaldırma kuvvetini artırır. Kaldırma kuvvetinin artması da K_s değerinin artmasına neden olur.



Şekil 7.17. Zemin pasif direncin hesaplanmasında kullanılan K_s değerinin duyarlılık grafiği (D=0.5m çelik boru çapı için)

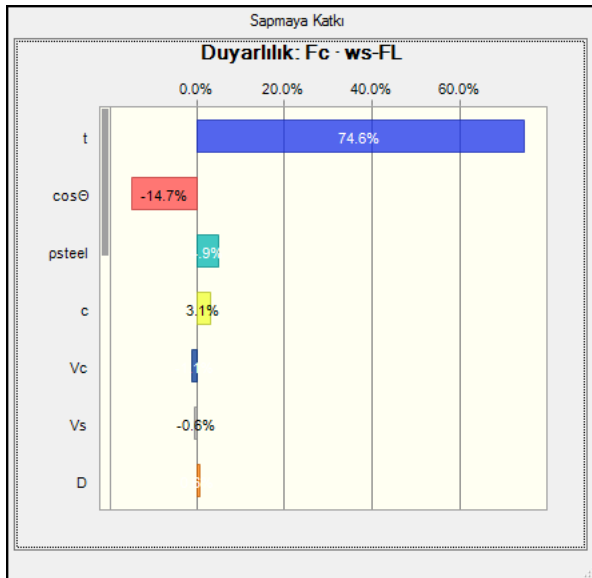
Dolayısıyla Şekil 7.13. duyarlılık grafiği incelendiğinde; K_s değerinin borunun yoğunluğu ve et kalınlığından ters orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. K_s değerinin düşmesiyle (borunun çapı sabit) Eşitlik 3.31.'te verilen denklemde eşitliğin sağındaki değer azalır. Bu değer zemin ile boru arasındaki düşey kuvvetle (borunun batık ağırlığı – kaldırma kuvveti) çarpılmasıyla zeminin pasif direnci elde edilmiş olur.

Hidrodinamik kuvvetlerin olasılık dağılımları, benzeşim analizleri ve duyarlılık grafikleri Şekil 7.18. ile Şekil 7.21'de sunulmuştur. Senaryo analizleri ise Çizelge 7.7. ile Çizelge 7.10. arasında verilmiştir.



Şekil 7.18. Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvveti (D= 0.5m için)

Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetinin benzeşim aralığı Şekil 7.14.'de sunulmaktadır. Düşey temas kuvveti borunun batık (su içindeki) ağırlığına bağlıdır. İşletmeye alma koşullarında, boru su ile dolu (en ağır) durumda, iletim sıvısı pompalanmadan önce ise boş iken (hava ile dolu) en hafif durumdadır. Batık ağırlık ayrıca kaplamanın kalınlığı, çelik borunun kalınlığı gibi değişkenlerden de etkilenir. Tasarım yapılırken bu değişkenlerin malzeme ve koruma (katodik vs) özelliklerine göre en uygun (optimum) değer alınmasına dikkat edilmelidir. Borunun çapı arttıkça hem ağırlığı hem de maliyeti artıracığından, tasarım debisi seçilirken özel bir durum olmadıkça çok büyük çaplı borular tercih edilmez.



Şekil 7.19. Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetinin duyarlılık grafiği (D= 0.5m için)

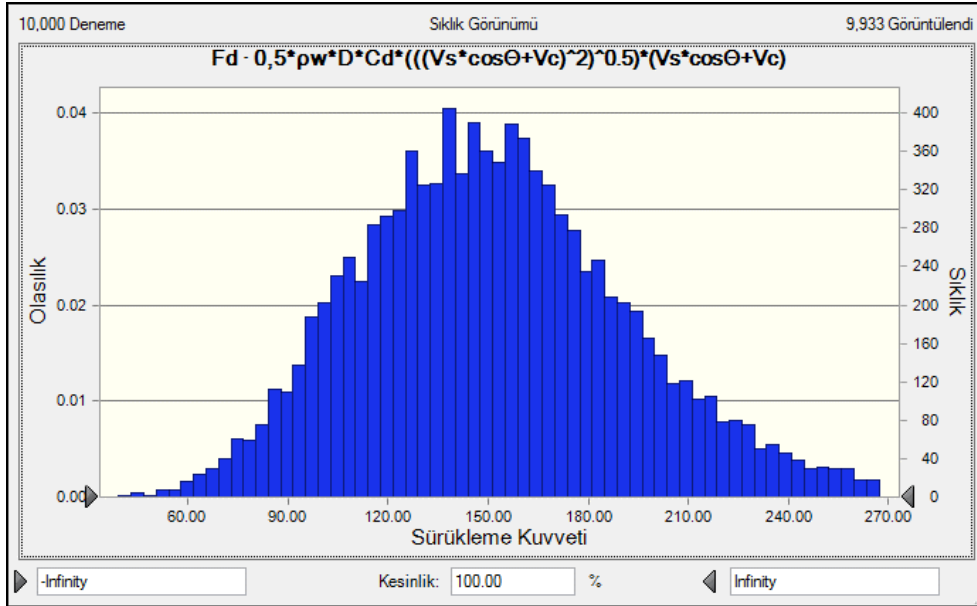
Boru ile zemin arasındaki kuvvetin duyarlılık grafiğini göz önüne aldığımızda, $FC = w_s - FL$ hem kaldırma kuvvetine hem de borunun batık ağırlığına bağlıdır. Borunun et kalınlığının artması kuvvetin de artmasına neden olur ve F_c doğru orantılı şekilde artar. Borunun et kalınlığı çelik borunun yoğunluğu ile doğru orantılı olduğundan, F_c kuvvetini doğru orantılı şekilde etkiler. Dalga yaklaşım açısı kaldırma kuvvetinin bir parametresi olduğu için (kosinüs), 90 dereceye yakın değerlerde sifıra yaklaşır. Bu nedenle kaldırma kuvveti içerisinde bulunan dalga bileşenin yok olmasına sebebiyet verdiği için en çok ters orantılı şekilde bu parametreden etkilendiği gözlemlenmiştir. Şekil 7.20’de verilen sürüklenme kuvveti 0.5m boru çapı için hesaplanmıştır. Diğer boru çaplarının grafikleri EK-1, EK-2 ve EK-3’te sunulmuştur.

Çizelge 7.12. Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetinin senaryo analizi (D= 0.5m için)

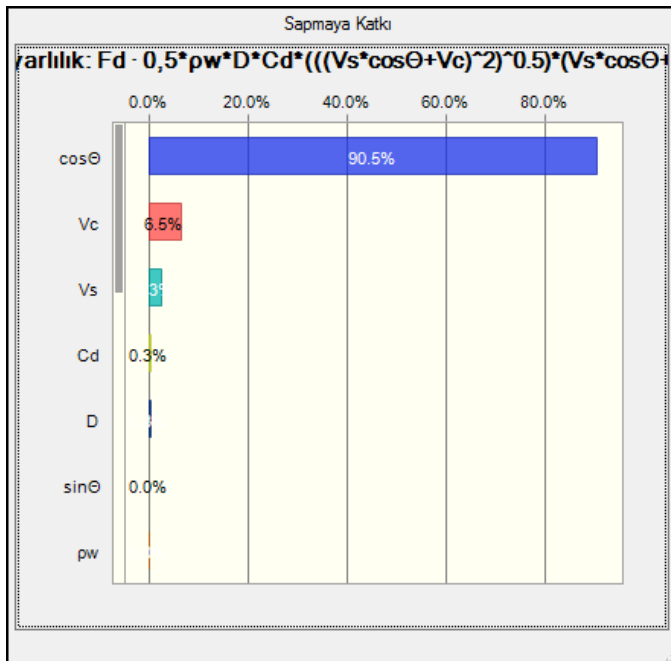
	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
$F_c = w_s - FL$	Boru ile zemin arasındaki temas kuvveti (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	561.3941472	1061.91388	1517.270212	124.9821369	-	
A_s	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.142200157	0.237390936	0.324873532	0.023749484	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006640474	0.009998921	0.013928159	0.001003696	Normal Dağılım	
C_d	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.657815269	0.700020299	0.740075503	0.009987648	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896397865	0.899998929	0.903992455	0.000995842	Sola yatık Üçgen Dağılım	
C_m	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	1.945442143	3.284695591	5.163703419	0.39957287	Normal Dağılım	
$\cos\Theta$	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.014785193	0.500492322	1.084773218	0.150042047	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.482397179	0.500042894	0.522451886	0.004992659	Normal Dağılım	
γ_s'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10181.98185	11251.65832	12336.73997	426.9052861	Normal Dağılım	

Çizelge 7.12. (devam) Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetinin senaryo analizi
(D= 0.5m için)

γ_{sc}	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.001304897	1.267054685	1.593639718	0.124501979	Üçgen Dağılım	
$\sin\Theta$	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.19382838	0.503560406	1.164283926	0.180384589	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006029908	0.009998893	0.013991266	0.001005989	Normal Dağılım	
V_c	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.450174061	0.516601587	0.599609029	0.031024892	Normal Dağılım	
V_s	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.70156768	0.799755982	0.899444882	0.040701207	Normal Dağılım	
z_p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.005876652	0.010012004	0.013758697	0.00098861	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.477048248	0.59981283	0.716703422	0.034584528	Normal Dağılım	
p_{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2284.584586	2400.665265	2517.604543	30.28607234	Normal Dağılım	
$p_{çelik}$	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7070.439741	7574.367563	7849.016968	178.3511986	Normal Dağılım	
ρ_w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	99y4.4865049	1015.089838	1037.115171	6.035520371	Normal Dağılım	



Şekil 7.20. Sürüklemeye kuvvetinin olasılık dağılımı (D=0.5m çelik boru çapı için)



Şekil 7.21. Sürüklemeye kuvvetinin duyarlılık grafiği (D=0.5m çelik boru çapı için)

Çizelge 7.13. Sürüklenme kuvvetinin senaryo analizi (D=0.5m çelik boru çapı için)

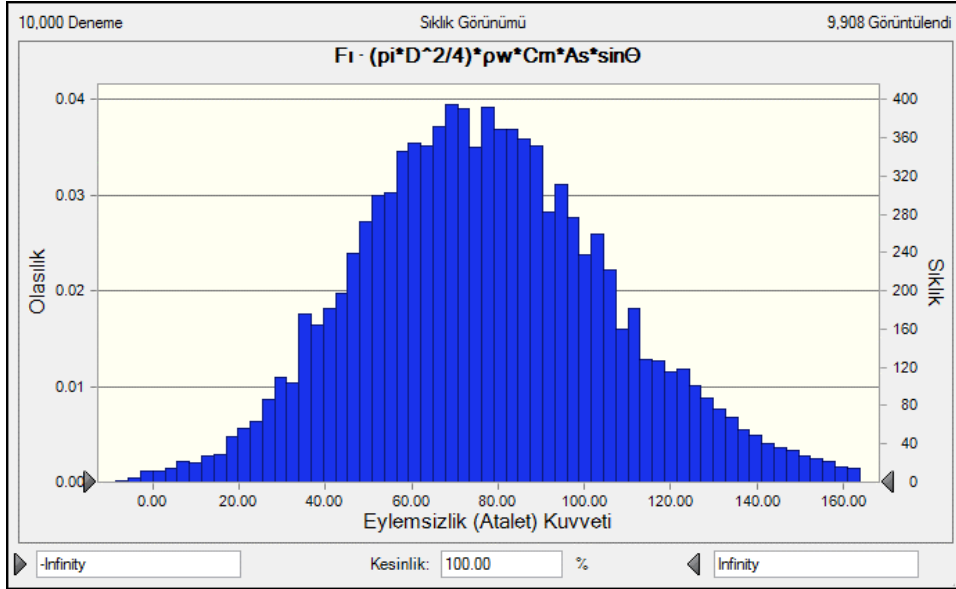
Semboller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
Fd	Sürüklenme kuvveti (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	36.45515114	151.6051327	330.1951652	41.25966577	-	
As	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.143421705	0.237632023	0.338521767	0.023709448	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006170249	0.01000148	0.013451193	0.001000504	Normal Dağılım	
Cd	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.660337338	0.700074455	0.741104438	0.009917032	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896311246	0.899995171	0.903531844	0.000997484	Sola yatık Üçgen Dağılım	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	1.971684328	3.293938669	5.216217594	0.400230854	Normal Dağılım	
cosΘ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.04505669	0.497930413	1.09060198	0.150306663	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.481036352	0.500023928	0.520073051	0.004994169	Normal Dağılım	
γs'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10159.28653	11253.24232	12352.69118	420.9631041	Normal Dağılım	
γsc	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.004345435	1.266374556	1.597123068	0.125426336	Üçgen Dağılım	
sinΘ	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.197524279	0.49938976	1.162829309	0.18010831	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006021645	0.010001336	0.013421571	0.001004165	Normal Dağılım	
Vc	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.450925792	0.516865145	0.599319906	0.031165092	Normal Dağılım	
Vs	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.700148693	0.799934586	0.897523382	0.040591032	Normal Dağılım	

Çizelge 7.13. (devam) Sürüklenme kuvvetinin senaryo analizi (D=0.5m çelik boru çapı için)

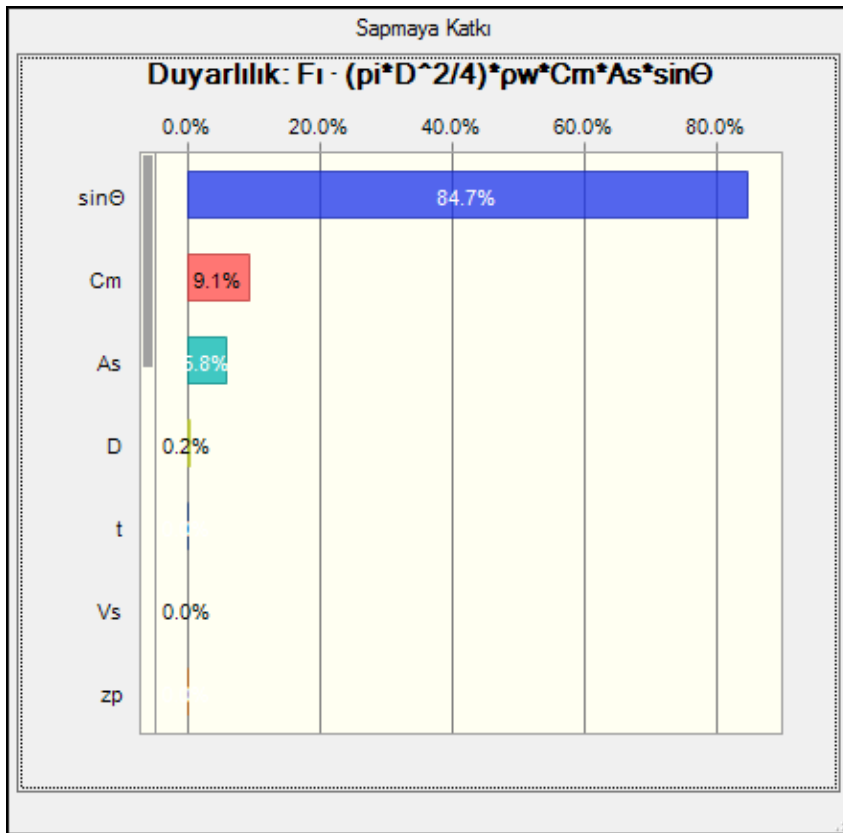
z _p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006239327	0.009996729	0.014277337	0.000997525	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.46762955	0.59979927	0.73073876	0.034853551	Normal Dağılım	
ρ _{beto}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2277.389832	2400.065987	2519.221911	30.0102536	Normal Dağılım	
ρ _{çelik}	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7070.162923	7572.890808	7849.042235	178.6715581	Normal Dağılım	
ρ _w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	993.8273243	1015.079887	1038.100105	6.010920576	Normal Dağılım	

Sürüklenme kuvvetinin altı bileşeni bulunmaktadır. Bu bileşenlerden birinin sıfıra eşit olması, sürüklenme kuvvetinin bu değere duyarlılığını artırır. Bu nedenle dalga parçacık hızının sıfır olması (boru ekseninde) duyarlılık grafiğinde en çok etkilenen parametre olduğunu doğrular. Yani açı değerinin artması (kosinüs) dalga bileşenin hız değerinin artmasına ve buna bağlı olarak yatay yöndeki sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olur. Yine benzer şekilde sürüklenme kuvvetinin akıntı hızı ve dalga hızlarının karesiyle doğru orantılı olduğundan arttığı gözlemlenmiştir.

Atalet kuvveti borunun çapı, suyun yoğunluğu, dalga faz açısına (sinüs), atalet sabiti ve ivmesine bağlıdır. Bu değerlerle karşılaştırıldığında göreceli olarak suyun yoğunluğu derinlik boyunca çok fazla bir değişkenlik göstermediğinden, atalet kuvvetinin suyun yoğunluğuna duyarlı olmadığı gözlemlenmiştir. Dalganın faz açısının 90 dereceye yaklaşması sinüs değerini maksimuma yaklaştırır ve atalet kuvvetinin artmasına neden olur. Şekil 7.23’de verilen duyarlılık grafiğinde bu etki görülmektedir.

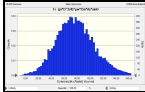
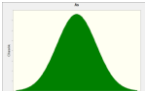
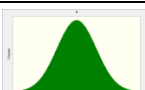
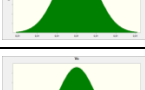
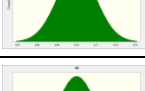


Şekil 7.22. Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin olasılık dağılımı (D=0.5m çelik boru çapı için)

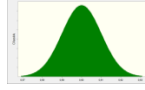
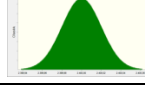
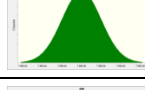
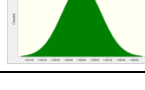


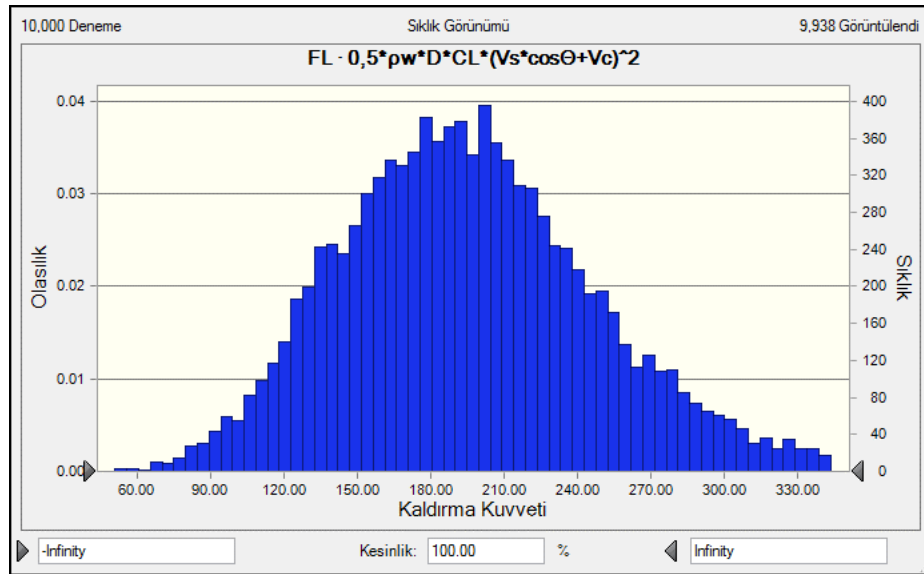
Şekil 7.23. Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin duyarlılık grafiği (D=0.5m çelik boru çapı için)

Çizelge 7.14. Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin senaryo analizi (D=0.5m çelik boru çapı için)

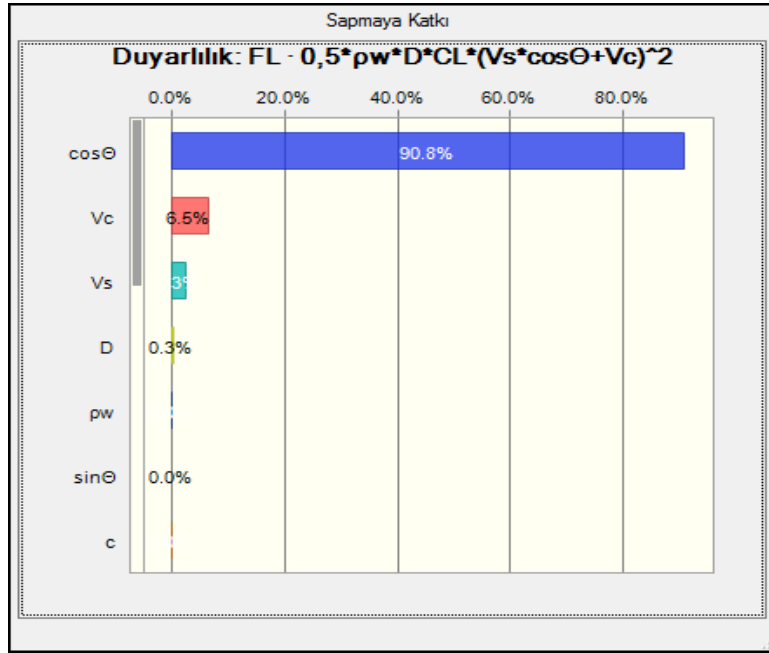
Semboller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
F _i	Atalet kuvveti (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	-30.6843	77.56426	232.8569	31.09279	-	
A _s	Belirgin ivme (m/s ²)	Alt değişken (etken değer)	0.146689	0.23669	0.328635	0.023544	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006384	0.010003	0.013931	0.000997	Normal Dağılım	
C _d	Sürtüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.65075	0.700053	0.734296	0.009972	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896015	0.9	0.90354	0.000997	Sola yatık Üçgen Dağılım	
C _m	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	2.086337	3.289314	5.308195	0.399562	Normal Dağılım	
cosΘ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.0417	0.498838	1.175371	0.148762	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.474231	0.500092	0.516987	0.005104	Normal Dağılım	
γ _{s'}	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10168.6	11249.8	12322	423.9802	Normal Dağılım	
γ _{sc}	Belirsizlik faktörü	Alt değişken (etken değer)	1.001653	1.264674	1.595727	0.123039	Üçgen Dağılım	
sinΘ	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.19083	0.498892	1.187573	0.179894	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006391	0.010008	0.013733	0.000997	Normal Dağılım	
V _c	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.450318	0.517131	0.599413	0.031212	Normal Dağılım	
V _s	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.700659	0.799812	0.898521	0.040396	Normal Dağılım	
z _p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.005975	0.009996	0.014226	0.000997	Normal Dağılım	

Çizelge 7.14. (devam) Eylemsizlik (atalet) kuvvetinin senaryo analizi (D=0.5m çelik boru çapı için)

μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.461809	0.59957	0.732323	0.034869	Normal Dağılım	
ρ_{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2278.644	2400.347	2540.282	30.4338	Normal Dağılım	
$\rho_{\text{çelik}}$	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7069.067	7569.479	7847.138	179.512	Normal Dağılım	
ρ_w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	992.9651	1015.083	1036.499	6.011961	Normal Dağılım	



Şekil 7.24. Kaldırma kuvveti için olasılık dağılımı (D=0.5m çelik boru çapı için)



Şekil 7.25. Kaldırma kuvveti için duyarlılık grafiği (D=0.5m çelik boru çapı için)

Çizelge 7.15. Kaldırma kuvveti için senaryo analizi (D=0.5m çelik boru çapı için)

Semboller	Değişken	Değişken tipi	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma	Dağılım Türü	Dağılım Gösterimi
FL	Kaldırma kuvveti (N/m)	Ana değişken (etkilenen değer)	43.9038813	196.5625025	453.1674054	53.67199852	-	
As	Belirgin ivme (m/s²)	Alt değişken (etken değer)	0.145052525	0.237612237	0.322988528	0.023692625	Normal Dağılım	
c	Kaplama kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006499017	0.009993965	0.013929876	0.000999841	Normal Dağılım	
Cd	Sürüklenme sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.664961006	0.700097366	0.736824898	0.010090658	Sola yatık Üçgen Dağılım	
CL	Kaldırma kuvveti sabiti	Alt değişken (etken değer)	0.896553261	0.899980801	0.903737048	0.001007566	Sola yatık Üçgen Dağılım	
Cm	Atalet sabiti	Alt değişken (etken değer)	2.126172528	3.293104785	5.216235717	0.400189502	Normal Dağılım	
cosΘ	Kosinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.056107542	0.502481032	1.0805019	0.150360736	Normal Dağılım	
D	Borunun iç çapı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.479997536	0.500008408	0.521945002	0.005074194	Normal Dağılım	

Çizelge 7.15. (devam) Kaldırma kuvveti için senaryo analizi (D=0.5m çelik boru çapı için)

γ_s'	Zemin batık birim ağırlığı (N/m ³)	Alt değişken (etken değer)	10161.73725	11246.3086	12356.63934	426.8986166	Normal Dağılım	
γ_{sc}	Belirsizlik faktörü	Alt değişken(etk endeger)	1.000710385	1.266937466	1.595477406	0.124088932	Üçgen Dağılım	
$\sin\Theta$	Sinüs değeri	Alt değişken (etken değer)	-0.171826919	0.500247051	1.203163951	0.18060273	Normal Dağılım	
t	Boru et kalınlığı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006731576	0.010002619	0.013919326	0.001010497	Normal Dağılım	
V_c	Akıntı hızı (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.45107593	0.517033287	0.599261566	0.031127753	Normal Dağılım	
V_s	Boruya dik dalga hız bileşeni (m/s)	Alt değişken (etken değer)	0.700427072	0.799887891	0.898288478	0.040681941	Normal Dağılım	
z_p	Borunun zemine batma miktarı (m)	Alt değişken (etken değer)	0.006166199	0.010004169	0.013911362	0.000992628	Normal Dağılım	
μ	Sürtünme katsayısı	Alt değişken (etken değer)	0.460818254	0.599868606	0.752739599	0.035443358	Normal Dağılım	
ρ_{beton}	Beton yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	2257.443727	2399.684125	2508.942583	30.4347512	Normal Dağılım	
$\rho_{çelik}$	Çelik yoğunluğu	Alt değişken (etken değer)	7067.104799	7574.566172	7847.349096	178.8716935	Normal Dağılım	
ρ_w	Su yoğunluğu (sıcak su, tatlı su vb.)	Alt değişken (etken değer)	991.8028489	1014.970687	1036.356432	6.002475093	Normal Dağılım	

Benzeşim analizlerinde borunun yüzmemesi için $\gamma_{sc} \frac{F_L}{w_s} \leq 1.0$ kriterinin sağlanması gerekir.

0.5 metre çaplı boru için bu kriterin sağlandığı (0,1508), 1 metre boru çapı için 0,1528, 1,5 metre boru çapı için 0,1534 ve 2 metre boru çapı için 0,1538 değerlerini alarak sınırlı değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Düşeydeki boru stabilitesi her dört boru çapı için de sağlanmaktadır.

Borunun içerisinde su, gaz karışımı (iki sıvının vb.) ve havanın geçmesi durumunda örnek saha uygulaması için Monte Carlo Benzeşimi uygulanmıştır. Benzeşimlerde, karışım (iki sıvı karışımı gibi) yoğunluğu 10 kg/m³, hava yoğunluğu 1.225 kg/m³ ve su için değişken

yoğunluklu alınmıştır. Derinliğe bağlı olarak sıcak su, tatlı su, tuzlu su katmanlarına göre suyun yoğunluğu değişir. Çizelge 7.16 ve 7.17’de verilen benzeşim sonuçları dalga faz açısının 45 derece alındığı durum için verilmiştir.

Benzeşimler limit durum fonksiyonunun $Z_L = 1 - F_w \left(\frac{F_D + F_I + \mu F_L}{\mu W_s + F_R} \right)$ matematiksel ifadesine göre yapılmıştır.

Çizelge 7.16. Dört farklı boru çapı için Z_L değerleri

Boru Çapı D (m)	Boruda iletilen akışkan cinsi	(Z_L)<1
0,5	Gaz karışımı	0.998
	Su	0.8409
	Hava	0.9998
1,0	Gaz karışımı	0.997
	Su	0.7123
	Hava	0.9997
1,5	Gaz karışımı	0.995
	Su	0.5827
	Hava	0.9995
2,0	Gaz karışımı	0.994
	Su	0.4522
	Hava	0.9994

Çizelgeden de görüldüğü gibi işletmeye alınmadan önce boru boş olduğunda Z_L değerinin en yüksek risk taşıdığı değerdir (bir değerine yakın olduğu için). Gaz karışımı ve su iletildiğinde risk düşmektedir. Bu nedenle güvenilirliğe dayalı tasarımda, işletme öncesi boru hava ile dolu iken limit durum koşulları benzeştirilmelidir. Tasarım en riskli durum için gerçekleştirilmelidir. Bu değer boru çapına bağlı olduğu için, boru çapı arttığında da bu değerlerin düştüğü gözlemlenmiştir. Dört farklı akışkan için de bu durum çizelgede görülmektedir. Farklı akışkanların boru yardımıyla iletilmesi Z_L değerlerinin birden küçük olması nedeniyle bu tasarımda sorun teşkil etmediği gözlemlenmiştir. Boru çapları endüstriyel kullanıma bağlı olarak artırıldığında elde edilen benzeşim senaryoları EK-1, EK-2’de sunulmuştur.

Borunun yüzmemesi için, $Z_v = \gamma_{sc} \frac{F_L}{w_s} \leq 1.0$ denge şartının sağlanmasına bağlı olarak benzeştirilmiştir. Borunun düşeydeki denge değeri, Z_v : Belirsizlik faktörüne (γ_{sc}), kaldırma kuvvetine (F_L), batık ağırlığa (w_s) bağlı olarak Çizelge 7.17’de sunulmaktadır.

Çizelge 7.17. Boru düşey denge değerleri, Z_v

Boru çapı, D (m)	Belirsizlik faktörü (γ_{sc})	Kaldırma Kuvveti, F_L (N/m)	Boru batık ağırlığı, w_s (N/m)	Boru düşey denge değerleri, Z_v
0.5	1.67	205.9103	1305.304	0.26346
	1.60			0.25239
	1.50			0.23662
	1.40			0.20224
	1.30			0.20527
	1.20			0.18929
	1.10			0.17352
	1.00			0.15715
	0.98			0.15416
1.0	1.67	411.8206	2576.624	0.26692
	1.60			0.25573
	1.50			0.23974
	1.40			0.22367
	1.30			0.20778
	1.20			0.19180
	1.10			0.17581
	1.00			0.15983
	0.98			0.15666

Benzeşimde 0.98 ile 1.67 (DNV-RP-F109’de önerilen maksimum ve minimum değerler) arasında değişen güvenlik katsayılarının 0.5m ve 1.0m boru çapları için düşey denge şartını sağlandığı gözlemlenmiştir. Kaldırma kuvvetinin hesabında suyun yoğunluğu 1025 kg/m^3 , kaldırma kuvveti sabiti 0.9, dalga parçacık hızı 0.7 m/sn , açısız faz değeri 45 ve akıntı hızının 0.45 m/sn olduğu durum için elde edilen benzeşim değerleri Çizelge (18-20)’de sunulmaktadır. Boru kaplama kalınlığı 0.001m , et kalınlığı 0.001m , çelik özgül ağırlığı 7850 N/m^3 , beton kaplama özgül ağırlığı 2400 N/m^3 için Çizelge 7.18 ve Çizelge 7.19’deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 7.18. Boru düşey denge değerleri, Z_v

Boru çapı, D (m)	Belirsizlik faktörü (γ_{sc})	Kaldırma Kuvveti, F_L (N/m)	Boru batık ağırlığı, w_s (N/m)	Boru düşey denge değerleri, Z_v
1.50	1.67	617.7309	3847.909233	0.26830
	1.60			0.25686
	1.50			0.24081
	1.40			0.22465
	1.30			0.20870
	1.20			0.19264
	1.10			0.17659
	1.00			0.16057
	0.98			0.15733
2.0	1.67	823.6412192	5119.194	0.26869
	1.60			0.25743
	1.50			0.24134
	1.40			0.22525
	1.30			0.20916
	1.20			0.19302
	1.10			0.17698
	1.00			0.16089
	0.98			0.15768

Çizelge 7.17 ve Çizelge 7.18’de düşey denge limit durumunda (Z_v), 0.5 metre boru çapı için minimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.154159 iken maksimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.263463, 0.5 metre boru çapı için minimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.154159 iken maksimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.263463, 1.0 metre boru çapı için minimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.156663 iken maksimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.266915, 1.5 metre boru çapı için minimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.157326 iken maksimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.268296, , 2.0 metre boru çapı için minimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.157765 iken maksimum Belirsizlik faktörü değerine karşılık Z_v değeri 0.268691 olduğu gözlemlenmiştir.

Hendekli boruların düşey dengesi, Z_v , Çizelge 7.19 ve çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.19. Gömülü borularda düşey denge değerleri

Boru çapı, D (m)	Belirsizlik faktörü (γ_{sc})	Pik düşey kuvvet F_z (N/m)	Boru batık ağırlığı, w_s (N/m)	Toplam azaltma (reduction) katsayısı $r_{tot,i} = r_{per,i} r_{pen,i} r_{tr,i}$	Boru düşey denge değerleri, Z_v
0.5	0.98	144.1372	1305.304	0.7	0.108216
	1	123.5462		0.6	0.094649
	1.1	102.9552		0.5	0.086762
	1.2	82.36412		0.4	0.075719
	1.3	61.77309		0.3	0.061522
	1.4	41.18206		0.2	0.04417
	1.5	20.59103		0.1	0.023662
	1.6	10.29552		0.05	0.01262
	1.67	5.147758		0.025	0.006586
1.0	0.98	288.2744	2576.624	0.7	0.109643
	1	247.0924		0.6	0.095898
	1.1	205.9103		0.5	0.087906
	1.2	164.7282		0.4	0.076718
	1.3	123.5462		0.3	0.062334
	1.4	82.36412		0.2	0.044752
	1.5	41.18206		0.1	0.023974
	1.6	20.59103		0.05	0.012786
	1.67	10.29552		0.025	0.006673

Çizelge 7.20. Gömülü borularda düşey denge değerleri

Boru çapı, D (m)	Belirsizlik faktörü (γ_{sc})	Pik düşey kuvvet F_z (N/m)	Boru batık ağırlığı, w_s (N/m)	Toplam azaltma (reduction) katsayısı $r_{tot,i} = r_{per,i} r_{pen,i} r_{tr,i}$	Boru düşey denge değerleri, Z_v
1.5	0.98	432.4116	3847.909233	0.7	0.110128
	1	370.6385		0.6	0.096322
	1.1	308.8655		0.5	0.088295
	1.2	247.0924		0.4	0.077058
	1.3	185.3193		0.3	0.062609
	1.4	123.5462		0.2	0.04495
	1.5	61.77309		0.1	0.024081
	1.6	30.88655		0.05	0.012843
	1.67	15.44327		0.025	0.006702
2.0	0.98	576.5489	5119.194	0.7	0.110372
	1	494.1847		0.6	0.096536
	1.1	411.8206		0.5	0.088491
	1.2	329.4565		0.4	0.077229
	1.3	247.0924		0.3	0.062748
	1.4	164.7282		0.2	0.04505
	1.5	82.36412		0.1	0.024134
	1.6	41.18206		0.05	0.012871
	1.67	20.59103		0.025	0.006717

Gömülü olmayan boru için (0.5 m boru çapı kullanıldığında) kaldırma kuvveti değeri ($F_L=305$ N/m) aynı şartlar altında gömülü borular için hesaplanırken azaltma (reduction) katsayıları ile çarpılır. Hendek açısı, hendek derinliği, zeminin geçirimsizliğine vb. koşullara bağlı olarak kaldırma kuvveti değerinde düşüş görülmüştür. Gömülü borularda Kuelegan Carpenter sayısı ($KC = \frac{U_m T}{D}$) sabit alınırsa: dalga/akıntı hız oranının yükselmesiyle hem yatay hem de düşey yöndeki katsayıların (C_Y ve C_Z) arttığı gözlemlenmiştir.

Yatay yöndeki pik (en uç değer) kuvveti gömülü olmayan boru tasarımında ayrı ayrı olarak hesaplanan atalet ve sürükleme kuvvetlerinin toplamına eşittir. Hendek açısı, hendek derinliği, zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak kaldırma kuvvetinde olduğu gibi yatay pik (en uç değer) kuvvetinde düşüş görülmüştür.

Yatay yönde azaltma katsayıları : batmadan dolayı kuvvet azaltma (reduction) katsayısının en küçük değeri 0.3, en büyük değeri ise 1.0'dir. Hendekli boru tasarımı hendeğin açısı 15 derece için benzeşim yapıldığında hendeğin azaltma katsayısının en küçük değeri 0.68 iken, en büyük değeri 1.0 olduğu görülmüştür. Hendek açısı 45 derece olduğunda en büyük azaltma katsayısı değeri 1.0 (sabit olduğu), en küçük azaltma katsayısının da 0.68'den 0.58'e düştüğü gözlemlenmiştir.

Düşey yöndeki azaltma katsayıları : batmadan dolayı kuvvet azaltma (reduction) katsayısı yatay yönde en küçük değeri 0.2, en büyük değeri ise 1.0'dir. Hendekli boru tasarımı hendeğin açısı 45 derece için benzeşim yapıldığında azaltma katsayısının en küçük değeri 0.65, en büyük değeri 1.0 olarak elde edilmiştir. Hendek açısı 45 derece için benzeşim yapıldığında en büyük azaltma katsayısı değeri 1.0 (sabit olduğu), en küçük azaltma katsayısının da 0.65'den 0.35'e düştüğü görülmüştür.

Batmadan dolayı azaltma (reduction) katsayısının doğrudan borunun batma derinliğinin boru çapı oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Batma derinliği/boru çapı oranının artması, batmadan dolayı azaltma (reduction) katsayılarının (hem düşey hem de yatay yöndeki) değerlerinde düşüşe neden olmuştur.

Hendekli borularda, hendeğin kuvvet azaltma (reduction) katsayılarının (hem düşey hem de yatay) borunun hendeğin derinliği ile doğru orantılı şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Açının değerinin artması ile azaltma katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. 15 derecede düşey yöndeki azaltma katsayısı ile yatay yöndeki değeri arasındaki fark 0.025, 45 derecede ise 0.2 mertebesinde.

Azaltma katsayıları (hendeğin azaltma katsayısı, batma azaltma katsayısı, zemin geçirimsizlik katsayısı) çarpılıp toplam azaltma katsayısı elde edildikten sonra, kuvvet değerleri (hem düşey hem yatay) elde edilir. Bu kuvvet değerleri açındaki boru kuvvetlerine kıyasla daha düşüktür. Dolayısıyla, gömülü boruların benzeşim risk değerleri boru daha korunaklı olduğundan düşüktür (Çizelge 7.15- 7.19).

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Su, doğal gaz, petrol ve karbondioksit gibi akışkanların büyük miktarlarda ve uzun mesafelerde iletimi ile örneğin buhar, etilen, süt, şarap, cıva gibi akışkanların küçük miktarlarda ve kısa mesafelerde iletimi boru sistemleri ile gerçekleştirilir. Bu sistemlerin tasarımında belirlenimci (deterministik) ve istatistiksel yöntemler uygulanır ve farklı ülkelerin standartları (DNV-RP-E305, DNV-RP-F109 vb.) kullanılır. Risk analizi; güvenilirliğin sağlanması, çevre kirliliği ve boru tasarım endüstrisinin finansal riskleri gibi konuların önemi artmıştır. Boruların risk açısından değerlendirilmesi yatay ve düşey yöndeki yer değiştirmelere bağlı olarak incelenir. Düşey ve yatay yöndeki yer değiştirmelerin fazla olması borulardaki basınç dayanımının aşılmasına neden olur. Deniz tabanındaki topoğrafyadan dolayı boruların yerleşiminde serbest açıklık meydana gelirse boru etrafında dalga ve akıntının etkisiyle oyulmalar meydana gelir. Dirsekli ve valfli borular hareketi engellediğinden sistemin serbestlik derecesi değişir, risk analizi boruların sistem değerlendirmesinde önemli hale gelir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda deniz tabanındaki boruların dengesi deneysel, numerik ve istatistiksel benzeşimler ile matematiksel modeller kullanılarak irdelenmiştir. Bu çalışmalar çoğunlukla zemin boru etkileşimi üzerinedir ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Boruların tasarımı için standartlarda, örneğin 1988 yılında yayımlanan DNV-RP-E305 ve 2010 yılındaki yeni sürümü DNV-RP-F109'de üç farklı risk değerlendirmesi içermektedir: Dinamik, Genelleştirilmiş ve Statik. Risk analizlerinde Birinci Derece Güvenirlik Yöntemi (First Order Reliability Method - FORM) ve İkinci Derece Güvenirlik Yöntemi (Second Order Reliability Method -SORM) kullanılmıştır ve bu yöntemlerde limit durum fonksiyonun belirlediği denge yüzeylerinin orijinden olan uzaklığı sistemin güvenilirliğini tanımlamıştır. Monte Carlo Benzeşimi (MCB) kullanılarak yapılan çalışmalarda boru sisteminin üzerine gelen yükler altındaki dengesini ifade eden limit durum fonksiyonundaki değişkenler standart olasılık dağılımları ile benzeştirilmiştir.

Bu çalışmadaki amaç, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak deniz tabanındaki boruların hem düşeyde hem de yataydaki yer değiştirme risklerini değerlendirerek, boruların taşıdığı farklı hammaddelerin boru dengesi üzerine olan etkisini ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışmada, boru et kalınlıklarının güvenilirlik üzerine etkisi hassasiyet

analizi ile irdelenmiştir. Monte Carlo Benzeşimi, FORM ve SORM yöntemlerinden farklı olarak hassasiyet çalışmasını ortaya koymakta değişik olasılık dağılımlarının etkisini de hesaba katmaktadır. FORM ve SORM yöntemleri, orijinden tasarım noktasına olan uzaklığın etkisini Hasofer Lind (HL) Güvenirlik İndisi ile ortaya koyduğundan bu çalışmadaki gibi bir hassasiyet analizini desteklememektedir. Bu tez çalışması, Monte Carlo Benzeşiminin kullanıldığı diğer çalışmalardan farklı olarak, literatürdeki değişik yıkılma olasılıkları hesaplarının ve sonuçlarının tasarıma olan etkisini değerlendiren özgün bir çalışmadır.

Literatürdeki risk analizlerinde riskin seviyesi DNV-RP-H101 standardında düşük, orta ve yüksek risk seviyesi olmak üzere tanımlanmıştır. Belirtilen standartlarda daha çok zemin ve boru etkileşimi üzerinde durulurken, bu tez çalışmasında dalga ve akıntı etkisi birlikte irdelenmiştir. Bu tez çalışmasının özgün yönü, dalga parametrelerine bağlı olarak risk seviyelerinin irdelenmesi ve yıllık yıkılma olasılığının Türkiye’den bir saha uygulaması ile desteklenmesidir. Limit durum fonksiyonlarının MCB ile bulunan negatif olasılıkları denge durum yüzeyinin altında kalan bölgeyi tanımladığından yıllık yıkılma olasılığını vermektedir. Bu tez çalışması sonucundaki önerim, boru sistemlerinin bütünü düşünüldüğünde, MCB sonucunda bulunan olasılığın tanım olarak borunun münferit olarak yer değiştirmesini, başka bir deyişle deplasman limitinin aşılma olasılığını ifade etmesidir. Dolayısı ile limit durum fonksiyonları toptan göçme olarak değil, servis seviyesinin aşılmasını (serviceability limit state) benzeştirmektedir. Tezimde ortaya koyduğum tüm olasılık değerleri bu bağlamda tartışılmalıdır. Bundan sonraki çalışmalarda farklı göçme senaryolarına bağlı olarak bu tanım değiştirilebilir ve Türkiye’deki tasarımlar için farklı olasılık (risk) seviyeleri yapının önemine göre DNV standartlarında olduğu gibi Seviye I,II ve III olarak önerilebilir. Özellikle BOTAŞ gibi kuruluşlar açısından risk değerlendirme çalışmaları önem taşıyacağından bu alanda tez çalışmam yeni bir bakış açısı getirecektir. Elde ettiğim sonuçlar şunlardır:

Benzeşimde kaldırma kuvvetinin etkisi ve kaldırma kuvvetini etkileyen parametreler;

- 1) 0.5 metre çaplı boru kullanılarak yapılan tasarım için kaldırma kuvvetinin değişimine bakıldığında: bu kuvvetin minimum değerinin 43.90 N/m, ortalama değeri 196.562 N/m, maksimum değeri 453.167 N/m ve standart sapması 53.671 N/m olduğu

gözlemlenmiştir. Duyarlılık grafiği incelendiğinde kaldırma kuvvetini etkileyen parametrelerin sırasıyla yaklaşım açısı (kosinüs) %90,8, akıntı hızı %6.5, dalga hızının %3 ve boru çapının (%0.3) oranında doğru orantılı etkilediği gözlemlenmiştir.

- 2) 1 metre çaplı boru kullanılarak yapılan tasarım için kaldırma kuvvetinin değişimine bakıldığında: bu kuvvetin minimum değerinin 46.43 N/m, ortalama değerinin 390.344 N/m, maksimum değerinin 929.248 N/m ve standart sapmasının 105.496 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık grafiği incelendiğinde kaldırma kuvvetini etkileyen parametrelerden biri olan yaklaşım açısı (kosinüs) %91.2 değerine yükseldiği, akıntı hızı duyarlılık grafiğinde yüzdelik olarak bir önceki boru çapıyla kıyaslandığında %6.2 değerine düştüğü ve dalga hızının etkisi %1 oranında artarak %4 değerine eriştiği ve risk analizinde doğru orantılı etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca 1m boru çapı için borunun çapının etkisi duyarlılık grafiğinde görülmemiştir. 0.5 metre boru çapı için az da olsa etkisi gözlemlenmişti.
- 3) 1.5 metre çaplı boru kullanılarak yapılan tasarım için kaldırma kuvvetinin değişimi incelendiğinde: bu kuvvetin minimum değerinin 89.15 N/m, ortalama değerinin 587.46 N/m, maksimum değerinin 1413.04 N/m ve standart sapmasının 2161.16 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık grafiği incelendiğinde kaldırma kuvvetini etkileyen parametrelerden açı parametresinin %0.5 oranında azalarak %91.7, akıntı hızının %0.2 azalarak %5.8'e ve dalga hızının da %0.1 oranında azalarak %0.2 değerinde doğru orantılı etkilediği gözlemlenmiştir.
- 4) 2 metre çaplı boru kullanılarak yapılan tasarım için kaldırma kuvvetinin değişimine bakıldığında: bu kuvvetin minimum değerinin 181.521 N/m, ortalama değerinin 786.273 N/m, maksimum değerinin 1793.409 N/m ve standart sapmasının 212.379 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık grafiği incelendiğinde kaldırma kuvvetini etkileyen parametrelerden faz açının %0.9 oranında artarak %92.1'e, akıntı hızının %0.6 azalarak %5.6'ya ve dalga hızının da %0.3 oranında azalarak %0.1 değeri kadar doğru orantılı etkilediği gözlemlenmiştir.

Benzeşimde atalet kuvvetinin etkisi ve atalet kuvvetini etkileyen parametreler;

- 1) Atalet kuvvetinin Monte Carlo Benzeşimlerinde: 0.5 metre çaplı boruda faz açısı (sinüs) değişkeninden %84.7, atalet sabitinden %9.1, ivme değerinden %5.8 ve boru çapından %0.2 oranında doğru orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. Atalet kuvvetinin minimum değeri -30.684 N/m, ortalama değeri 77.564 N/m, maksimum değerinin

232.85 N/m ve standart sapma değerinin 31.09 N/m olduğu gözlemlenmiştir.

- 2) Atalet kuvveti 1 metre çaplı boruda faz açısı (sinüs) değişkenin %1.2 artarak %85.9'a, atalet sabiti %1.9 düşerek %8'e, ivme değeri %5.8'den %6.7 değerine ve çap değeri bir önceki değere göre %0.2 değerinden %0.1 değerine düştüğü ve doğru orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. Atalet kuvvetinin minimum değeri -241.96 N/m, ortalama değeri 309.908 N/m, maksimum değerinin 796.701 N/m ve standart sapma değerinin 121.925 N/m olduğu görülmüştür.
- 3) Atalet kuvveti 1.5 metre çaplı boru faz açısı (sinüs) değişkenin parametresinden %0.2 artarak %85.4'a, atalet sabiti %0.4 azalarak %8.1'e, ivme değeri %6.1 değerinden %6.3 değerine çıkmış ve çap değerinden artık etkilenmediğini ve bunun karşılığında suyun yoğunluğundan %1 ve çeliğin yoğunluğundan az da olsa doğru orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. Atalet kuvvetinin minimum değeri -477.87 N/m, ortalama değeri 1241.36 N/m, maksimum değerinin 3726.08 N/m ve standart sapma değerinin 492.01 N/m olduğu gözlemlenmiştir.
- 4) Boru çapı 2 metre kullanıldığında ise: faz açısı (sinüs) değişkenin %0.7 azalarak %85.2'a, atalet sabiti %0.5 artarak %8.5'a, ivme değeri %6.7 değerinden %6.1 değerine düşmüş ve çap değerinden artık etkilenmediğini ve bunun karşılığında suyun yoğunluğundan %1 oranında pozitif yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Atalet kuvvetinin minimum değeri -228.84 N/m, ortalama değeri 697.48 N/m, maksimum değerinin 2256.26 N/m ve standart sapma değerinin 275.94 olduğu gözlemlenmiştir.

Benzeşimde sürüklenme kuvvetinin etkisi ve sürüklenme kuvvetini etkileyen parametreler;

- 1) Bir diğer önemli kuvvet parametresi olan sürüklenme kuvvetinin farklı çaplı borular kullanıldığında boruya etkileyen sürüklenme kuvvetinin değişimi ve duyarlılık değerleri benzeşimlerden elde edilmiştir. 0.5 çaplı boru kullanıldığında sürüklenme kuvvetinin minimum değeri 36.45 N/m, ortalama değeri 151.605 N/m, maksimum değeri 330.195 N/m ve standart sapması 41.26 N/m'dir. Duyarlılık değerlerine bakıldığında ise: dalga geliş açısından %90.5, akıntı hızından %6.5, dalga hızından %3, sürüklenme sabitinden %0.3 oranında doğru orantılı olarak etkilendiği gözlemlenmiştir.
- 2) 1 metre çaplı boru kullanıldığında sürüklenme kuvvetinin minimum değerinin 71.01 N/m, ortalama değerinin 305.19 N/m, maksimum değerinin 679.302 N/m ve standart sapma değerinin 81.563 N/m olduğu görülmüştür. Duyarlılık değerlerine bakıldığında: dalga geliş açısından bir önceki (0.5 metre boru çapı için) değerin %0.4 artarak %90.9, akıntı

hızı %6.5'ten %6.2'ye düşmüş, dalga hızı %1 artarak %4 değerine ulaştığı, sürüklenme sabitinden %0.3 (etkilenmediği) ve bu değişken değerlerinden sürüklenme kuvvetinin doğru orantılı etkilendiği gözlemlenmiştir.

- 3) 1.5 metre çaplı boru kullanıldığında sürüklenme kuvvetinin minimum değerinin 133.22 N/m, ortalama değerinin 454.218 N/m, maksimum değerinin 1133.64 N/m ve standart sapma değerinin 124.33 N/m olduğu görülmüştür. Duyarlılık değerlerine bakıldığında: dalga geliş açısı parametresi bir önceki (1 metre boru çapı için) değer %0.4 azalarak %90.5, akıntı hızı %6.2'den %5.8'e düşmüş, dalga hızı %2 azalarak %2 değerine, sürüklenme sabitinden %0.3 (etkilenmediği) benzeşimler sonucunda elde edilmiş ve bu değerlerden (akıntı hızı, dalga hızı, açı vb.) sürüklenme kuvvetinin doğru orantılı etkilendiği gözlemlenmiştir.
- 4) 2 metre çaplı boru kullanıldığında sürüklenme kuvvetinin minimum değerinin 95.65 N/m, ortalama değerinin 607.98 N/m, maksimum değerinin 1521.357 N/m ve standart sapma değerinin 166.165 N/m olduğu görülmüştür. Duyarlılık değerlerine bakıldığında: dalga geliş açısı parametresinden %92.1, akıntı hızından %5.6, dalga hızından %1, sürüklenme sabitinden %0.1 (%0.2 oranında azalma gözlemlendiği) ve bu değişken değerlerinden sürüklenme kuvvetinin doğru orantılı etkilendiği gözlemlenmiştir.

Benzeşimde temas kuvvetinin etkisi ve temas kuvvetini etkileyen parametreler;

- 1) Boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvveti incelendiğinde; diğer kuvvetlerden farklı olarak (borunun batık ağırlığı ve kaldırma kuvveti ile ilintili) $F_c = w_s - F_L$ bileşenlerini içerir. Bu nedenle benzeşimlerde, bazı parametrelerden ters, bazı parametrelerden de doğru orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. 0.5 metre çaplı boru için, temas kuvvetinin minimum değeri 561.394 N/m, ortalama değeri 1061.91 N/m, maksimum değeri 1517.270 N/m ve standart sapması 124.982 N/m'dir. Duyarlılık tablosunda ise: borunun et kalınlığından %74.6, çelik borunun yoğunluğundan %9, kaplama kalınlığından %3.1 oranında doğru orantılı, %14.7 yaklaşım açısından (kosinüs), %1 akıntı hızından ve %0.6 dalga hızından ters orantılı olarak etkilendiği gözlemlenmiştir.
- 2) 1 metre çaplı boru kullanılıp benzeşimler yapıldığında, düşey temas kuvvetinin minimum değerinin 1057.06 N/m, ortalama değerinin 2092.388 N/m, maksimum değerinin 2975.88 N/m ve standart sapma değerinin 243.22 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık tablosunda ise: borunun et kalınlığından %74.6'dan %72.1 değerine düştüğü, çelik borunun yoğunluğunun %7 azalarak %2 değerine düştüğü, kaplama kalınlığı oranı

%0.5 artarak %3.6 değerine ulaştığı ve doğru orantılı bu değerlerden etkilenirken , %2.2 artarak %16.9 dalga geliş açısı parametresinden, %0.5 akıntı hızından, %0.4 dalga hızından ters orantılı etkilendiği gözlemlenmiştir.

- 3) Boru çapı 1.5 metreye çıkartılan boru için benzeşim yapıldığında, düşey temas kuvvetin minimum değerinin 1695.294 N/m, ortalama değerinin 3118.611 N/m, maksimum değerinin 4455.930 N/m ve standart sapma değerinin 364.684 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık tablosunda ise: borunun et kalınlığı etki değerinin %72.1'den %73.2 yükseldiği, çelik borunun yoğunluğunun %2 değerinden %1 değerine düştüğü, kaplama kalınlığı oranı %0.8 düşerek %2.8 değerine ulaştığı ve doğru orantılı şekilde bu değerlerden etkilenirken negatif yönde ise, %16.9 dalga geliş açısı parametresinden, %0.1 akıntı hızından, %0.7 dalga hızından etkilendiği görülmüştür.
- 4) 2 metre çaplı boru kullanılarak benzeşim yapıldığında, düşey temas kuvvetin minimum değerinin 2454.82 N/m, ortalama değerinin 4150.38 N/m, maksimum değerinin 5898.396 N/m ve standart sapma değerinin 482.345 N/m olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık tablosunda ise: borunun et kalınlığından %72.9, çelik borunun yoğunluğundan %5, kaplama kalınlığı oranı %2.6 doğru orantılı şekilde etkilenirken ters orantılı şekilde ise, %16.9 dalga geliş açısı parametresinden, %2 akıntı hızından, %0.6 dalga hızından etkilendiği gözlemlenmiştir.

Benzeşimde zemin pasif direnci kuvvetinin etkisi ve zemin pasif direnci kuvvetini etkileyen parametreler;

Zemin pasif direnci; ks değerine, borunun batma miktarına, boru çapına ve boru ile zemin arasındaki düşey temas kuvvetine bağlıdır. Ks değeri 0.5m boru çapı için 6.25, 1m boru çapı için 8.54, 1.5m boru çapı için 13.11, 2m boru çapı için ise 17.708 değerlerini almıştır. $D = 2.67m$ için artık borunun tasarımı için kullanılan Eşitlik 3.31.'teki ilk denklem geçerliliğini yitirip $K_s > 26.7$ olduğundan ikinci denklem kullanılmaktadır.

- 1) Zemin pasif direnci 0.5 metre boru çapı için, minimum değeri 52.678 N/m, ortalama değeri 97.481 N/m, maksimum değeri 148.970 N/m ve standart sapması 12.727 N/m'dir. Duyarlılık grafiği incelendiğinde, zeminin pasif direnç kuvvetinin %91.8 oranında borunun batma miktarından, %7.0 kumun birim ağırlığından, %0.3 borunun çapından doğru orantılı şekilde etkilendiği görülmüştür. Suyun yoğunluğu zeminin pasif direncini düşük miktarda (%0.1) ters orantılı şekilde etkilemektedir.

- 2) Boru çapı 0.5 metre artırılarak 1 metre değerine eriştiğinde ise zemin pasif kuvvet direnci: minimum değerinin 78.267 N/m, ortalama değerinin 148.864 N/m, maksimum değerinin 227.131 N/m ve standart sapma değerinin 19.454 N/m olduğu görülmüştür. Olaya duyarlılık açısından bakıldığında ise: zeminin pasif direnç kuvvetinin %91.8'ten %91.1 düşerek borunun batma miktarından, %5.5 kumun birim ağırlığından, çeliğin yoğunluğundan %0.1 oranında doğru orantılı etkilenirken; dalga geliş açısı parametresinden %0.7 oranında ters orantılı zeminin pasif direncini etkilediği görülmüştür. Bu durumdan şu sonuç çıkartılabilir. Borunun çapı arttığında açının negatif yöndeki etkisi artmaktayken suyun yoğunluğundan olumsuz yönde etkilenmediği gözlemlenmiştir.
- 3) Tasarımda boru çöpu 1.5 metre kullanıldığında zemin pasif kuvvet direncinin minimum değerinin 103.639 N/m, ortalama değerinin 182.202 N/m, maksimum değerinin 283.247 N/m ve standart sapma değerinin 24.504 N/m olarak gözlemlenmiştir. Duyarlılık açısından bakıldığında ise: zeminin pasif direnç kuvveti borunun batma miktarından %91.1 değerinden %87.9 değerine düştüğü, %3 kumun birim ağırlığından, çeliğin boru et kalınlığından %6.3 oranında, çelik yoğunluğundan %3 doğru orantılı etkilenirken; dalga geliş açısı parametresi değerinin %0.7 değerinden %1.3 değerine yükselerek bu oranında ters yönde zeminin pasif direncini etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca kaplama kalınlığının olumlu etkisi az da olsa gözlemlenmiştir (ters orantılı). Boru çapının artması ve boru et kalınlığının sabit kalması, çelik malzemeler için narinliğin etkisi yarattığı için büyük çaplı borularda borunun et kalınlığının önem arz ettiği görülmüştür.
- 4) Boru çapı 2 metre olan boru tasarım benzeşiminde zemin pasif direnç kuvveti incelendiğinde: minimum değerinin 91.271 N/m, ortalama değerinin 200.682 N/m, maksimum değerinin 308.273 N/m ve standart sapma değerinin 28.145 N/m olduğu gözlemlenmiştir. 2 metre boru çapı için benzeşim duyarlılık grafiğine bakıldığında ise: borunun batma miktarından %87.9 değerinden %80.1 değerine düştüğü, %3 kumun birim ağırlığından, çeliğin boru et kalınlığından %6.3 oranında, çelik yoğunluğundan %1.5 oranında, borunun et kalınlığının sapmaya katkı değerinin artarak %13.3 oranında doğru orantılı etkilenirken; dalga geliş açısı parametresi değerinin artarak %6.3 değerinde ters orantılı şekilde zeminin pasif direncini etkilediği gözlemlenmiştir.

Büyük çaplı borularda akıntı ve dalga hızının artması, kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, atalet kuvveti gibi kuvvetlerin ve limit durum fonksiyonunda bu kuvvetleri dengeleyen direnç kuvvetlerinin artmasına neden olur.

Benzeşimde boru batık ağırlığının etkisi ve boru batık ağırlığını etkileyen parametreler;

Boru batık ağırlığı: boru et kalınlığına, çelik ve betonun yoğunluğuna, denizel ortamdaki suyun yoğunluğuna, kaplama kalınlığına ve borunun zemine batma miktarından etkilenmektedir. Bu çalışmada 0,5 metre, 1 metre, 1,5 metre ve 2 metre boru çapları için Monte Carlo Benzeşimleri ile boru batık ağırlığının minimum, maksimum ve ortalama değerleri belirlenmiş, bunların hangi değişkenlerden ne ölçüde etkilendiğini gözlemlemek için duyarlılık analizleri yapılmıştır.

- 1) Buna göre tasarımda 0,5 metre çaplı boru kullanıldığında boru batık ağırlığı için elde edilen değerler: minimum 813,03 N/m, ortalama değer 1258,10 N/m en büyük değer 1670,97N/m ve standart sapma değeri 112.17 N/m elde edilmiştir. Benzeşim duyarlılık grafiğinde: batık ağırlığın boru et kalınlığından %89.9, çelik yoğunluğundan %5.7, kaplama kalınlığından %8, boru çapından %1.2 oranında etkilendiği görülmüştür.
- 2) Tasarımda 1 metre boru çapı kullanıldığında: benzeşimde boru batık ağırlığının en küçük değeri 1717,439978 N/m, ortalama değeri 2483,712443 N/m, en büyük değeri 3376.279744 N/m ve standart sapma değeri 216.9186852 N/m olarak elde edilmiştir. Benzeşim duyarlılık grafiğinde: boru et kalınlığının etkisi %89.9'dan %89.3 değerine düştüğü, çelik yoğunluğu değerinin %0.3 artarak %6 değerine eriştiği, %0.8 olan kaplama yoğunluğu değerinin %0.2 artarak %1 değerine ulaştığı, boru çapı etki değerinin %1.2 değerinden %0.3 değerine düştüğü ve sözü geçen parametrelerden doğru orantılı şekilde etkileniği görülmüştür.
- 3) Boru tasarımında 1.5 metre çaplı boru kullanıldığında benzeşim sonucunda elde edilen boru batık ağırlığının en küçük değeri, ortalama değeri, en büyük değeri ve standart sapma değeri sırasıyla 2427.190343 N/m, 3700.656563 N/m, 4869.067396N/m, 329.183859 N/m şeklinde elde edilmiştir. Benzeşim duyarlılık grafiğinde: boru et kalınlığı %89.9, çelik yoğunluğu %6.3 etkili olmuştur. Kapsama kalınlığı etkisinin diğer boru çaplarında görülmediği, fakat 1.5 metre boru çapında düşük oranda %0.4 etkili olduğu belirlenmiştir. Çelik yoğunluğu değerinin %1'den %0.4 değerine düştüğü ve benzeşimde doğru orantılı şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir.
- 4) Benzeşimde 2 metre boru çapı kullanıldığında, boru batık ağırlığının en küçük değerinin 3278.666721 N/m, ortalama değerinin 4936.302179 N/m, en büyük değerinin 6560.7611 N/m ve standart sapma değerinin 438.0719676 N/m olduğu belirlenmiştir. Benzeşimde elde edilen duyarlılık grafiğinde: boru et kalınlığı %89.4, çeliğin

yoğunluğu %6.6, kaplama kalınlığı %0.6, kaplama malzemesinin yoğunluğu %0.2, atalet sabiti (çok düşük) doğru orantılı şekilde benzeşimde etki göstermiştir.

Buna göre küçük çaplı boru tasarımında batık ağırlığın atalet sabiti değerinden etkilenmediği, tasarımda 2 metre boru çapı kullanıldığında atalet sabitinin etkili olduğu görülmüştür. Buradan KC sayısının boru tasarımında önemli bir parametre olduğu sonucuna varılır.

Benzeşimde limit yatay deplasman değerini geçme olasılığının etkisi ve limit yatay deplasman değerini etkileyen parametreler;

Limit yatay deplasman değeri: güvenlik katsayısına, boruya etkiyen sürüklenme kuvvetine, kaldırma kuvvetine, zeminin pasif direnç kuvvetine, sürtünme katsayısına ve borunun batık ağırlığına bağlıdır. Tasarımda 0.5 metre, 1.0 metre, 1.5 metre ve 2.0 metre boru çapları kullanılarak benzeşim yapılmış olup, boru çapı değiştiğinde limit yatay deplasman değerini ne kadar değiştirdiği, hangi değişkene doğru orantılı şekilde duyarlı ya da hangi değişkene ters orantılı şekilde duyarlı olduğunu anlamak için benzeşim duyarlılık analizleri yapılmış, sonuçlar duyarlılık grafikleriyle değişen boru çapları için sunulmuştur.

- 1) Tasarımda 0.5 metre çaplı boru kullanıldığında limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı %0.32 olarak elde edilmiştir. Benzeşim duyarlılık grafiğinde dalga yaklaşım açısı değerinden (kosinüs %59.1), dalga faz açısı değerinden (sinüs %9.6), güvenlik kalibrasyon katsayısından (Belirsizlik faktörü değeri) %13.8 ters orantılı şekilde limit durum fonksiyonunu etkilediği görülmüştür. Zeminin sürtünme katsayısının %3 oranında doğru orantılı şekilde limit durum fonksiyonunun değişkenliğini etkilediği gözlemlenmiştir.
- 2) Tasarımda 1.0 metre çaplı boru kullanıldığında limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı %3.91 olarak benzeşimden elde edilmiştir. Dalga yaklaşım açısı %40.6 (değişim yok), dalga faz açısı %25 (değişim yok), güvenlik katsayısı %13.8'den %13.3 değerine düşerek etkili olmuştur. Atalet sabitinin değişkenliğe katkı grafiğinde (bir önceki boru çapında etkisi gözlemlenmemiştir) %3 oranında katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Akıntı hızının katkısı %4.2'den %2.6 değerine düşmüştür. Belirgin ivme değeri %1 oranında ters orantılı şekilde limit durum fonksiyonunu etkilemiştir.

Değişkenliğe katkı yüzdeleri sadece boru et kalınlığında (%8.8) doğru orantılı şekilde limit durum fonksiyonunun değişkenliğini etkilemiştir.

- 3) Boru çapı 0.5 metre artırılıp tasarımda 1.5 metre çaplı boru kullanıldığında benzeşim sonucunda limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı %17.29 olarak elde edilmiştir. Boru çapının artmasıyla dalga geliş açısının duyarlılığa katkısı (0.5 ve 1.0 metre boru çapında) ters orantı yüzde değerinin diğer değişkenlere göre daha fazla (yüzdesi en fazla) olduğu görülmüştü. 1.5 metre boru çapında dalga geliş açısı duyarlılık grafiğinde %25.7 değerine düşerek azaldığını ve bunun yerine faz açısının katkısı (değişkenler arasında en çok etkileyen) tasarımda en çok duyarlılığa etkisini göstermiştir. Boru çapının artmasıyla KC sayısının azalmasına ve bunun sonucunda da atalet kuvvetinin sürüklenme kuvvetine göre kıyasla daha çok arttığını göstermiştir. Değişkenliğe katkısı bakımından yüzde olarak: faz açısından 36.6, dalga geliş açısı değikeninden 25.7, güvenlik katsayısı değerinden 14.1, atalet sabiti değerinden 4.1, belirgin ivme değerinden 2.9 oranında ters yönde etkilendiği görüldü. Boru et kalınlığı ve sürtünme katsayısı değerlerinden sırasıyla %8.4 ve %1 oranında doğru orantılı şekilde etkisi görülmüştür.
- 4) Tasarımda 1.0 metre çaplı boru kullanıldığında limit yatay deplasman değerini geçme olasılığı %37.86 olarak elde edilmiştir. Dalga geliş açısı değerinin katkısının düştüğü, faz açısı katkısının arttığı, güvenlik katsayısı katkısının azaldığı, atalet sabitinin ve belirgin ivme katkılarının arttığı görülmüştür. Buna göre boru et kalınlığından %7.7, sürtünme katsayısından %0.9 oranında doğru orantılı şekilde etkilenmektedir. Diğer yandan ters orantılı şekilde %48.3 oranında faz açısından, %19.1 oranında dalga geliş açısından, %12.8 oranında güvenlik katsayısından, %4.3 atalet sabitinden, %3.4 belirgin ivme değerinden etkilenmektedir.

Boru düşey dengesi;

Gömülü olmayan boru için (0.5 m boru çapı kullanıldığında) kaldırma kuvveti değeri ($F_L=305$ N/m) aynı şartlar altında gömülü borular için hesaplanırken azaltma (reduction) katsayıları ile çarpılır. Hendek açısı, hendek derinliği, zeminin geçirimsizliğine vb. koşullara bağlı olarak kaldırma kuvveti değerinde düşüş görülmüştür. Gömülü borularda Kuelegan

Carpenter sayısı ($KC = \frac{U_m \cdot T}{D}$) sabit alınırsa: dalga/akıntı hız oranının yükselmesiyle hem

yatay hem de düşey yöndeki katsayıların (C_Y ve C_Z) arttığı gözlemlenmiştir.

Yatay yöndeki pik (en uç değer) kuvveti gömülü olmayan boru tasarımında ayrı ayrı olarak hesaplanan atalet ve sürükleme kuvvetlerinin toplamına eşittir. Hendek açısı, hendek derinliği, zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak kaldırma kuvvetinde olduğu gibi yatay pik (en uç değer) kuvvetinde düşüş görülmüştür.

Yatay yönde azaltma katsayıları : batmadan dolayı kuvvet azaltma (reduction) katsayısının en küçük değeri 0.3, en büyük değeri ise 1.0'dir. Hendekli boru tasarımında hendek açısı 15 derece için benzeşim yapıldığında hendek azaltma katsayısının en küçük değeri 0.68 iken, en büyük değeri 1.0 olduğu görülmüştür. Hendek açısı 45 derece olduğunda en büyük azaltma katsayı değerinin 1.0 (sabit olduğu), en küçük azaltma katsayısının da 0.68'den 0.58'e düştüğü gözlemlenmiştir.

Düşey yöndeki azaltma katsayıları : batmadan dolayı kuvvet azaltma (reduction) katsayısı yatay yönde en küçük değeri 0.2, en büyük değeri ise 1.0'dir. Hendekli boru tasarımında hendek açısı 45 derece için benzeşim yapıldığında azaltma katsayısının en küçük değeri 0.65, en büyük değeri 1.0 olarak elde edilmiştir. Hendek açısı 45 derece için benzeşim yapıldığında en büyük azaltma katsayı değerinin 1.0 (sabit olduğu), en küçük azaltma katsayısının da 0.65'den 0.35'e düştüğü görülmüştür.

Batmadan dolayı azaltma (reduction) katsayısının doğrudan borunun batma derinliğinin boru çapı oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Batma derinliği/boru çapı oranının artması, batmadan dolayı azaltma (reduction) katsayılarının (hem düşey hem de yatay yöndeki) değerlerinde düşüşe neden olmuştur.

Hendekli borularda, hendek kuvvet azaltma (reduction) katsayılarının (hem düşey hem de yatay) borunun hendek derinliği ile doğru orantılı şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Açı değerinin artması ile azaltma katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. 15 derecede düşey yöndeki azaltma katsayısı ile yatay yöndeki değeri arasındaki fark 0.025, 45 derecede ise 0.2 mertebesinde dir.

Azaltma katsayıları (hendek azaltma katsayısı, batma azaltma katsayısı, zemin geçirimsizlik katsayısı) çarpılıp toplam azaltma katsayısı elde edildikten sonra, kuvvet değerleri (hem düşey hem yatay) elde edilir. Bu kuvvet değerleri açtıktaki boru kuvvetlerine kıyasla daha

düşüktür. Dolayısıyla, gömülü boruların benzeşim risk değerleri boru daha korunaklı olduğundan düşüktür (Çizelge 7.15- 7.19). Böylece, Monte Carlo Benzeşiminin geliştirdiğim Excel programı ile riski doğru şekilde tahmin ettiği görülmüştür.

Deterministik tasarımda, deniz tabanındaki boruların tasarımıyla ilgili DNV –RP-E305 ve DNV-RP-F109 gibi tasarım yönetmeliklerinin kullanılması önerilir. Hâlbuki güvenirliliğe dayalı tararımda risk analizi uygulanır ve tasarıma yönelik risk değerleri seviye olarak belirlenir. Benzeşimlerin ortaya koyduğu hassasiyet analizleri, değişkenlerin birbiri ile olan etkileşimini ortaya koyar. Örneğin, dalgadan ve akıntıdan gelen hızlar ters yönde olursa kaldırma kuvvetinin sıfırlanmasına neden olabilir. Dalga tepesinde akıntı ve dalga hızı aynı yöndeyken, dalga çukurunda akıntı ve dalga hızı zıt yönlüdür. Bu etkileşim ancak Monte Carlo Benzeşimlerinde doğada olduğu oranda dikkate alınabilir. Benzer şekilde atalet kuvvetinde bulunan dalga faz açısı, doğa koşullarındaki belirli kombinasyonlarda, sinüs fonksiyonunun ve atalet kuvvetinin sıfır olmasına yol açar. Hâlbuki atalet cismin dış tepkilere verdiği etki olarak bilinir. Monte Carlo Benzeşimleri istatistiksel olarak yapının gerçekten inşa edildiği durumu benzeştirdiğinden, deterministik tasarımda irdelenemeyen tüm koşulların yansıtılmasını sağlayarak daha gerçekçi bir yaklaşım sunar.

Diğer tarafta, bu koşulların değerlendirilmesi maliyeti artıran bir unsur olmaz, çünkü benzeşime ve güvenirliliğe dayalı tasarım, deterministik tasarımın dayattığı güvenlik katsayılarının getirdiği fazla maliyeti (over design) dengeler ve günlük tasarım uygulamalarında değerlendirilmeyen maliyet-risk optimizasyonuna olanak sağlar.

Zemin boru etkileşimi, zeminin türüne ve borunun oturma miktarına bağlı olarak değişen Coloumb sürtünme kuvveti ile tanımlanır. Zeminin pasif direnci saha ölçümlerinde, Coloumb modeline göre daha büyük elde edilmektedir. Risk analizinde zeminin pasif direnç kuvveti, yanal yer değiştirme riski hesaplanırken paydada yer aldığından hassasiyet analizinde, tasarımdaki en önemli parametrelerden biri olduğu görülmektedir.

Zemin türlerine bağlı olarak hesaplanan zeminin pasif direnci borunun batma miktarıyla ilişkili olup belli bir değerden sonra sürekli olarak aynı denklemin kullanılması hata doğurabilir. Nedeni ise zemin davranışının linear olmayışıdır.

Dalga kırılma (sörf) bölgesi tasarımda önem arz etmektedir. Kırılma bölgesinde kırılma etkisiyle oluşan kıyı boyu akıntıları (long shore current) tasarım için kritiktir. Tasarımda

dip akıntılarının sürekliliği sağlamak üzere kıyıya dik yöndeki akıntıları (cross-shore currents) oluşturmaları da kapama derinliğine (closure depth) kadar olan bölgede dikkate alınmalıdır.

Borunun batık ağırlığı risk analizinde etkili olan diğer ana değişkendir. Borunun et kalınlığının artması maliyetin artmasına neden olurken borunun limit durum denge koşuluna olumlu katkı sağlar. Diğer yandan, tasarımda borunun et kalınlığının sabit alınması, borunun çapının artmasına bağlı olarak narinliğe sebebiyet verirken riski de düşürmez. Borunun batık ağırlığı sadece borunun et kalınlığı ile ilişkili olmayıp, boru içinden geçen sıvının yoğunluğunu bağlı olarak değişir. Örneğin borunun içerisinde havanın bulunması borunun en riskli durumu olarak göz önüne alınmalıdır. Boruda suyun kullanılması batık ağırlığın denge durumunda, derinliğe bağlı farklı yoğunluk tabakalarının göz önüne alınmasını gerektirir. Benzer şekilde doğalgaz ya da diğer tür akışkan malzemelerin iletilmesi batık ağırlığın azalmasına ya da artmasına neden olabilir. Batık ağırlık ayrıca zemin ile boru arasındaki temas kuvvetinin hesaplanmasında kullanıldığı için, zeminin pasif direncinin de artmasına bağlı olarak riski etkiler.

Deniz tabanındaki boruların risk analizi; deniz ölçümleri maliyetli olduğundan akıntı ve dalga koşulları ile zeminin davranışının etkileşimini tasarımda irdelemek için gereklidir. Sayısal risk değerlendirilmesi boru sistemlerinin güvenilirliği açısından etkili bir araç olup özellikle gaz endüstrisinde kullanımı önerilir.

Monte Carlo Benzeşiminde varsayımlar tanımlanırken hem dağılımları doğru seçmek hem de seçilen değer aralıklarını doğru tanımlamak gerekir. Örneğin deniz suyu yoğunluğun 1000 kg/m^3 ile 1025 kg/m^3 arasında tanımlanması, denizdeki yoğunluk tabakalarının ve kıyıya yakın tatlı su kaynaklarının etkisini tasarımda değerlendirmeyi sağlar. Akıntı ve dalga hızı gibi parametrelerin hidrodinamik modellerden geldiği şekilde değişken tanımlanması tasarımda prototip koşullarının bire bir yansıtılmasını sağlar.

Oldukça önemli bir yere sahip olan boru tasarımı ve risk analizi boruların tasarımında araştırılacak olan sorunun çözülmesi alternatif olarak tasarım ve risk analizi yaklaşımlarının gelişimine imkân sağlayacaktır.

Denizel ortamın koşulları belirgin olmadığından ve maliyetli çalışmalar gerektirdiğinden Monte Carlo benzeşimi ile ön tasarımının yapılması hem maliyeti optimizasyonu hem de tasarım riskinin değerlendirilmesi açısından uygun bir yöntemdir.

Bu çalışmayı özgün kılan; kullanılan tüm değerlerin sabit olmayışıdır. Örnek verilecek olursa; boru çapının değiştirilmesi dolayısıyla buna bağlı olarak borunun batık ağırlığının sabit olmayışı, akıntı hızının sabit olmaması, dalga hızının sabit olmaması, batma derinliğinin değişmesi, boruya etkiyen kuvvetlerin sabit olmayışı vb gibi bu çalışmada kullanılan tüm parametrelerin değişken olması bu çalışmayı diğerlerinden ayırmıştır.

Risk değerlendirilmesi hem olasılığı hem de olasılığın sonuçlarının değerlendirilmesini kapsamalıdır. Bununla birlikte bu çalışmada çoğunlukla risk analizi üzerinde durulmuştur. Fakat bu çalışma daha sonraki çalışmalar için temel oluşturacaktır. Takip eden çalışmalarda deniz tabanındaki boruların risk analiz değerlendirilmesi, özellikle kaza riskinin (boru hattı üzerinde, dümen kitlenmesi sonucu demir taraması yapan gemi gibi) sonuçlarının katılması önerilir.

Bu tez çalışması, Monte Carlo Benzeşiminin kullanıldığı diğer çalışmalardan farklı olarak, literatürdeki değişik yıkılma olasılıkları hesaplarının ve sonuçlarının tasarıma olan etkisini değerlendiren özgün bir çalışmadır. Bu çalışmada limit durum fonksiyonlarının farklı formları da değerlendirilmiş ve boru tasarımında kullanılacak limit durum fonksiyonlarının farklı matematiksel ifadelerinin sonucu değiştirdiği görülmüştür. Limit durum fonksiyonları, fonksiyonun ifade ediliş şekline (bölüm veya fark) bağlı olarak %10-15 mertebesinde farklı sonuçlar vermiştir. Tez çalışmam endüstriyel boyutlu boruların tasarımına yönelik olup güvenilirliğe dayalı bir Excel programlama dilini içermektedir. Literatürdeki risk analizlerinde riskin seviyesi DNV-RP-H101 standardında düşük, orta ve yüksek risk seviyesi olmak üzere tanımlanmıştır. Belirtilen standartlarda daha çok zemin ve boru etkileşimi üzerinde durulurken, bu tez çalışmasında dalga ve akıntı etkisi birlikte irdelenmiştir. Bu tez çalışmasının özgün yönü, dalga parametrelerine bağlı olarak risk seviyelerinin irdelenmesi ve yıllık yıkılma olasılığının Türkiye’den bir saha uygulaması ile desteklenmesidir. Limit durum fonksiyonlarının MCB ile bulunan kesinlik değeri olasılığı, denge durum altında kalan bölgeyi tanımladığından yıllık yıkılma olasılığını vermektedir. Bu tez çalışması sonucundaki önerim, boru sistemlerinin bütünü düşünüldüğünde, MCB

sonucunda bulunan olasılığın tanım olarak borunun münferit olarak yer değiştirmesini, başka bir deyişle deplasman limitinin aşılma olasılığını ifade etmesidir.

Borunun batık ağırlık gereksinimleri karşıladığından emin olmak için: Basitleştirilmiş ve genelleştirilmiş analizler yardımıyla veya doğrudan batık ağırlığı etkileyen parametre değerlerinin denklemde kullanılmasıdır. Bu iki yöntemle ve benzeşimde kullanılan boru batık ağırlığı değerinin tahkiki yapılmıştır. Benzeşimde kullanılan batık ağırlık hesabı: boru içerisinden geçen malzemenin yoğunluğu, boru çapı, kaplama kalınlığı, borunun etrafını çevreleyen deniz suyunun yoğunluğu dikkate alınarak hesaplanmıştır. Borunun minimum batık ağırlığı değeri basitleştirilmiş ve genelleştirilmiş analizler yardımıyla elde edilir. Örneğin 0.5 metre boru çapı basitleştirilmiş ve genelleştirilmiş analizler kullanıldığında bulunan borunun batık ağırlık değeri 696.4 N/m iken analizde kullanılan boru batık ağırlığın sayısal değeri 1297. 327 N/m olarak hesaplanmıştır. 0.5 metre çaplı boru için minimum değerinin 696.4 N/m olması gerektiği sonucuna varılır. Bu iki yöntemle hem batık ağırlığın yeterliliği (minimum) sağlanmış hem de kontrollü sonuçlar elde etmemize imkan sunmuştur. Basitleştirilmiş ve genelleştirilmiş analizler yardımıyla boru batık ağırlığı hesaplanarak benzeşimde kullanılan değer ile kontrolü sağlanmıştır. Diğer boru çapları (1.0 metre, 1.5 metre ve 2.0 metre) için analizde kullanılan boru batık ağırlığı değerlerinin kontrolü sağlanmıştır.

Uygulamada kullanılan boru çaplarına göre risk seviye önerileri verilmiştir. Bu risk seviyeleri Seviye I, Seviye II ve Seviye III olarak belirlenmiştir. Seviye I yüzde birin altı düşük risk seviyesi, Seviye II (1-10) orta seviyeli risk ve Seviye III (>10) yüksek risk seviyesi olarak ifade edilebilir. Tasarım düşük risk seviyesine göre yapılmalıdır. Hipotez kurmak için yeterli sayıda örneklem çalışması yapılmadığından, gelecek çalışmalarda önerdiğim tasarım aralıklarının verifikasyonunun yapılması önerilir. Bu amaçla, çok sayıda saha verisi bu yöntem ile irdelenmelidir. Bu tez çalışması sonucunda, tasarım riski değerinin on binde 1-5 mertebesinde alınabileceği görülmüştür. Farklı çalışmalarda ve örnek saha uygulamalarında önerilen bu mertebenin doğruluğu tartışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Van den Abeele, F., ve Denis, R. (2012). Numerical modelling ve analysis for offshore pipeline design, installation, ve operation. *Journal of Pipeline Engineering*, 11(4).
2. Gao, F., Jeng, D. S., ve Wu, Y. (2006). Improved analysis method for wave-induced pipeline stability on svey seabed. *Journal of transportation engineering*, 132(7), 590-596.
3. Gao, F. P., Han, X. T., Cao, J., Sha, Y., ve Cui, J. S. (2012). Submarine pipeline lateral instability on a sloping svey seabed. *Ocean Engineering*, 50, 44-52.
4. Gao, F. P., Yan, S., Yang, B., ve Wu, Y. (2007). Ocean currents-induced pipeline lateral stability on svey seabed. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(10), 1086-1092.
5. Rveolph, M. F., Low, H. E., ve Zhou, H. (2007, January). In situ testing for design of pipeline ve anchoring systems. In *Offshore Site Investigation and Geotechnics, Confronting New Challenges ve Sharing Knowledge*. Society of Underwater Technology
6. Van den Abeele, F., ve Vvee Voorde, J. (2011, June). *Stability of Offshore pipelines in Close Proximity to the Seabed*. In Proceedings of the 6th Pipeline Technology Conference, Hannover, Germany.
7. Gomes, M. G. F. M., Pemirs, F. B., ve Line, A. C. F. (1996, January). *Solutions ve Procedures to Assure the Flow in Deepwater Conditions*. In Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, TX (United States).
8. Aljaroudi, A., Khan, F., Akinturk, A., Haddara, M., ve Thodi, P. (2015). Risk assessment of offshore crude oil pipeline failure. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 37, 101-109.
9. Li, X., Chen, G., Zhu, H., ve Zhang, R. (2017). Quantitative risk assessment of submarine pipeline instability. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 45, 108-115.
10. Youssef, B., ve O'Brien, D. (2017, May). *On-Bottom Stability Analysis of Submarine Pipelines, Umbilicals and Cables Using 3D Dynamic Modelling*. In Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA.
11. Pveey, M. D. (1998). Probabilistic models for condition assessment of oil ve gas pipelines. *Ndt ve E International*, 31(5), 349-358.
12. Small, S. W., Tamburello, R. D., ve Piaseckyj, P. J. (1972). Submarine pipeline support by marine sediments. *Journal of Petroleum Technology*, 24(03), 317-322.
13. Gidaspow, D., Li, F., ve Huang, J. (2013). A CFD simulator for multiphase flow in reservoirs ve pipes. *Powder technology*, 242, 2-12.
14. Zhu, Z., ve Du, X. (2016). Reliability analysis with Monte Carlo simulation ve

- dependent Kriging predictions. *Journal of Mechanical Design*, 138(12), 121403.
15. Wang, Z., Huachen, Z., Liu, H., ve Bu, Y. (2015). Static ve dynamic analysis on upheaval buckling of unburied subsea pipelines. *Ocean Engineering*, 104, 249-256.
 16. Kawsar, M. R. U., Youssef, S. A., Faisal, M., Kumar, A., Seo, J. K., ve Paik, J. K. (2015). Assessment of dropped object risk on corroded subsea pipeline. *Ocean Engineering*, 106, 329-340
 17. Youssef, B. S., Cassidy, M. J., ve Tian, Y. (2013). Application of statistical analysis techniques to pipeline on-bottom stability analysis. *Journal of Offshore Mechanics ve Arctic Engineering*, 135(3), 031701.
 18. Lee, O. S., Kim, D. H., ve Choi, S. S. (2006). Reliability of buried pipeline using a theory of probability of failure. In *Solid State Phenomena*, 110, 221-230). Trans Tech Publications.
 19. Shabani, M. M., Taheri, A., ve Daghigh, M. (2017). Reliability assessment of free spanning subsea pipeline. *Thin-Walled Structures*, 120, 116-123.
 20. Slaattelid, H., Myrhaug, D., ve Lambroakos, K. F. (1987, January). *North sea bottom boundary layer study for pipelines*. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
 21. Gao, F. P., Yang, B., Wu, Y. X., ve Yan, S. M. (2006). Steady current induced seabed scour around a vibrating pipeline. *Applied Ocean Research*, 28(5), 291-298.
 22. Bryndum, M. B., Jacobsen, V. B., ve Brve, L. P. (1983, January). *Hydrodynamic forces from wave ve current loads on marine pipelines*. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA.
 23. Veritas, D. N. (2007). On-bottom stability design of submarine pipelines. *Det Norske Veritas (DNV), Oslo, Norway. DNV-RPF109*.
 24. Kang, J., Parker, F., ve Yoo, C. H. (2007). Soil-structure interaction ve imperfect trench installations for deeply buried concrete pipes. *Journal of geotechnical ve geoenvironmental engineering*, 133(3), 277-285.
 25. An, H., Cheng, L., ve Zhao, M. (2011). Numerical simulation of a partially buried pipeline in a permeable seabed subject to combined oscillatory flow ve steady current. *Ocean Engineering*, 38(10), 1225-1236.
 26. White, D. J., ve Cheuk, C. Y. (2008). Modelling the soil resistance on seabed pipelines during large cycles of lateral movement. *Marine structures*, 21(1), 59-79.
 30. Imura, S. (2004). Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement. *Construction ve Building Materials*, 18(6), 469-479.
 31. Muhlbauer, W. K. (2004). *Pipeline risk management manual: ideas, techniques, ve resources*. Oxford: Elsevier.

32. Kishawy, H. A., ve Gabbar, H. A. (2010). Review of pipeline integrity management practices. *International Journal of Pressure Vessels ve Piping*, 87(7), 373-380.
33. Bai, Y., ve Bai, Q. (Eds.). (2005). *Subsea pipelines ve risers*. Oxford: Elsevier.
34. Directorate, N. P. (1990). Regulations concerning implementation ve use of risk analyses in the petroleum activities with guidelines. *Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate*.
35. Brito, A. J., ve de Almeida, A. T. (2009). Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering ve System Safety*, 94(2), 187-198.
36. Clukey, E. C., Jackson, C. R., Vermersch, J. A., Koch, S. P., ve Lamb, W. C. (1989, January). *Natural densification by wave action of sve surrounding a buried offshore pipeline*. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, Houston, USA.
37. Han, Z. Y., ve Weng, W. G. (2011). Comparison study on qualitative ve quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of hazardous materials*, 189(1-2), 509-518.
38. King, T., Phillips, R., Barrett, J., ve Sonnichsen, G. (2009). Probabilistic pipeline burial analysis for protection against ice scour. *Cold Regions Science ve Technology*, 59(1), 58-64.
39. Malekzadeh, R., Henkes, R. A. W. M., ve Mudde, R. F. (2012). Severe slugging in a long pipeline-riser system: experiments ve predictions. *International journal of multiphase flow*, 46, 9-21.
40. Onorato, M., Osborne, A. R., Serio, M., ve Bertone, S. (2001). Freak waves in rveom oceanic sea states. *Physical Review Letters*, 86(25), 5831.
41. Mahdavi, H., Kenny, S., Phillips, R., ve Popescu, R. (2008, January). *Influence of geotechnical loads on local buckling behavior of buried pipelines*. In 2008 7th International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Alberta, Canada.
42. İnternet: DNVGL-ST-F101. (2017). *Submarine pipeline systems*, 8-8. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fimg1.wsimg.com%2Fblobby%2Fgo%2F34c443fd-26d6-4847-82b6-c31392e5b94d%2Fdownloads%2F1c2g8im4v_104651.pdf&date=2018-06-12, Son Erişim Tarihi: 03.06.2018
43. Smith, W. H., ve Svewell, D. T. (1994). Bathymetric prediction from dense satellite altimetry ve sparse shipboard bathymetry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11), 21803-21824.
44. Yan, C., ve Zang, Y. (2010). DPARSF: a MATLAB toolbox for" pipeline" data analysis of resting-state fMRI. *Frontiers in systems neuroscience*, 4, 13.

45. İnternet: Mousselli, A. H. (1981). *Offshore pipeline design, analysis, ve methods*, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.osti.gov%2Fbiblio%2F6581396&date=2018-06-13>, Son Erişim Tarihi: 03.18.2018.
46. Carr, M., Bruton, D., ve Leslie, D. (2003, February). *Lateral buckling ve pipeline walking, a challenge for hot pipelines*. In Offshore Pipeline Technology Conference, Amsterdam.
47. Sreejith, B., Jayaraj, K., Ganesan, N., Padmanabhan, C., Chellapvei, P., ve Selvaraj, P. (2004). Finite element analysis of fluid–structure interaction in pipeline systems. *Nuclear Engineering ve Design*, 227(3), 313-322.
48. Bai, Y. (Ed.). (2001). *Pipelines ve risers*, Oxford: Elsevier.
49. Nguyen, T. T., Kim, D. K., Rho, Y. W., ve Kim, S. B. (2001). *Dynamic modeling ve its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline*. In Computational Intelligence in Robotics ve Automation, 2001. Proceedings 2001 IEEE International Symposium, Banff, Alberta, Canada.
50. Newmark, N. M., ve Hall, W. J. (1975, June). *Pipeline design to resist large fault displacement*. In Proceedings of US national conference on earthquake engineering, Urbana, Illinois.
51. Stephens, D. R., Olson, R. J., ve Rosenfeld, M. J. (1991). *Pipeline monitoring: Limit state criteria*. United States: Elsevier.
52. Yuhua, D., ve Datao, Y. (2005). Estimation of failure probability of oil ve gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(2), 83-88.
53. Sumer, B. M., Fredsøe, J., Christensen, S., ve Lind, M. T. (1999). Sinking/floatation of pipelines ve other objects in liquefied soil under waves. *Coastal Engineering*, 38(2), 53-90.
54. Yuhua, D., ve Datao, Y. (2005). Estimation of failure probability of oil ve gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(2), 83-88.
55. Doğan, Y., ve Durap, A. (2017). Summarizing Data Sets for Data Mining by Using Statistical Methods in Coastal Engineering. *Context*, 61684.

EKLER

(Ekler tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DURAP, Ahmet
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20/09/1990, Birecik
 Medeni hali : BEKAR
 Telefon : 0312 386 10 38
 e-mail : ahmet.durap@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2014
Lise	Bayraktar Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	Armada Danışmanlık	İnşaat Mühendisi
2015-2016	MSD Proje	İnşaat Mühendisi
2014-2015	Üstün Çelik	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Doğan, Y., and Durap, A. (2017). Summarizing Data Sets for Data Mining by Using Statistical Methods in Coastal Engineering. *Context*, 61684.
- Durap, A., ve Doğan, Y. (2015). *İnşaat Mühendisliğinde Bilişim Kavramı ve Veri Madenciliği Algoritmaları ile Bir Uzman Sisteminin Oluşturulması*. Akademik Bilişim Konferansı, Eskişehir.

Hobiler

Tenis



GAZİ GELECEKTİR..