

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖMÜLÜ BETONARME BORULARIN DAVRANIŞI VE
BOYUTLANDIRILMASI

Recep ATASOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Bilge DORAN

Ağustos, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖMÜLÜ BETONARME BORULARIN DAVRANIŞI VE
BOYUTLANDIRILMASI**

Recep ATASOY tarafından hazırlanan tez çalışması 06.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bülent AKBAŞ, Üye

Gebze Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Bilge DORAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Gömülü Betonarme Boruların Davranışı ve Boyutlandırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Recep ATASOY

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi olarak hazırladığım bu çalışmada, toplumda çok önemli bir yer edinmiş, hayatımızı devam ettirmemiz için temel ihtiyaçlarımız olan içme suyu, elektrik, atık su ve benzeri gibi ana unsurları taşımaya, iletmeye aracı olan hatta gözle görünür şekilde olmadıkları için bir nevi hayatımızın sahne arkası ekibi gömülü boruların, statik yükler altındaki davranışı çeşitli parametrelerin değişimine göre incelenmiş ve gömülün boruların tasarımında tasarruf ve hızlanma sağlanması amacıyla çalışma sonucunda bir abak verilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmam süresince değerli vakitlerinden bana da pay veren, tecrübeleriyle bana yol gösteren, araştırmama ve çalışmamı geliştirmeme destek olup ışık tutan Sayın Prof. Dr. Bilge Doran ve Sayın Doç. Dr. Havvanur Kılıç hocalarıma, çalışmamı yürütürken bana olan inançlarından ötürü teşekkür ederim. Arkadaşım Öğr. Gör. Rafet Şişman'a lisans ve yüksek lisans hayatımdaki sürekli desteği için ayrıca teşekkür ederim. Çalışmam süresince zor zamanlarımda, tüm çıkmazlarımda daima yanımda olan yatakhane arkadaşlarıma ve çok değerli aileme teşekkür ederim.

Yüksek lisans hayatıma başlamama vesile olan, vizyonuyla daima yoluma ışık tutan, rahmetli babam Ali Atasoy'a armağanımdır.

Recep ATASOY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	27
1.3 Hipotez	27
2 Gömülü Borular	28
2.1 Gömülü Borular	28
2.1.1 Gömülü Boruların İnşaat Aşamaları	28
2.2 Boru Tipleri	30
2.2.1 Asbestli Çimento Borular	30
2.2.2 Beton Borular	30
2.2.3 Çelik Borular	30
2.2.4 Font Borular	31
2.2.5 Plastik Borular.....	31
2.3 Boru Gömülme Koşulları.....	31
2.3.1 Hendek Durumu.....	31
2.3.2 Pozitif Projeksiyon Durumu.....	32

2.3.3 Negatif Projeksiyon Durumu	32
2.4 Geçmişten Günümüze Gömülü Boruların Tasarım Yöntemleri.....	32
2.4.1 Dolaylı Tasarım Yöntemi.....	32
2.4.2 Doğrudan Tasarım Yöntemi	35
3 Sayısal Örnek	40
3.1 Plaxis2D-2018 Programı ile Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	40
3.2 Yatak Malzemesi ve Geri Dolgu Malzemesinin Rijit Boru Üzerindeki Gerilmelere Etkisi.....	51
3.3 SAP2000 Programı ile Sayısal Modelin Oluşturulması.....	55
3.4 Sayısal Analizden Elde Edilen Sonuçların Geleneksel Yöntemlerle Kıyaslanması	58
3.4.1 Doğrudan Yöntem ile Moment ve Donatı Alanı Hesabı	59
3.4.2 Sayısal Analiz Sonuçları	60
3.4.3 Gerekli Donatı Alanlarının Hesaplanması.....	66
3.4.4 İller Bankası A.Ş Verileri ile Plaxis2D-2018 Donatı Alanlarının Kıyaslanması	67
3.4.5 Moment-Eksenel Kuvvet Karşılıklı Etkileşim Grafiklerinin Oluşturulması ve Kıyaslanması.....	69
4 Sonuç ve Öneriler	75
Kaynakça	77
Tezden Üretilmiş Yayınlar	79

SİMGE LİSTESİ

A_{si}	Donatı Alanı
B_c	Boru Çapı
B_d	Hendek Genişliği
B_f	Yatak Katsayısı
C_n	Eksenel Kuvvet Hesabı İçin Boru Analiz Katsayısı
C_m	Moment Hesabı İçin Boru Analiz Katsayısı
f_c	Beton Mukavemeti
f_y	Donatı Akma Dayanımı
M	Moment
N	Eksenel Kuvvet
V	Kesme Kuvveti
W_c	Toprak Yüğü
ϵ	Şekil Değiştirme

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACPA	American Concrete Pipe Association
AISI	American Iron and Steel Institute
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials
SPIDA	Soil Pipe Interaction Design and Analysis
W_e	Boru üzerindeki toprak yükü
WP	Borunun kendi oluşturacağı yük
WF	Boru üzerindeki akışkan yükü
WL	Boru üzerindeki hareketli yük



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yerleştirme Şartlarına Göre Gömülü Boru Türleri (a) Hendek, (b) Pozitif projeksiyon, (c) Negatif projeksiyon [1]	2
Şekil 1.2 Hendek tipi borularda yataklama sınıfları [1]	3
Şekil 1.3 Boru tiplerine göre şekil değiştirme durumları [1]	3
Şekil 1.4 Farklı boru uzunlukları için sonlu eleman modelleri (a) 2.5cm, (b) 30cm, (c)180cm [2].....	4
Şekil 1.5 Boyuna mesnet uygulanan ve uygulanmayan modellerin düşey yer değiştirmelerinin model uzunluğuna bağlı değişimi [2].....	4
Şekil 1.6 Farklı boru uzunluklarına göre boru üzerinde oluşan çekme gerilmeleri [2]	5
Şekil 1.7 Yatak malzemesi kalınlığının değişimine bağlı çekme gerilmesi azalması [2]	6
Şekil 1.8 Kumlu Silt Zeminde Geri dolgu yüksekliğinin değişimine bağlı çekme gerilmesi davranışı [2]	6
Şekil 1.9 Çakıllı kum zeminde geri dolgu yüksekliğinin değişimine bağlı çekme gerilmesi davranışı [2]	6
Şekil 1.10 Yatak kalınlığı alt ve üst sınırlarına göre boru tabanındaki gerilme arkları (a) 60cm boru çapı, (b) 150cm boru çapı, (c) 210cm boru çapı [2]	7
Şekil 1.11 Pozitif projeksiyon durumunda dolgu yüksekliğinin artmasına bağlı olarak boru tacında oluşan şekil değiştirmeler [3]	9
Şekil 1.12 Boru üzerinde oluşan gerilme, eksenel kuvvet ve moment dağılımları [3]	10
Şekil 1.13 Gömülü boru sistemlerinde gerilme transferi (a) Çelik boru, (b) PVC boru [4]	11
Şekil 1.14 Sonlu eleman modelinin şematik gösterimi, (D= Boru çapı) [4].....	12
Şekil 1.15 Boru çapına bağlı burkulma gerilmelerinin farklı şartnamelere göre kıyaslanması [4]	12
Şekil 1.16 Su seviyesi altında beton zarf içindeki boruya etkileyen su basıncı [5]	13
Şekil 1.17 Su seviyesinin 140 metre altında uzun zamanda boruya etkileyen su basıncı [5]	13
Şekil 1.18 Santrifuj deneyine karşılık gelen 3 boyutlu sayısal model [6]	14
Şekil 1.19 Santrifuj modelinin şematik diyagramları (a) Plan, (b) M-M kesiti, (c) L-L Kesiti [6].....	15

Şekil 1.20 Santrifuj deneyi sonuçları [6]	16
Şekil 1.21 Boru tacındaki yer değiştirmelerin sayısal model ve deney sonuçlarına göre kıyaslanması [6].....	16
Şekil 1.22 Santrifuj modelinin şematik diyagramları (a) Plan, (b) M-M kesiti, (c) L-L Kesiti [7].....	17
Şekil 1.23 Farklı araç hızlarına göre en fazla statik yer değiştirmenin, en fazla dinamik durumdaki yer değiştirmeye oranı [7].....	18
Şekil 1.24 Farklı araç hızlarına göre boru taç kısmındaki zamana bağlı yer değiştirme [7]	18
Şekil 1.25 Gömülü boru etrafındaki basınç dağılımı [8].....	19
Şekil 1.26 Geogrid ve gömülü boruyu gösteren kısmi sayısal model görüntüsü [8]	20
Şekil 1.27 Yük altında geogrid tabakasındaki yer değiştirmeler [8]	21
Şekil 1.28 Zemin göçme anına kadar boru tacındaki basınç değişimi [8]	21
Şekil 1.29 Doğrudan ve dolaylı yöntemin sonuçlarının sayısal model ile kıyaslanması [9].....	22
Şekil 1.30 Kontrol kriterleri (ASCE 15-98).....	23
Şekil 1.31 Beton mukavemet sınıflarına göre dolgu yüksekliğine bağlı olarak gömülü borulardaki donatı alanı değişimi [9]	23
Şekil 1.32 Standart boru yerleştirme terminolojisi [10].....	24
Şekil 1.33 3 Kirişli Deney [11]	26
Şekil 2.1 3 kirişli deney ve boru yükleme durumu [9]	34
Şekil 2. 2 Heger toprak basınç dağılımı [13]	36
Şekil 3.1 (a) Kazı tipi ve (b) basınç ölçerlerin yerleşimi [16]	42
Şekil 3.2 (a) Kazı geometrisinin bilgisayar ortamında çizimi (b) Plaxis-2018 programında kazı modelinin oluşturulması	43
Şekil 3.3 Tasarım Dingil Yükleri [31]	45
Şekil 3.4 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 1.....	45
Şekil 3.5 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 2.....	46
Şekil 3.6 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 3.....	46
Şekil 3.7 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 4.....	47
Şekil 3.8 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 5.....	47
Şekil 3.9 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 6.....	47
Şekil 3.10 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 7	48
Şekil 3.11 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 8.....	48
Şekil 3.12 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 9	48

Şekil 3.13 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 10	49
Şekil 3.14 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 11	49
Şekil 3.15 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 12	49
Şekil 3.16 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 13	50
Şekil 3.17 Kalibrasyonu Yapılmış Sonlu Eleman Modeli Gerilmeler (Analiz adımları 1.Adım=2.Aşama, 2.Adım=4.Aşama, 3.Adım=8.Aşama, 4.adım=13.Aşama)	51
Şekil 3.18 Yatak Malzemesi Değiştirilen Sonlu Eleman Modeli.....	52
Şekil 3.19 Analiz Sonucunda Deforme Olmuş Boru ve Zemin Modeli.....	53
Şekil 3.20 Düşey Yönde Gömülü Boru Etrafında Oluşan Gerilme Dağılımı	53
Şekil 3.21 (a) Orta sıkı kum gerilme sonuçları (b) Sıkı kum gerilme sonuçları (Analiz adımları 1.Adım=2.Aşama, 2.Adım=4.Aşama, 3.Adım=8.Aşama, 4.adım=13.Aşama)	54
Şekil 3.22 Kalınlığı Artırılmış Sıkı Kum Gerilme Sonuçları (Analiz adımları 1.Adım=2.Aşama, 2.Adım=4.Aşama, 3.Adım=8.Aşama, 4.adım=13.Aşama)	55
Şekil 3.23 1B Sayısal Model	56
Şekil 3.24 Boru Üzerine Etkiyen Sürşarj Yüğü.....	56
Şekil 3.25 2B Sayısal Model	57
Şekil 3.26 Alan Yayları.....	57
Şekil 3.27 Gömülü Boru Üzerindeki Toprak Yüğü.....	58
Şekil 3.28 Gömülü Boru Üzerindeki Araç Yüğü	58
Şekil 3.29 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki yer değiştirme dağılımı. 61	
Şekil 3.30 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki eğilme momenti dağılımı	61
Şekil 3.31 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki eğilme momentinin adımlara göre artışı	62
Şekil 3.32 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki eksenel kuvvetin dağılımı	62
Şekil 3.33 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki eksenel kuvvetin adımlara göre artışı.....	63
Şekil 3.34 1B Kiriş Olarak Modellenen Boru Sisteminde Oluşan Eğilme Momenti Dağılımı	63
Şekil 3.35 1 B Kiriş Olarak Modellenen Boru Sisteminde Oluşan Eksenel Kuvvet Dağılımı	64
Şekil 3.36 2 B Alan Eleman Olarak Modellenen Boru Sisteminde Oluşan Eğilme Momenti Dağılımı.....	64

Şekil 3.37 Alan Eleman olarak Modellenen Boru Sisteminde Oluşan Eksenel Kuvvet Dağılımı	65
Şekil 3.38 İller Bankası A.Ş ile Plaxis2D-2018 Boru Çaplarına Göre Gerekli Donatı Alanlarının Kıyaslanması	68
Şekil 3.39 Ø600 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	69
Şekil 3.40 Ø800 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	70
Şekil 3.41 Ø1000 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	70
Şekil 3.42 Ø1200 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	71
Şekil 3.43 Ø1400 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	71
Şekil 3.44 Ø1600 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	72
Şekil 3.45 Ø1800 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	72
Şekil 3.46 Ø2000 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri	73
Şekil 3.47 Boru çapı ve derinliğe bağlı gerekli minimum sarmal donatı alanını gösterir abak	74

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Standart kurulum türleri ve minimum sıkıştırma oranları [10]	25
Tablo 2.1 Kurulum tiplerine göre heger toprak basınç dağılımı katsayıları [13].....	36
Tablo 2.2 4. kurulum tipi için boru analiz katsayıları [13].....	37
Tablo 2.3 Boru üzerindeki dolgu yüksekliğine bağlı araç yükü [14]	38
Tablo 2.4 Dolaylı ve doğrudan yöntemin kıyaslanması [9].....	39
Tablo 3.1 Saha deneyi verileri [16].....	40
Tablo 3.2 Sonlu Eleman Modelinde Kullanılan Zemin Parametreleri.....	44
Tablo 3.3 Boru Taç Kısmında Doğrudan yöntem, Plaxis2D-2018 ve SAP2000-ver.15 Analizi Sonucu Hesaplanan Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması	65
Tablo 3.4 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki momentin derinliğe ve çapa bağlı değişimi	66
Tablo 3.5 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki aksenal kuvvetin derinliğe ve çapa bağlı değişimi	67
Tablo 3.6 Plaxis2D-2018 analizi sonucu gerekli sarmal donatı alanının derinliğine ve çapa bağlı değişimi	67
Tablo 3.7 Çaplarına göre İller bankası Temmuz 2015 onay tarihli günümüzde boru tasarımında kullanılan boru sarmal donatı alanları.....	68

Gömülü Betonarme Boruların Davranışı ve Boyutlandırılması

Recep ATASOY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bilge DORAN

Gömülü borular suyun, enerjinin ve başka kritik araçların taşınmasında kullanılan önemli alt yapı elemanlarıdır. Bir gömülü boru tasarlamamanın ilk adımı boru üzerine etkiyen aşırı yüklenmiş toprak ve hareketli yüklerin hesaplanmasıdır. Gömülü borular bu trafik yükleri ve dolgu ağırlığına dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. İyi derecelendirilmiş siltli kil, yüksek kaliteli iri taneli zeminlerin bulunmadığı veya kentsel alanlardan uzun mesafelere taşımamanın zor olduğu durumlarda alternatif bir dolgu malzemesi olabilir.

Bu çalışmada, literatürden toplanan yüksek kaliteli saha verileri kullanılarak PLAXIS2D-2018 yazılımı aracılığıyla bir beton boru modeli geliştirilmiştir. Kullanılan boru iç çapı 750 mm, dış çapı 930 mm ve kazı derinliği boru çapının 1,1-2,6 katı arasında değişmektedir. Boru rijitliğinin, yükleme ve zemin koşullarının boru üzerinde oluşacak yer değiştirmeye etkisi Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılarak araştırılmıştır. Modelleme yapılırken kullanılan boru kesiti en elverişsiz yayılı trafik yüküne tabi tutulmuştur. Analiz sonucunda çıkan gerilmeler saha verileri ile kalibre edilmiş, yatak malzemesinin boru üzerindeki gerilmelere

etkisi araştırılmıştır. Analiz sonucunda çıkan moment ve aksel kuvvet değerleri SAP2000-ver.15 programı ile iki farklı modelleme tekniği kullanılarak doğrulanmıştır; yapısal analizlerde kullanılan sonlu eleman modeli, yapı-zemin etkileşimini göstermek ve kumlu-killi dolgu koşullarında beton borunun performansını simüle etmek için uygundur. Çalışmanın bir diğer aşamasında farklı boru çapları ve gömme derinlikleri için analizler tekrarlanmış ve sonuçları not edilmiştir. Analiz sonuçları ülkemizde gömülü boruların tasarımında yaygın olarak kullanılan İller Bankası A.ř verileri ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucunda, gömülü boru sistemlerinin uygulanmasında hem zamandan tasarruf hem de ekonomik olması amacıyla, farklı gömme derinlikleri ve çaplara göre boru kesiti için gerekli olan donatı alanları bir abak şeklinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gömülü boru, yatak malzemesi, geri dolgu, kazı, hendek

Behaviour and Detailing of Buried Reinforced Concrete Pipes

Recep ATASOY

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Bilge DORAN

Buried pipes are important infrastructures used to transport water, energy and other critical utilities. The first step in the design of a buried concrete pipe is the determination of the overburden earth and live loads that will act on the pipe installation. They should be designed properly to withstand the loads imposed by the backfill soil weight and traffic loads. Fine-grained silty-clay soil may be an alternative backfill when relative high-quality coarse-grained soil is absent in-situ or difficult to transport from a long-distance away in urban areas.

In this study, a numerical model was developed for concrete buried pipe in low plasticity silty-clay soil using PLAXIS2D-2018 validating design parameters using high-quality field data collected from the literature. The internal diameter of the pipe inner diameter is 750 mm, outer diameter is 900 mm and burial depths varied from 1.1 to 2.6 times the diameter of the pipe. The effect of the pipe stiffness, loading and soil conditions on the maximum displacement of buried pipe has also been investigated using Mohr-Coulomb soil model. A model section was subjected to uniform traffic load, representing a worse case loading scenario. The stresses obtained from the analysis were calibrated with field data and then the effect of bearing material on the stresses on the pipe was investigated. The moment and axial

force values obtained from the analysis were confirmed by SAP2000-ver.15 program using two different modelling techniques; the FE modelling employed in structural analysis is sufficient to simulate the performance of the concrete pipe sand-clay backfill conditions and soil-structure interaction. Further, analyzes were repeated for different pipe diameters and burial depths and the results were noted. The results of the analysis were compared with the data of İller Bankası A.Ş. which is widely used in the design of buried pipes in our country. As a result of this study, reinforcement areas required for pipe section according to different embedding depths and diameters have been presented in order to save time and economy in the implementation of buried pipe systems.

Keywords: Buried pipe, bedding material, backfill, excavation, trench

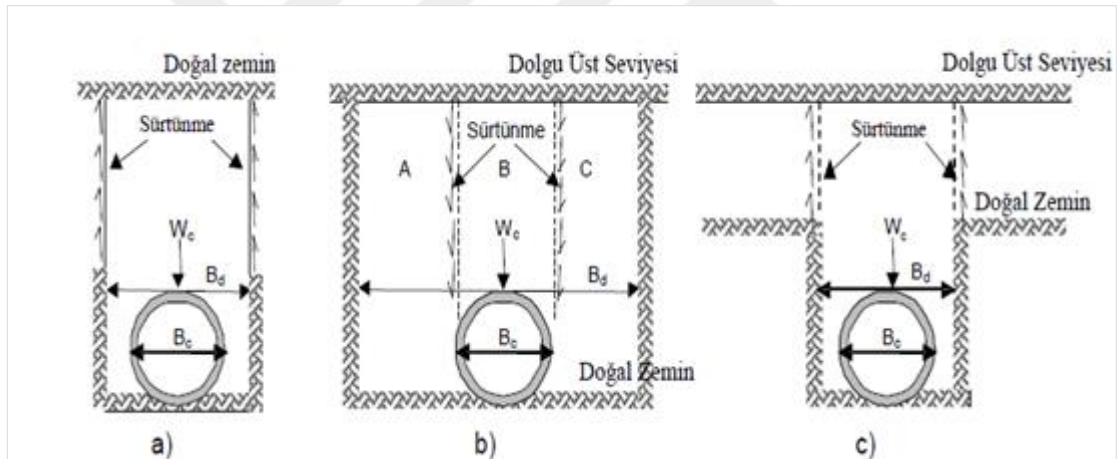
1.1 Literatür Özeti

İçme suyu hatlarının, elektrik hatlarının, haberleşme kablolarının yaşam alanlarımıza gelmesi, atık suların yaşam alanlarımızdan uzaklaştırılması her zaman elzemdir. Bu taşıma işlemlerinin, günlük yaşantımızı etkileyecek şekilde göz önünde yapılması özellikle kalabalık şehirlerde büyük problemler oluşturmuştur. Aynı zamanda göz önündeki taşıma hatları dışarıdan gelebilecek etkilere maruz kaldığı için hatlarda oluşabilecek problem ihtimalleri artmıştır. Bu nedenle anılan taşıma hatları için gömülü boru sistemleri geliştirilmiş, bu sayede hem bu hatların dışarıda oluşturduğu çirkin görüntüye son verilmiş, hem hatlarda darbeye bağlı problem yaşama ihtimali azaltılmış, hem de yer tasarrufu yapılmıştır. Taşıma hatları zemin altına alındığında, yer altı suyundan korunmaları, üzerlerindeki toprak yüküne ve yüzeydeki trafik yüklerine dayanabilmeleri için elastik veya rijit boru sistemleri geliştirilmiştir. Bu boruların cinsi, boyutu, et kalınlıkları taşınan cismin çeşidine ve üzerine etkiyecek olan yük miktarına bağlı olarak değişebilir. Beton borular özellikle içme suyu hatlarında fakat elektrik ve diğer hatların taşınmasında da yaygın olarak kullanılan, sahaya hazır olarak gelen ve montajı kolaylıkla yapılabilen dayanıklı taşıma sistemleridir. Gömülü beton borular taşıma sistemlerinde kullanılırken, betonun sınıfı, beton borunun et kalınlığı, borunun çapı birçok etkene bağlı olarak değişebilmektedir. Bu etkenlerin başında beton borunun üzerine etkiyecek olan yükler gelmektedir. Bu yükler trafik yükü ve zati toprak yükü olarak iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Genellikle beton borular tasarlanırken en elverişsiz durumdaki trafik yükü ve kamyon yüklerine göre hesaplanır ve boru özellikleri belirlenir. Toprak yükünün etkisini değiştiren en büyük etken ise zeminin cinsidir. Boruya etkiyecek olan yük hesaplanırken zeminin parametreleri (birim hacim ağırlığı, içsel sürtünme açısı, kohezyonu, su oranı vb.) oldukça etkilidir. Aynı şekilde boru yatağındaki yani borunun üzerine yerleştirildiği zeminin parametreleri

de boru üzerindeki gerilmelerin değerini büyük oranda etkiler. Bu gerilmeler belirli bir sınıra geldikten sonra boru üzerinde çatlamalar oluşur ve boru kırılabilir. Bu nedenle bazı bölgelerde gömülü boru sistemleri imal edilirken kazı tabanına özel dolgu malzemesi serilir. Aynı Şekilde geri dolgu malzemesinin de yeterli mukavemette olmadığı durumlarda hazır dolgu malzemesi ile borunun üzeri kapatılır.

Trafik yüklerine maruz gömülü boruların gerek statik yükler gerek dinamik yükler altındaki davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu incelemeler başlıca Őöyle sıralanmıştır:

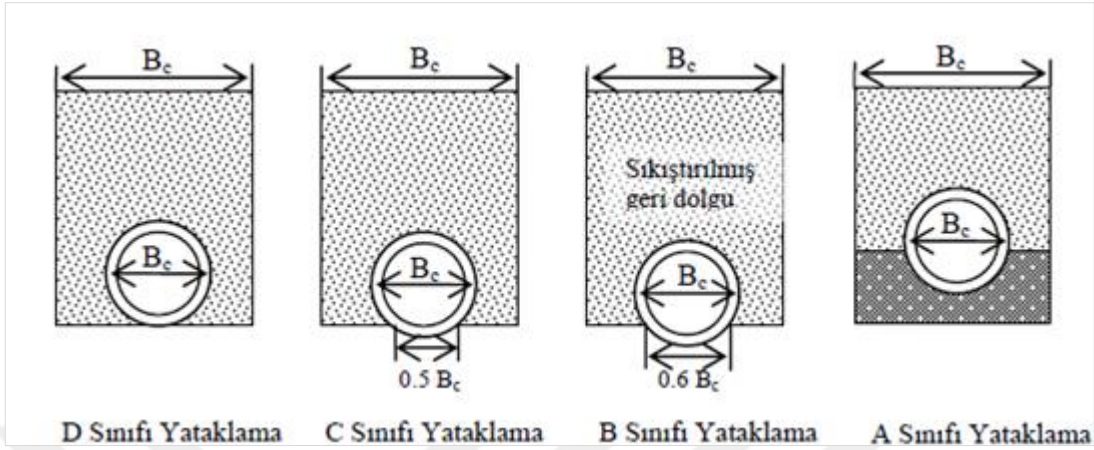
Sağlamer ve Balkaya [1] çalışmalarında gömülü boruların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları hakkında bilgiler vermiş, boru zeminindeki yatak malzemelerinin farklılıklarından bahsetmiştir. Şekil 1.1'de farklı yerleştirme Şartlarına göre boru kurulumları gösterilmiştir.



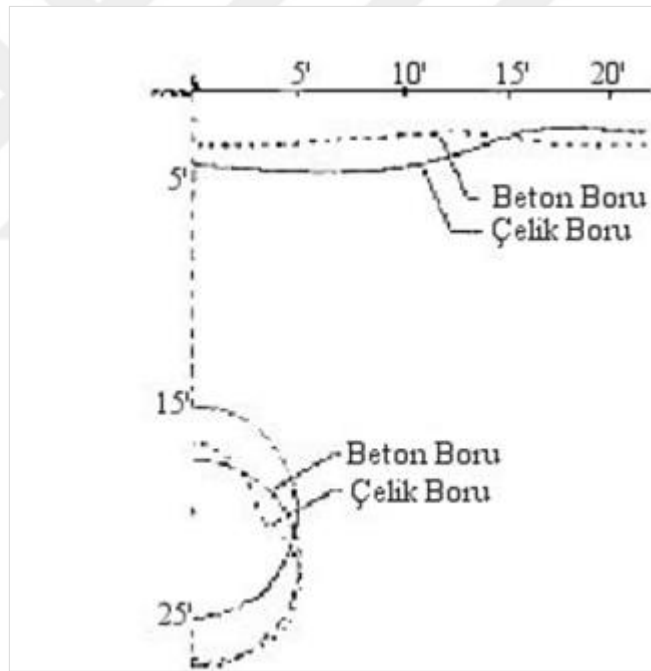
Şekil 1.1 Yerleştirme Şartlarına Göre Gömülü Boru Türleri (a) Hendek, (b) Pozitif projeksiyon, (c) Negatif projeksiyon [1]

Hendek tipi borularda yataklama sınıfları Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Zeminin yapının üzerine etkiteceği basıncı ve zemin kemerlenmesinden dolayı boru üzerindeki basıncın azalacağı belirtilmiştir. Boru tiplerine göre Şekil değiştirme durumları Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Çalışmada depremlerde her ne kadar gömülü boruların üst yapı elemanlarına göre daha az zarar göreceği düşünülse de aslında yakın depremlerin bazılarında su, atık su, elektrik hatlarında oldukça ağır hasarlar meydana geldiğine dikkat çekilmiştir. Çalışmanın sonucunda gömülü boruların iki

ve üç boyutlu analizler yapabilen sonlu eleman programları ile modellenip deprem sırasında borular üzerinde oluşabilecek hasarların deprem öncesinde tespit edilip önlemler alınabileceği belirtilmiştir.

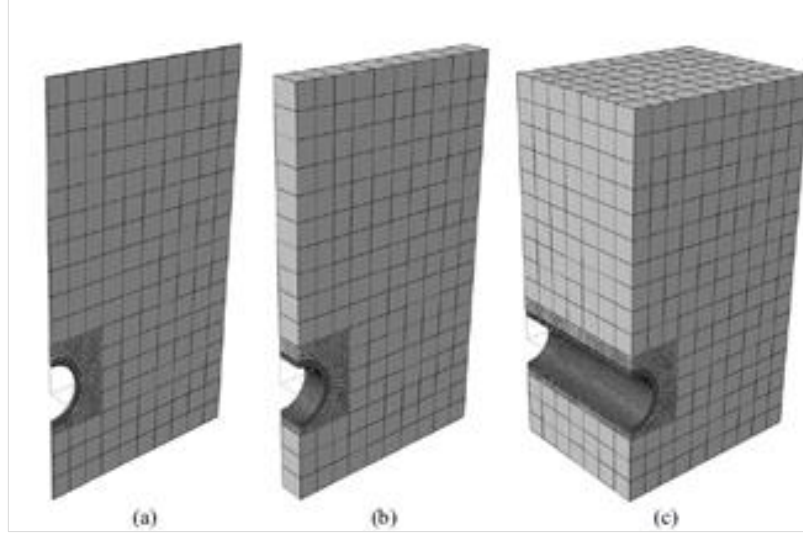


Şekil 1.2 Hendek tipi borularda yataklama sınıfları [1]



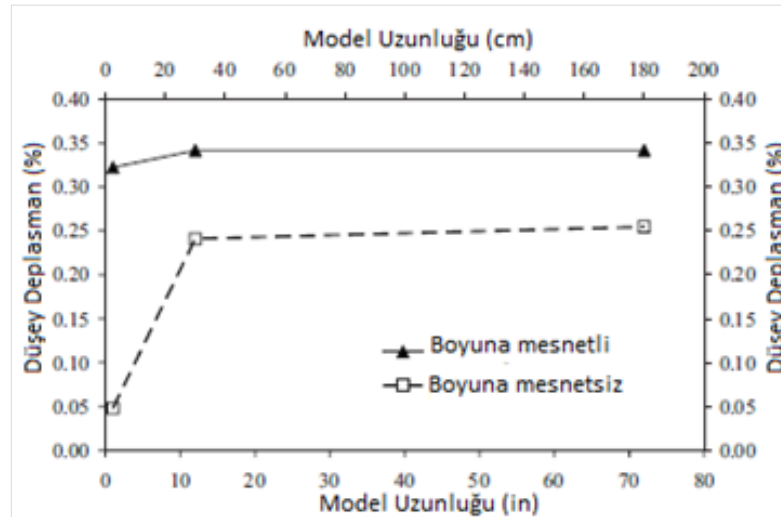
Şekil 1.3 Boru tiplerine göre şekil değiştirme durumları [1]

Abolmaali ve Kararam [2] dolgu yüksekliğindeki artışa bağlı olarak yatak malzemesinin ve yatak malzemesi kalınlığının boru zemin etkileşimindeki rolünü sonlu eleman programı olan ABAQUS/CAE Version 6.5-1 kullanarak incelemiştir. Şekil 1.4'te farklı boru uzunlukları için oluşturulan sonlu eleman modelleri gösterilmiştir.

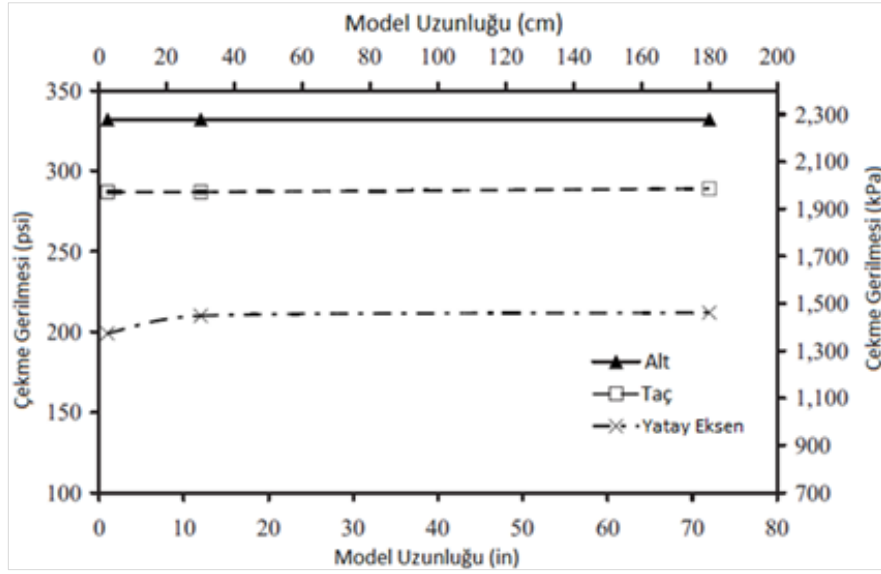


Şekil 1.4 Farklı boru uzunlukları için sonlu eleman modelleri (a) 2.5cm, (b) 30cm, (c) 180cm [2]

Birbirinden farklı uzunluklarda oluşturulan sonlu eleman modelleri boyuna doğrultuda mesnetlenmiş ve mesnetsiz haline göre çıkan sonuçlar Şekil 1.5’de gösterilmiştir. Boyuna mesnet uygulanmayan modellerde ilk 30cm için düşey sapmanın %5 seviyelerinden %25 seviyelerine değiştiği, boyuna mesnetli modellerde ise düşey yer değiştirmenin model uzunluğundan çok fazla etkilenmediği gösterilmiştir. Bu nedenle boyuna mesnetli olan modeller üzerinde farklı model uzunluklarına göre boru üzerinde oluşan çekme gerilmeleri incelenmiş sonuçları Şekil 1.6’da verilmiştir.



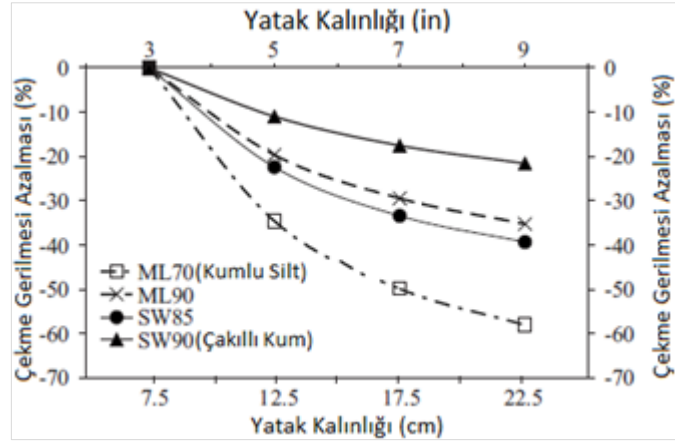
Şekil 1.5 Boyuna mesnet uygulanan ve uygulanmayan modellerin düşey yer değiştirmelerinin model uzunluğuna bağlı değişimi [2]



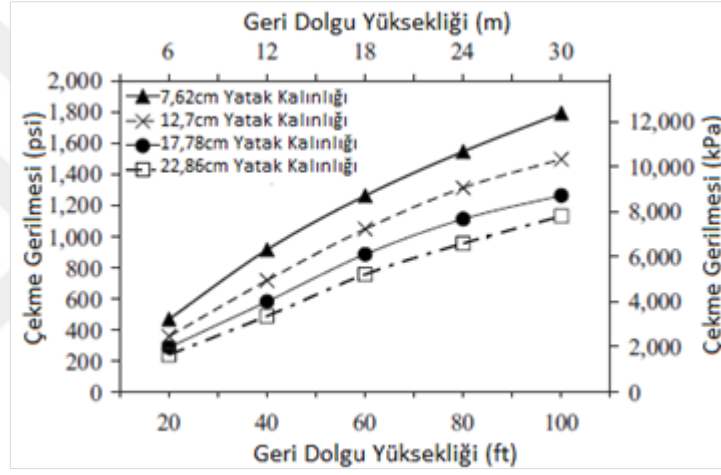
Şekil 1.6 Farklı boru uzunluklarına göre boru üzerinde oluşan çekme gerilmeleri [2]

Şekil 1.6'da görüldüğü üzere, boru taç kısmındaki gerilme 2000 kPa civarında çıkarken, yatay eksenindeki gerilmeler 1500 kPa, boru iç kısmındaki gerilmeler ise 2300 kPa olarak hesaplanmıştır. Boru üzerindeki gerilmelerin borunun iç tarafında maksimuma çıktığı ve zemin kemerlenmesinden dolayı boru yan duvarındaki gerilmelerin boru taç kısmından daha az olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda boru yan duvarındaki gerilmelerin model uzunluğu arttıkça ilk başlarda arttığı daha sonra model uzunluğundan bağımsız olarak sabit kaldığı gösterilmiştir. Boru taçı ve boru içindeki gerilmeler 0-80 inçlik farklı model uzunluklarına göre değişmemiştir. Bu da gösteriyor ki gömülü boru tasarımları yapılırken nispeten daha zor olan üç boyutlu modelleme yapılması yerine iki boyutlu modelleme ile boru analizi yapmak yeterlidir.

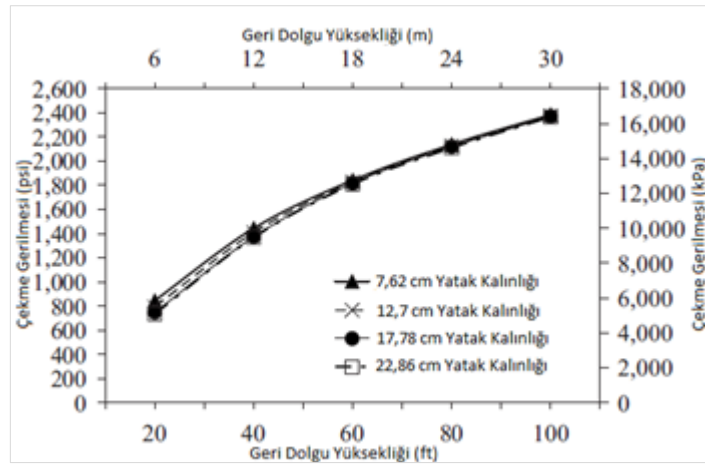
Çalışma sonucunda yatak malzemesinin kalınlığındaki artışın borunun taç kısmındaki, yatay eksenindeki ve özellikle iç tarafındaki gerilmeleri yatak malzemesinin cinsine bağlı olarak düşürdüğü görülmüştür. Bu da yatak malzemesi cinsinin ve sıkıştırma oranının boru üzerinde oluşan gerilmelere etkisinin yatak malzemesi kalınlığına oranla daha büyük bir etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. Kumlu silt ve çakıllı kum zeminlerde yatak malzemesi kalınlığına göre çekme gerilmesi grafiği Şekil 1.7'de, geri dolgu yüksekliğine bağlı çekme gerilmesi değişimi Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 17 Yatak malzemesi kalınlığının değişimine bağlı çekme gerilmesi azalması [2]



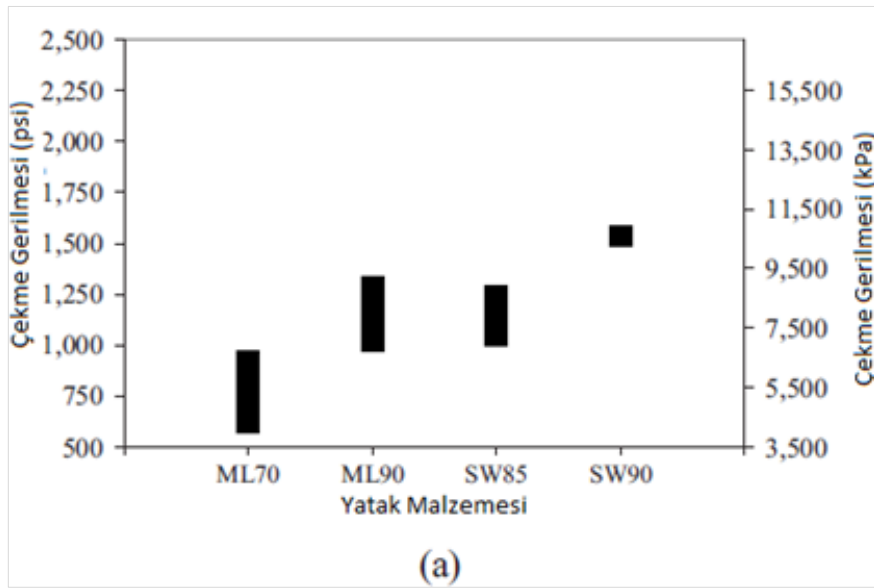
Şekil 1.8 Kumlu Silt Zeminde Geri dolgu yüksekliğinin değişimine bağlı çekme gerilmesi davranışı [2]



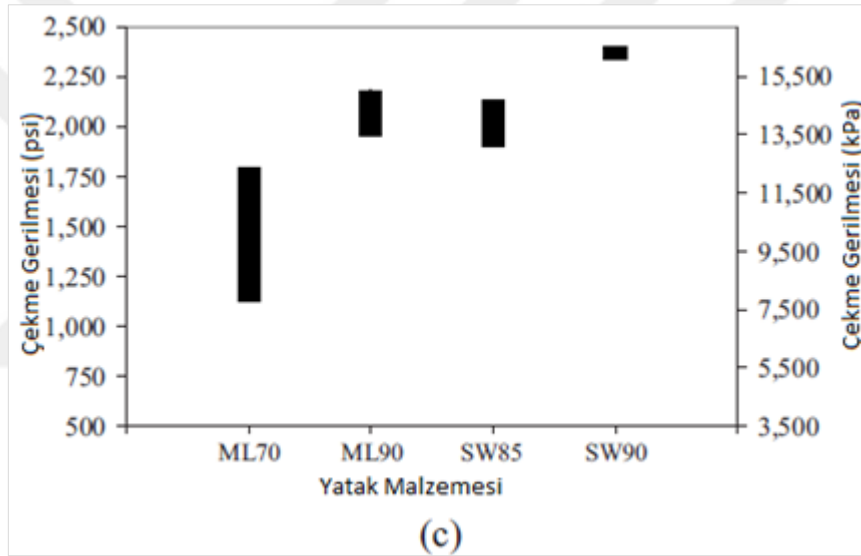
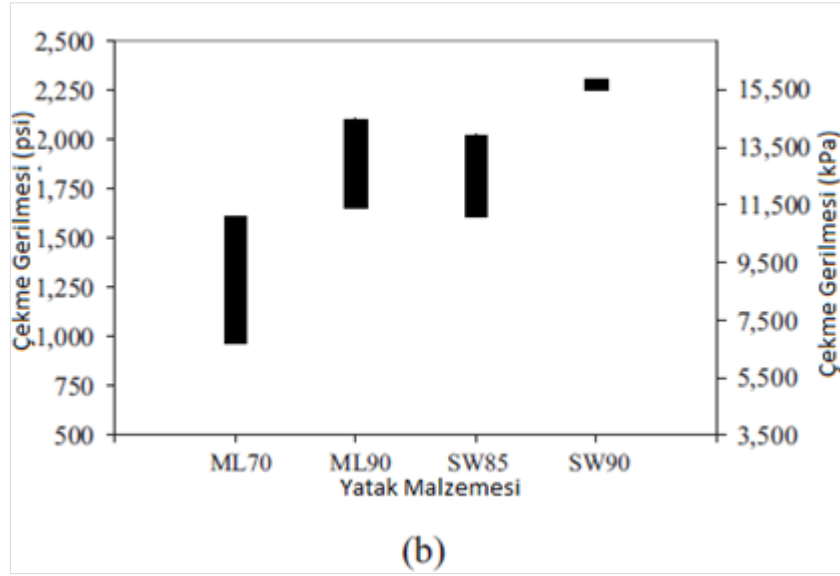
Şekil 1.9 Çakıllı kum zeminde geri dolgu yüksekliğinin değişimine bağlı çekme gerilmesi davranışı [2]

Şekil 1.7’de yatak malzemesi kalınlığı 7.5cm ile 22.5cm arasında değiştirilmiş ve çekme gerilmelerinin yatak malzemesinin kalınlığı arttıkça azaldığı gösterilmiştir. Bu sonuç kumlu silt ve çakıllı kum sınıfındaki zeminler için de aynıdır. Fakat iyi sıkıştırılmış bir çakıllı kum zemini %20 civarlarında çekme gerilmesi kaybı yaşarken, gevşek kumlu silt biriminin çekme gerilmesi kaybının %60lara vardığı görülmüştür. Şekil 1.8’da gevşek kumlu silt yatak malzemesi kalınlıkları olan modeller üzerinde geri dolgu malzemesinin yüksekliği 6-30 metre arasında artırılmış ve yükseklik arttıkça yatak malzemesi kalınlığından bağımsız olarak çekme gerilmesinin arttığı görülmüştür. Yatak malzemesi kalınlığının 7,62cm olduğu modelde çekme gerilmelerinin 2 kPa’dan 12 kPa’ a çıktığı fakat yatak malzemesi kalınlığının 22,86 cm olduğu modelde çekme gerilmelerinin 2 kPa’dan 8 kPa’a kadar çıkabildiği görülmüştür. Şekil 1.9’da ise görülyüyor ki çakıllı kum zeminlerde geri dolgu malzemesi yüksekliği arttıkça çekme gerilmeleri artmış ve bu artış kumlu silt zeminden farklı olarak yatak malzemesi kalınlığından bağımsız olarak gerçekleşmiştir.

Çalışma kapsamında gömülü boru sistemlerinde yaygın olarak kullanılan iri çakıllı kum malzemenin boru üzerindeki gerilmeleri azaltmada minimal etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur. Farklı boru çapları üzerinde farklı yatak malzemesi kalınlıklarına göre çekme gerilmesi değişimleri Şekil 1.10’da gösterilmiştir.

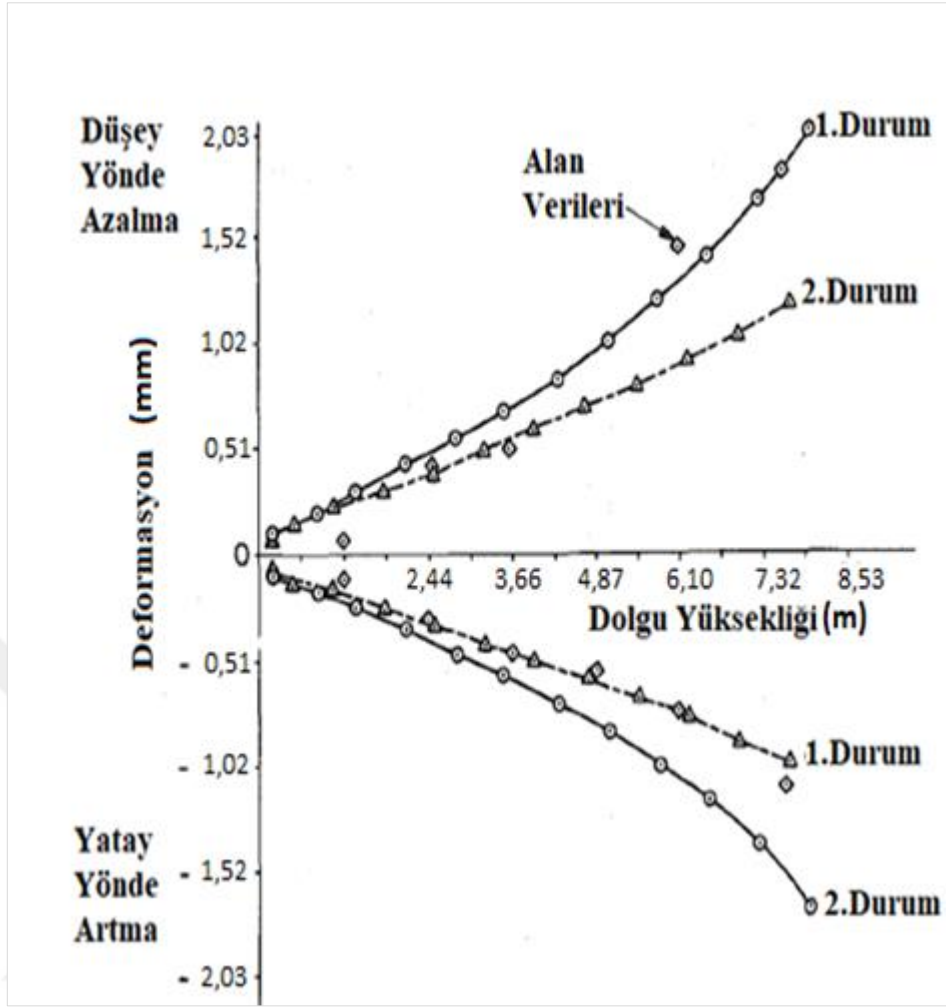


Şekil 1.10 Yatak kalınlığı alt ve üst sınırlarına göre boru tabanındaki gerilme farkları (a) 60cm boru çapı, (b) 150cm boru çapı, (c) 210cm boru çapı [2]



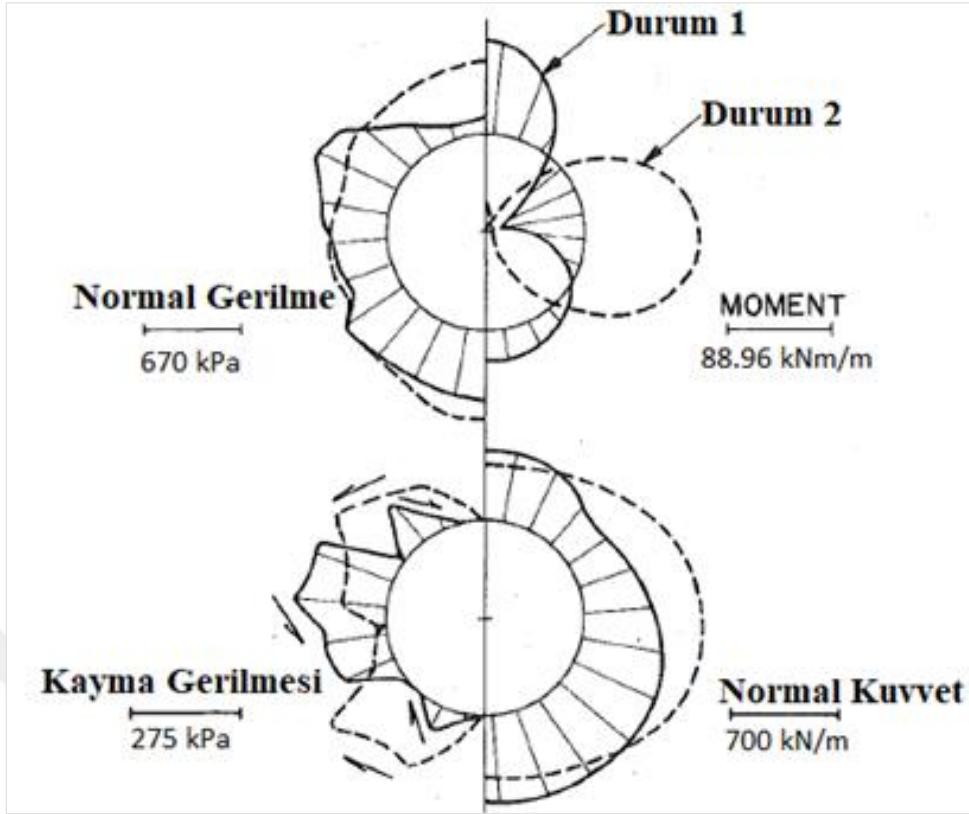
Şekil 1.10 Devamı

Selig ve Packard [3] da araştırmasında dolgu zemin üzerine yerleştirilmiş beton borular sonlu eleman yöntemi kullanılarak SPIDA programı ile modellenmiştir. Boru tasarımına ve analizine daha kesin ve çok yönlü bir yaklaşım sağlayan sayısal analizlerin sonuçlarını bazı saha deneyi sonuçları ile karşılaştırmıştır. Pozitif projeksiyon durumunda boru taç kısmında dolgu yüksekliğinin artmasına bağlı oluşan şekil değiştirmeler Şekil 1.11'de verilmiştir. Grafik oluşturulurken düşey ekseninde sıfırın üzerinde düşey yönde azalmalar, sıfırın altında ise yatay yönde azalmalar gösterilmiştir. Yer değiştirmeler milimetre cinsinden, dolgu yüksekliği ise metre cinsinden verilmiştir.



Şekil 1.11 Pozitif projeksiyon durumunda dolgu yüksekliğinin artmasına bağlı olarak boru tacında oluşan şekil değiştirmeler [3]

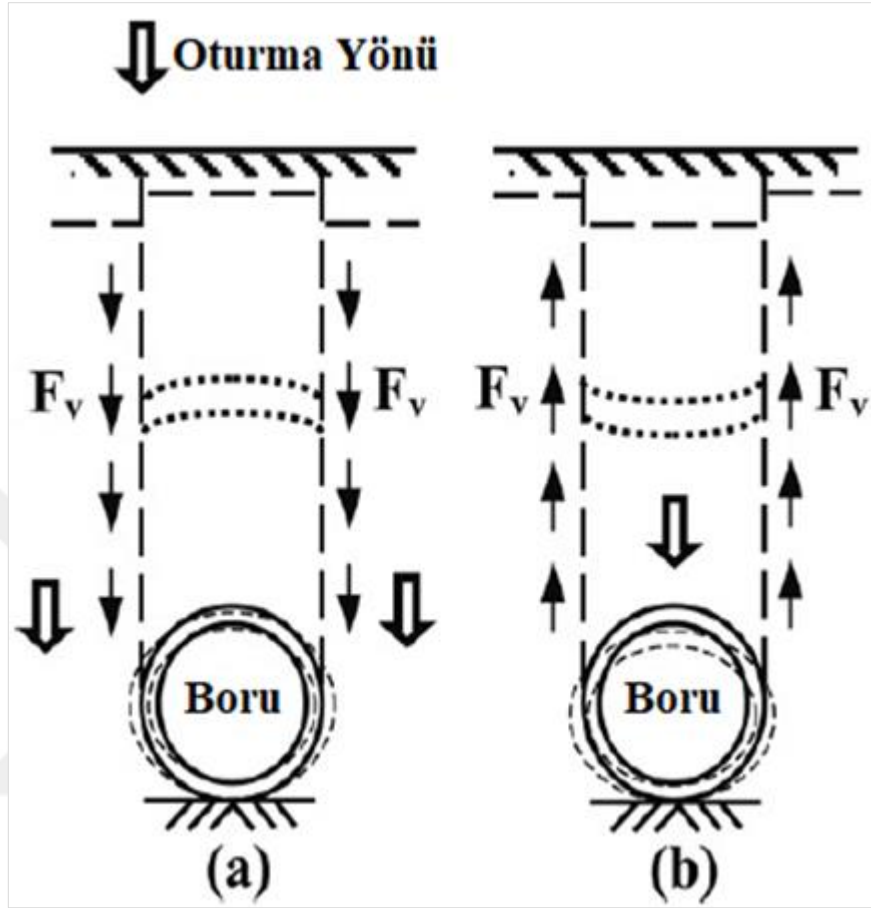
Bu karşılaştırma sonucunda yatay yüklerin düşey yüklerden daha kritik olabileceği ve boru üzerindeki örtü kalınlığını artırarak borunun yanlarındaki dolgunun yatay mesafesini azaltmanın mümkün olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sayısal analizlerin gömülü boru tasarımlarında geleneksel ampirik yöntemlere göre daha avantajlı sonuçlar verdiğini ve böyle durumlarda sonlu eleman programları kullanarak zemin-boru etkileşimini göstermenin gerekli olduğunu vurgulamıştır. Çalışma kapsamında geri dolgu malzemesi olarak balya saman kullanılan (Durum1) ve hazır dolgu malzemesi kullanılan (Durum2) boru kurulumları için kesit tesirleri hesaplanmış ve analiz sonuçlarında boru üzerinde oluşan normal ve kayma gerilmeleri, moment ve eksenel kuvvetler Şekil 1.12’de gösterilmiştir. Durum 1 için devam eden aralıksız çizgi kullanılırken, durum 2 için kesikli çizgiler kullanılmıştır.



Şekil 1.12 Boru üzerinde oluşan gerilme, aksenal kuvvet ve moment dağılımları [3]

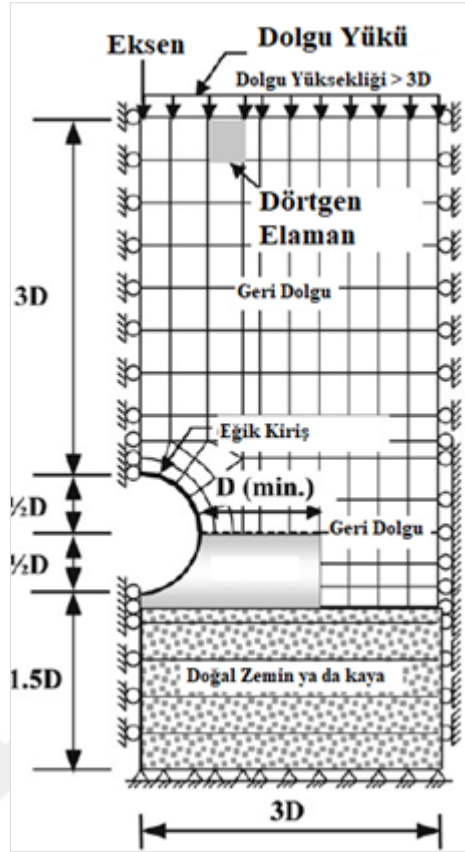
Analiz sonuçlarına göre balya saman kullanılan 1.durum için normal kuvvet borunun taç kısmında az fakat borunun yarısının üstünde maksimum düzeye ulaşmıştır. Bu dağılım saman balyası ve bitişik olduğu zemindeki yük transferi olduğunu göstermektedir. Durum 1 için kayma gerilmeleri düşey yüklemekten dolayı boru yan duvarında en fazla düzeye ulaşmıştır. Momentlerde ise saman balyalı durumda moment boru tacında maksimum düzeye ulaşırken, hazır dolgu malzemesi kullanılan durumda boru yan duvarlarında en fazla düzeye ulaşmıştır. Durum 1'de momentler Durum 2'ye göre daha az çıkmıştır. Bu da zemin basıncı dağılımının yapısındaki değişikliği ortaya koymuştur. Normal kuvvet dağılımlarında hazır dolgu malzemesi kullanılan durumda, borunun taç ve iç kısmında normal kuvvetler saman balyası kullanılan duruma göre daha az çıkmıştır. Saman balyası kullanılan durumda boru yan duvarlarının üst kısmında düşük normal kuvvet okunmasının sebebinin kötü yük dağılımı olduğu gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda yüksek dolgulu boru kurulumlarında saman balyası geri dolgu malzemesi kullanmanın daha efektif olduğu belirtilmiştir.

Kang, Parker ve Yoo [4] çalışmalarında gömülü boru sistemlerini uygularken kullanılan kazı şekillerini incelemişlerdir. Çelik ve PVC borular üzerindeki gerilme transferleri Şekil 1.13'te gösterilmiştir.



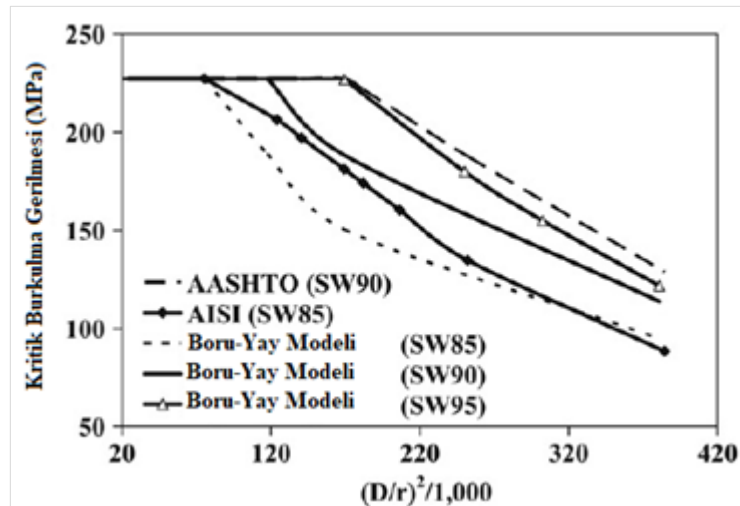
Şekil 1.13 Gömülü boru sistemlerinde gerilme transferi (a) Çelik boru, (b) PVC boru [4]

Boru kurulum yöntemlerinden bazılarının boru üzerindeki dolgudan dolayı oluşacak basıncı azalttığını belirterek, boru üzerine etkiyen gerilmeleri azaltmak için optimum geometriyi bulmak amacıyla zayıf zemin, yatak zemini ve dolgu parametrelerini içeren formül geliştirmiştir. Bu formüller Şekil 1.14'te gösterilen sonlu eleman modeline göre yapılan sayısal analizlerin sonuçları ile doğrulanmıştır.



Şekil 1.14 Sonlu eleman modelinin şematik gösterimi, (D= Boru çapı) [4]

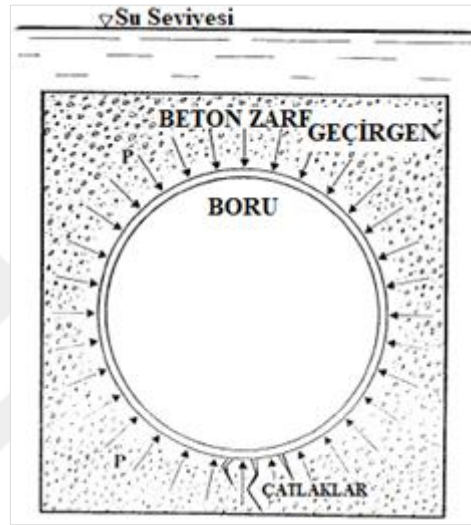
Çalışma kapsamında elde edilen analiz sonuçları Şekil 1.15'te AASHTO (Amerikan Karayolları Birliği), AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) şartnameleri ile kıyaslanmıştır.



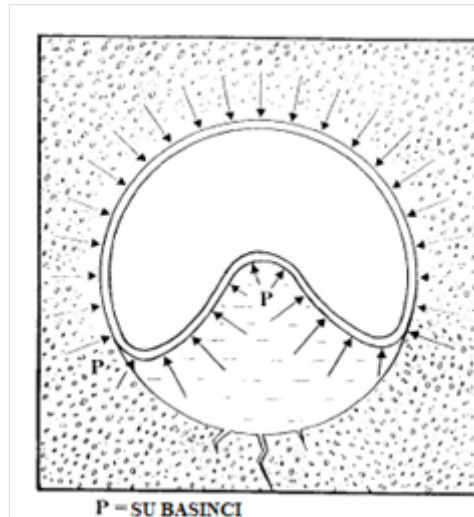
Şekil 1.15 Boru çapına bağlı burkulma gerilmelerinin farklı şartnamelere göre kıyaslanması [4]

Ayrıca bu çalışmada kemerlenme faktörünü etkileyen en büyük etkenin boru çevresindeki zayıf zeminlerin elastisite modülü olduğu gösterilmiştir.

Watkins [5] gömülü boruların aşırı ağır dış yüklerle maruz kaldığında uygulanan beton zarf yöntemini araştırmış ve çalışmasında beton kaplı borular için performans limitleri tanımlamıştır. Şekil 1.16'da beton zarf içerisinde su seviyesinin altında yapılan bir boru kurulumunda su basıncı ve çatlak oluşumu ve Şekil 1.17'de 140 m derinliğinde su basıncına maruz kalmış bir borunun şekil değiştirmesi gösterilmiştir.



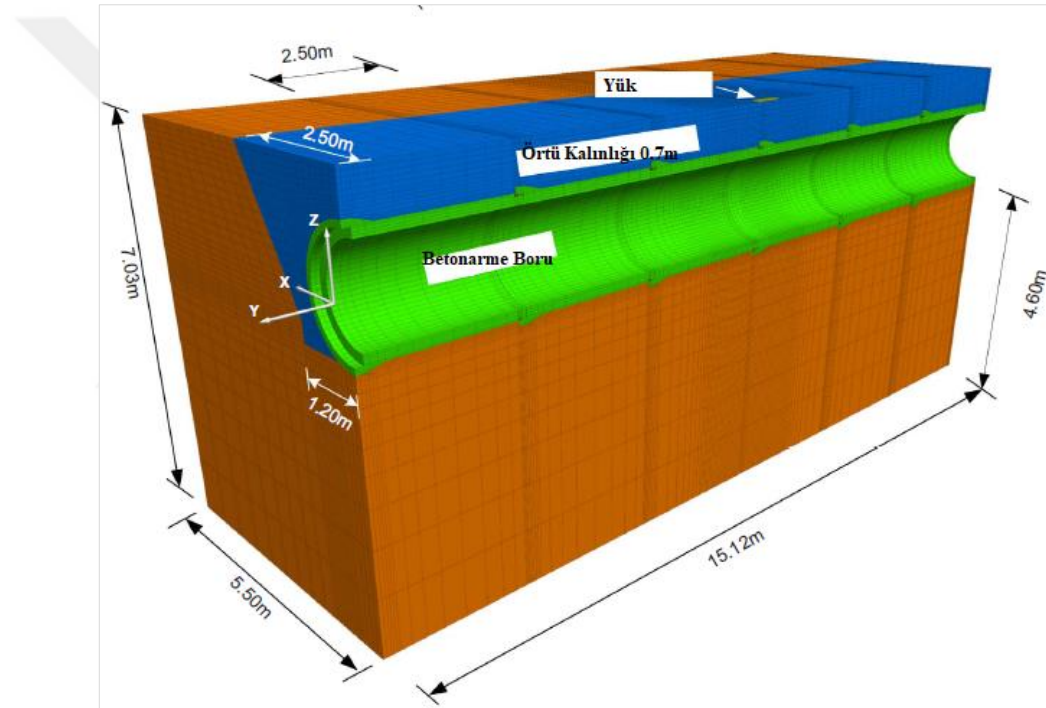
Şekil 1.16 Su seviyesi altında beton zarf içindeki boruya etkiyen su basıncı [5]



Şekil 1.17 Su seviyesinin 140 metre altında uzun zamanda boruya etkiyen su basıncı [5]

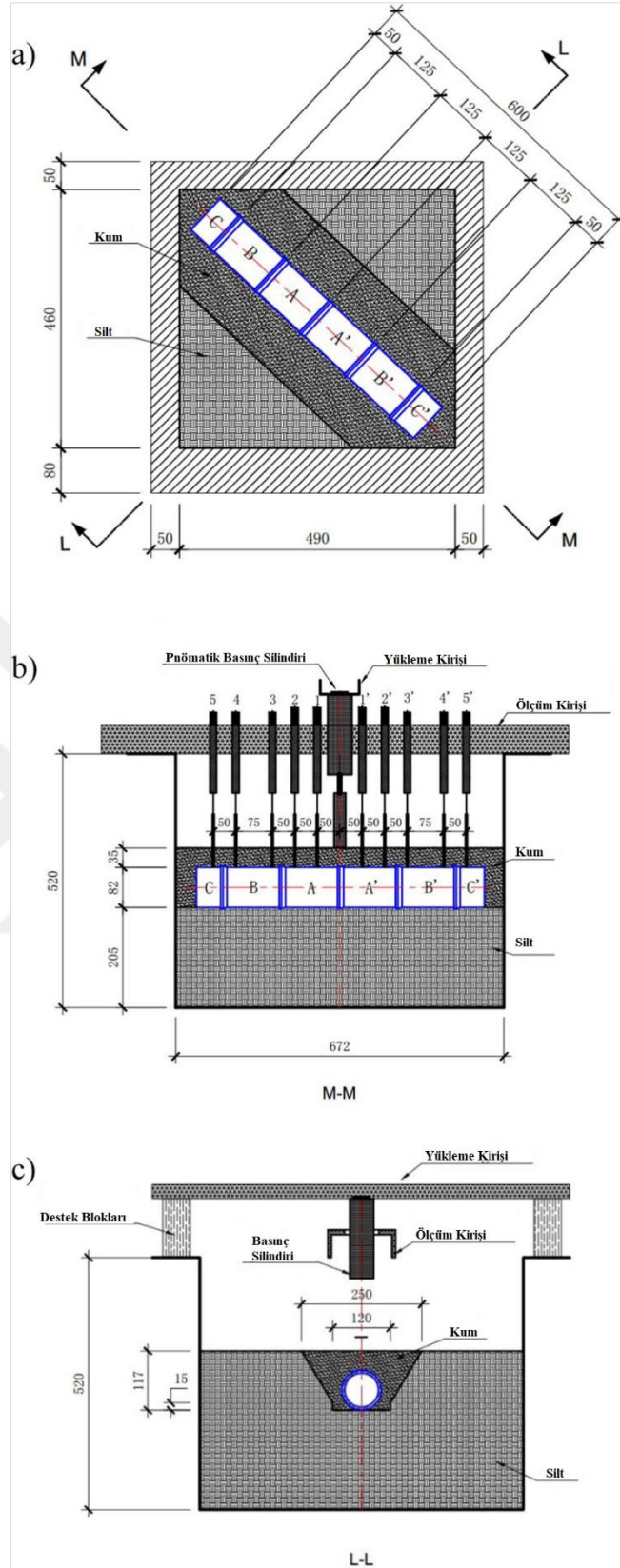
Bu sistemlerde yer altı su seviyesi borunun üzerinde ise belirli bir süre sonra su basıncının geçirgen beton tabakasının altındaki boruya ulaşacağı belirtilmiştir. Bu yöntemin daha çok yüke bağlı olarak şekil değiştiren dolayısıyla da boru içerisindeki basıncı değişen esnek borularda kullanıldığı vurgulanmıştır.

Xu, Shen ve Jin [6] çalışmalarında siltli zemin üzerine yerleştirilmiş ve geri dolgusu kumla yapılmış olan contalı birleştirilmiş betonarme borular, Şekil 1.18’de görüldüğü gibi 3 boyutlu bir sayısal model olarak oluşturulmuş ve ardından bu borulara santrifüj deneyi yapılmıştır. Santrifüj deneyi aşamaları Şekil 1.19’da gösterilmiştir. Doğal zemin ve dolgu zemin rijitliği, kazı derinliği, temel derinliği gibi faktörlerin etkisini araştırmak amacıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

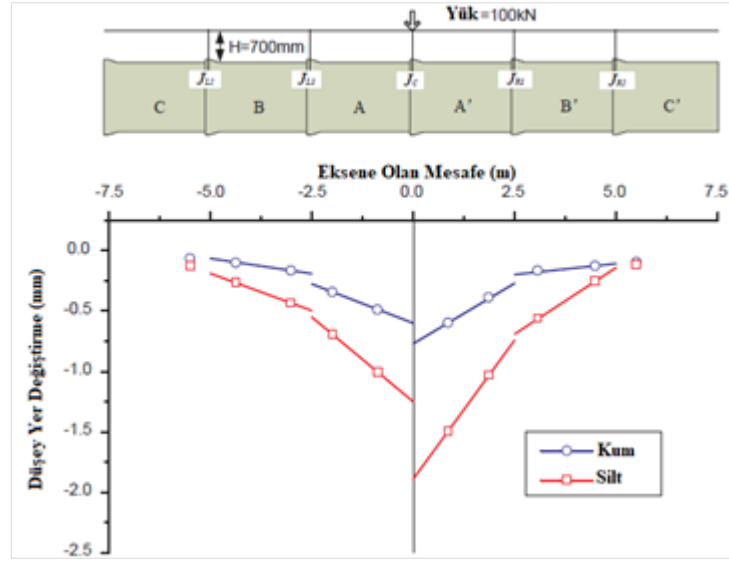


Şekil 1.18 Santrifüj deneyine karşılık gelen 3 boyutlu sayısal model [6]

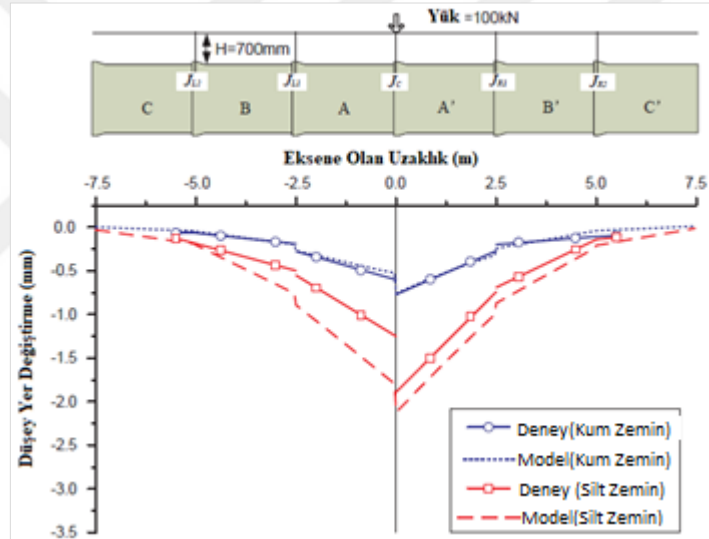
Mohr-Coulomb zemin modeline göre geliştirilen matematiksel model doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme davranışlarını göstermiştir. Matematiksel model saha deneylerine göre daha makul sonuçlar vermiş olup doğal zemin rijitliğinin geri dolgu malzemesinin rijitliğine göre daha baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 1.20’de santrifüj deneyi sonuçları, Şekil 1.21’de ise sayısal model ile deney sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.19 Santrifuj modelinin şematik diyagramları (a) Plan, (b) M-M kesiti, (c) L-L Kesiti [6]



Şekil 1.20 Santrifuj deneyi sonuçları [6]

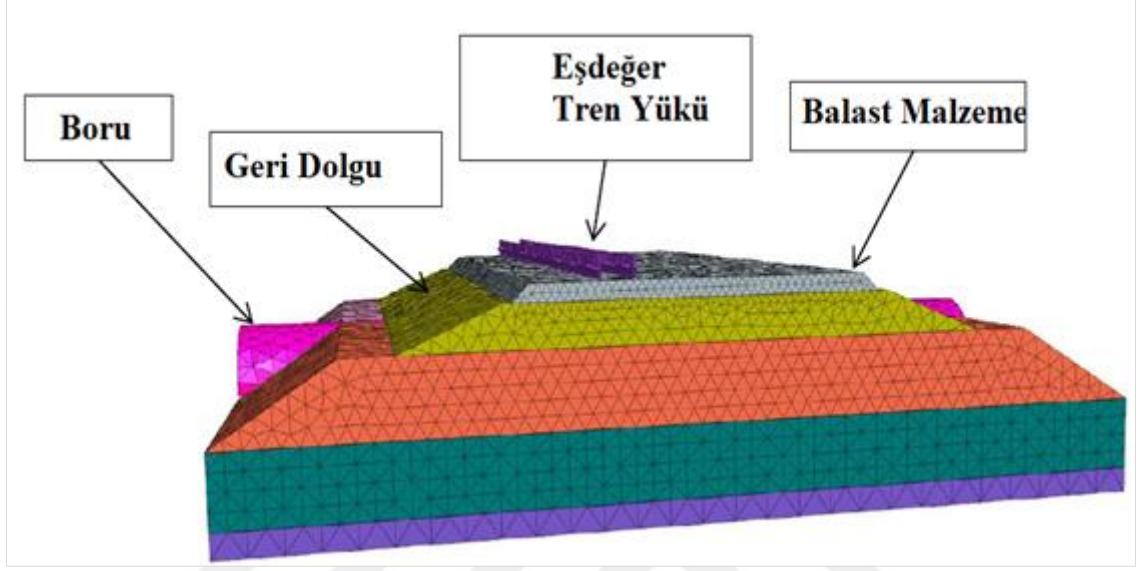


Şekil 1.21 Boru tacındaki yer değiştirmelerin sayısal model ve deney sonuçlarına göre kıyaslanması [6]

Ayrıca aynı kazı ölçülerinde, temel derinliğinin artırmanın dolgu derinliğini artırmaya göre birleşim yerlerinin dönmesini azaltmada daha az etkili olduğu çalışmanın sonucunda gösterilmiştir. Aynı zamanda conta rijitliğindeki değişimlerin boru hattında göz ardı edilebilecek kadar az şekil değiştirmelere sebep olduğu yine bu çalışmada gösterilmiştir.

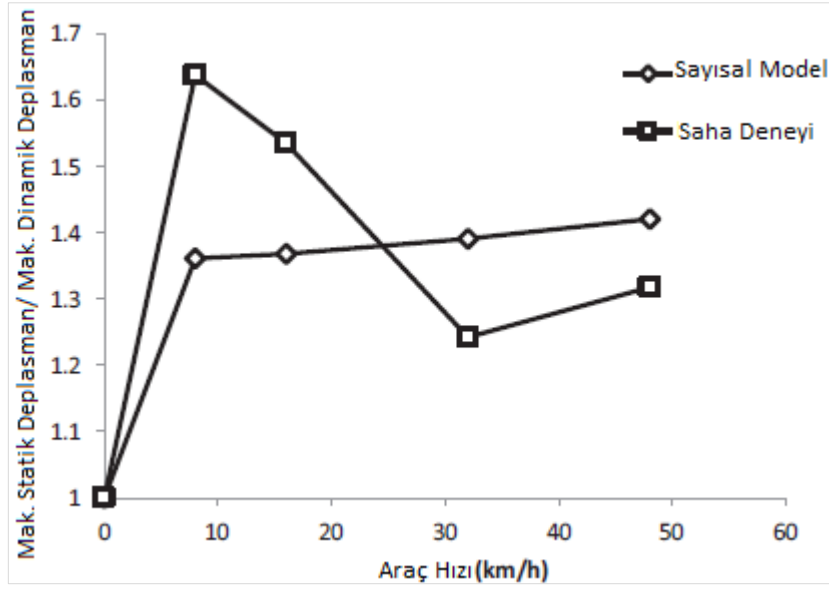
Alzabeebe, Chapman ve Faramarzi [7] çalışmalarında gömülü boruların üzerinde oluşacak dolgu yüklerine dayanabilecek şekilde tasarlanması gerektiğini vurgulamıştır. Ancak kapsamlı bir literatür taraması yapıldığında gömülü borulara

etkiyen yüklerden statik yani durağan yüklerin mi yoksa hareketli yani trafik yüklerinin mi boru üzerinde daha fazla şekil değiştirmelere sebep olduğu araştırmacılar arasında fikir ayrılığına sebep olmuştur. Bu alışmada Şekil 1.22’de gösterilen sonlu eleman modeli kullanılarak gömülü boru modeli üzerine statik yükler ve hareketli yükler etkilerek analizler yapılmıştır.

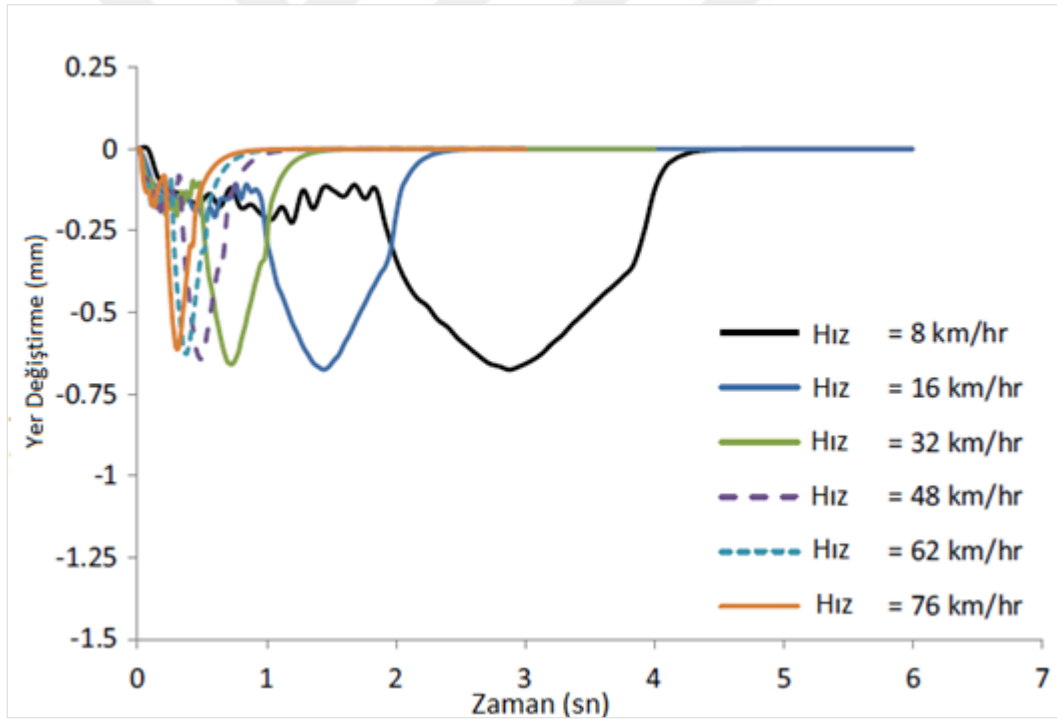


Şekil 1.22 Santrifuj modelinin Şematik diyagramları (a) Plan, (b) M-M kesiti, (c) L-L Kesiti [7]

Sonlu eleman modeli yüksek kaliteli saha verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Daha sonrasında bu model kamyon hızlarının, boru rijitliğinin ve yükleme koşullarının borunun Şekil değiştirmesine ve boru üzerinde oluşacak gerilmelere etkisini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 1.23’de sayısal model sonuçları ile literatürden elde edilen verilerin sonuçları kıyaslanmıştır. Şekil 1.24’de ise farklı araç hızlarıyla zamana bağlı olarak boru tacındaki yer değiştirme gösterilmiştir.



Şekil 1.23 Farklı araç hızlarına göre en fazla statik yer değiştirmenin, en fazla dinamik durumdaki yer değiştirmeye oranı [7]

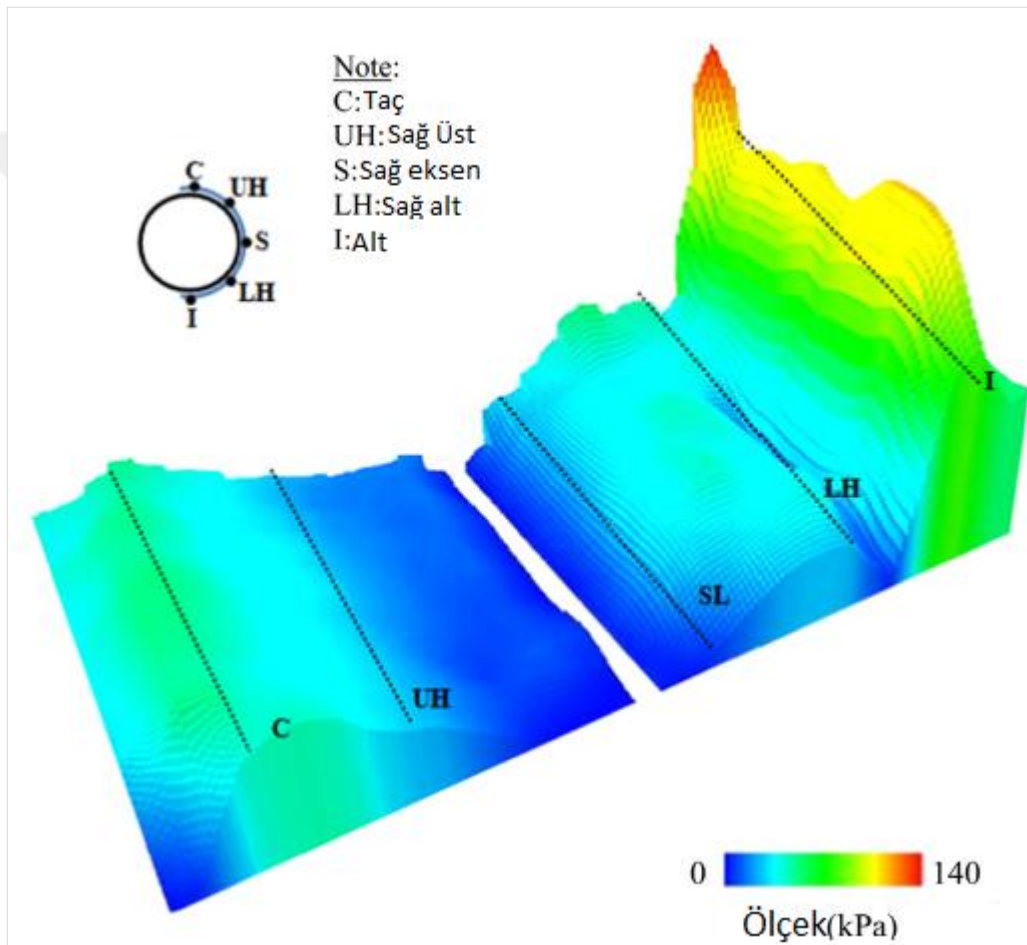


Şekil 1.24 Farklı araç hızlarına göre boru taç kısmındaki zamana bağlı yer değiştirme [7]

Çalışmanın sonucunda görülmüştür ki statik yüklerden dolayı oluşan şekil değiştirmeler daima hareketli yüklerden dolayı oluşan şekil değiştirmelerden fazladır. Dolayısıyla gelecekteki çalışmalar yapılacak numerik modellerde statik

yükler en elverişsiz yük olarak kullanılabilir. Bunun aynı zamanda dinamik bir analize göre daha kolay bir analiz olduğu da vurgulanmıştır.

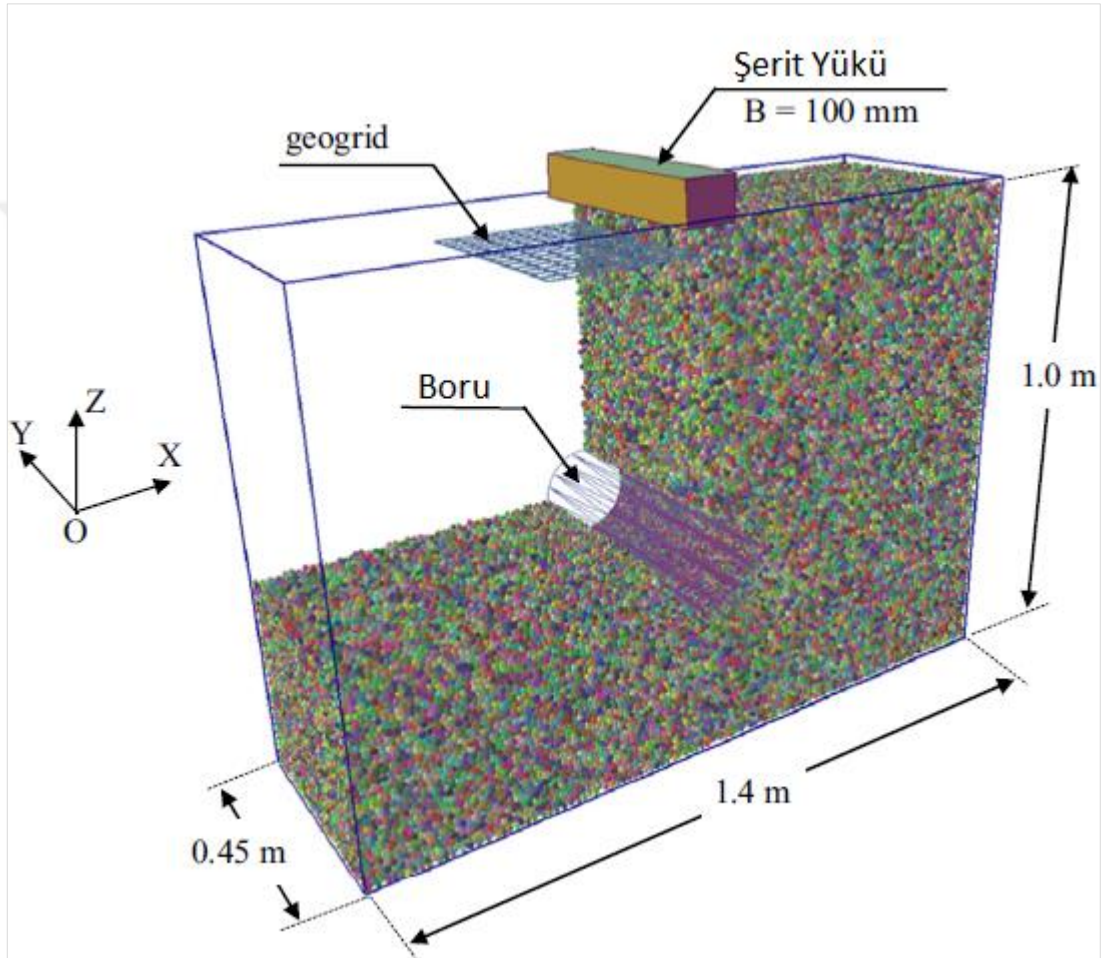
Ahmed, Tran ve Meguid [8] çalışmalarında boruların, tünellerin, dikey shaftların analizi ve tasarımı için gömülü yapılar üzerindeki toprak basıncı dağılımını gerçekçi olarak belirlemenin önemli olduğuna dikkat çekmiştir. Makale, boru üzerine yerleştirilen basınç ölçerler ile rijit borular üzerindeki basınç dağılımını belirlemeye yönelik olarak yapılan bir saha araştırmasının sonuçlarını da sunmaktadır. Şekil 1.25'te gömülü boru etrafındaki basınç dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 1.25 Gömülü boru etrafındaki basınç dağılımı [8]

Şekil 1.25'de görüldüğü üzere boru etrafındaki basınç boru altında en fazla düzeye ulaşmıştır. En az basınç ise düşey yüklemeye en yakın mesafede olmasına rağmen boru taç kısmında okunmuştur. Bu da zeminin basıncı dağıttığının ve iletmiş olduğunu göstermektedir.

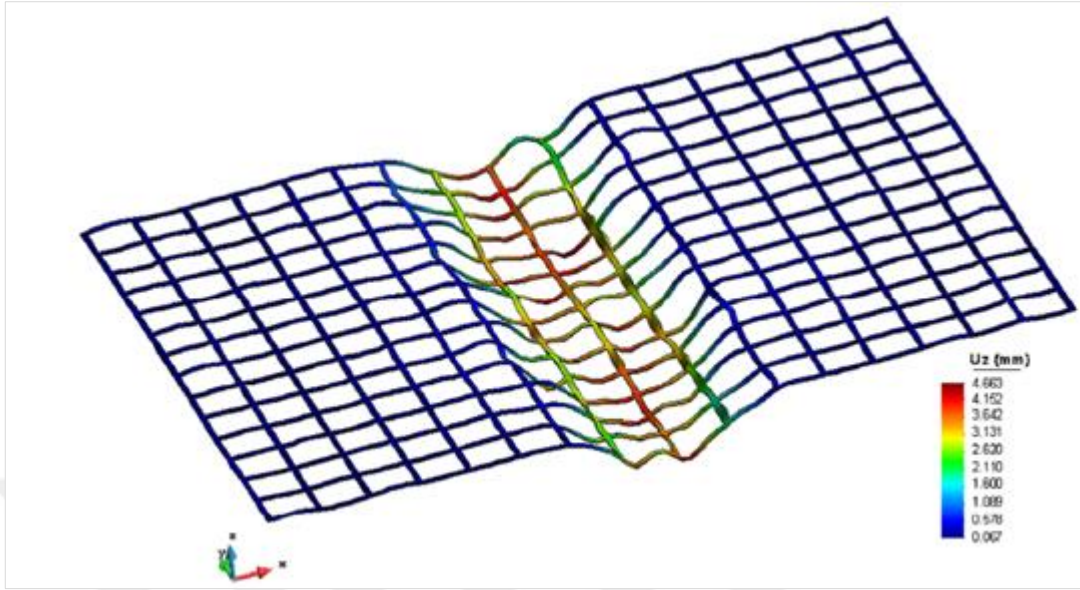
Basınç ölçerler boruların silindirik şeklini takip edebilen boruların etrafındaki basınçları sürekli ölçmeye yarayan esnek levhalardır. Fiziksel model şerit yüklemesine maruz kalan granüler malzeme ve gömülü boruyu içermektedir. Aynı zamanda bu çalışmada boru üzerindeki bir geogrid takviye tabakasının basınç dağılımı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Model önce deney sonuçları kullanılarak doğrulanmış ardından zemin-boru sisteminin detaylı davranışlarını araştırmak için kullanılmıştır. Şekil 1.26'da oluşturulan sayısal modelin görüntüsü gösterilmiştir.



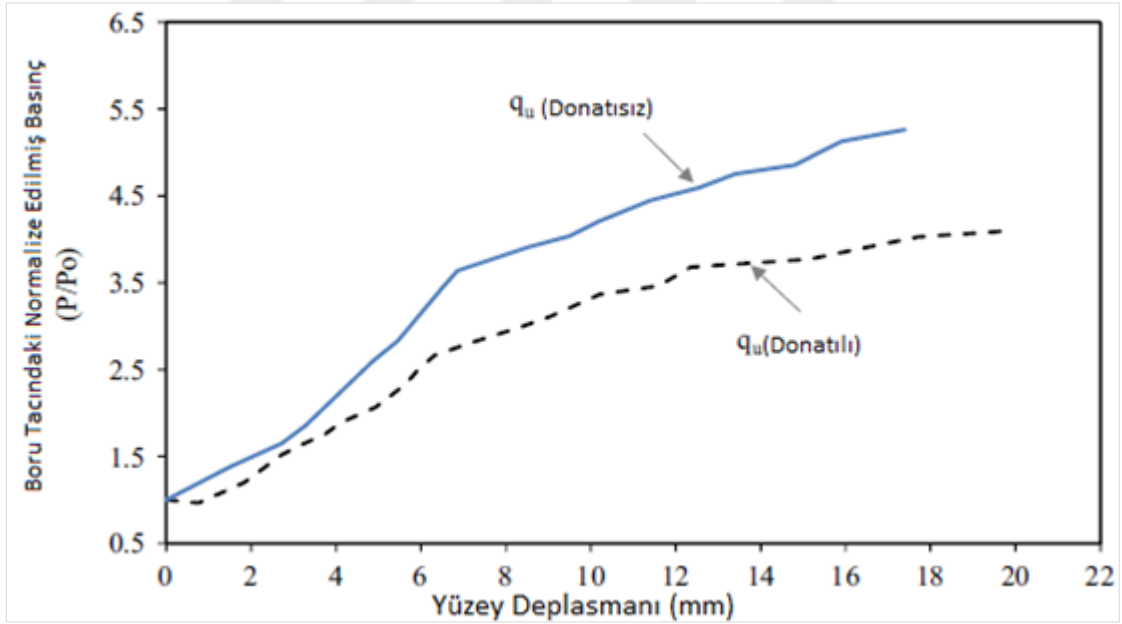
Şekil 1.26 Geogrid ve gömülü boruyu gösteren kısmi sayısal model görüntüsü [8]

Çalışmanın sonucunda boruya etkileyen radyal basıncın boru üzerindeki yükün artmasıyla genellikle arttığı belirtilmiştir. Ayrıca geogrid takviyesi yapılan kesitte boruya etkileyen basıncın geogrid takviyesi yapılmayan kesite göre daha az olduğu görülmüştür. Geogrid tabakasının etkisi yükleme ile doğru orantılı olarak artmıştır. Şekil 1.27'de geogrid tabakasının yük altındaki yer değiştirmeleri gösterilmiş, Şekil 1.28'de ise donatılı ve donatısız boruların taç kısmındaki yüzey yer değiştirmelerine

bağlı basınç değişimleri verilmiştir. Bu yaklaşımın boru ve geogrid tabakalarını analiz etmek için efektif olduğu vurgulanmıştır.



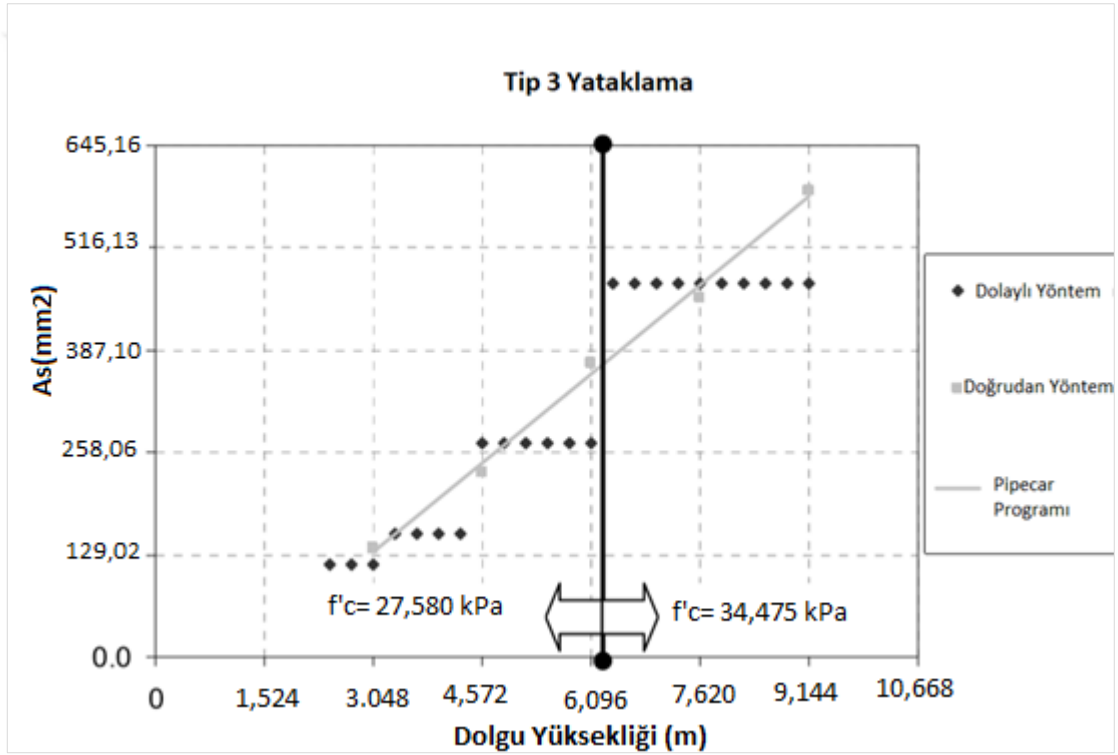
Şekil 1.27 Yük altında geogrid tabakasındaki yer değiştirmeler [8]



Şekil 1.28 Zemin göçme anına kadar boru tacındaki basınç değişimi [8]

Donatısız betonlu borularda boru taç kısmındaki yüzey yer değiştirmesi göçme anına kadar arttıkça boru taç kısmındaki basınç, donatılı boruya göre daha fazla artmıştır. Bu da gömülü boru betonlarında donatı kullanmanın faydasını göstermektedir.

Erdogmus ve Tadros [9] çalışmalarında gömülü beton boruların üzerine etkiyen yüklerin bulunması ve hesaplanması ile ilgili tarihten bugüne yapılan çalışmaları ve ortaya çıkan yöntemleri incelemişlerdir. Boru tasarımında kullanılan yöntemler dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemleri olarak bilinmektedir. Bu yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar PipeCar isimli boru tasarım programı kullanılarak elde edilen hesap sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 1.29'da 120cm çapında bir beton boru Tip3 yataklama tipine göre kurulumu yapılmış ve PIPECAR adlı program kullanılarak elde edilen hesap sonuçları ile doğrudan ve dolaylı tasarım yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Tip3 yataklama yöntemi Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

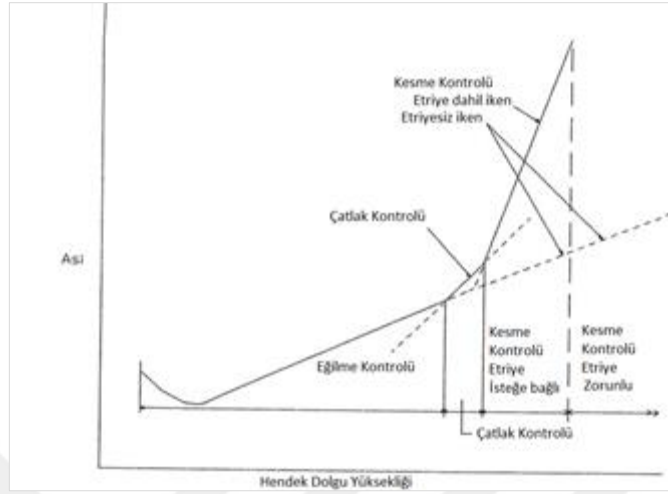


Şekil 1.29 Doğrudan ve dolaylı yöntemin sonuçlarının sayısal model ile kıyaslanması [9]

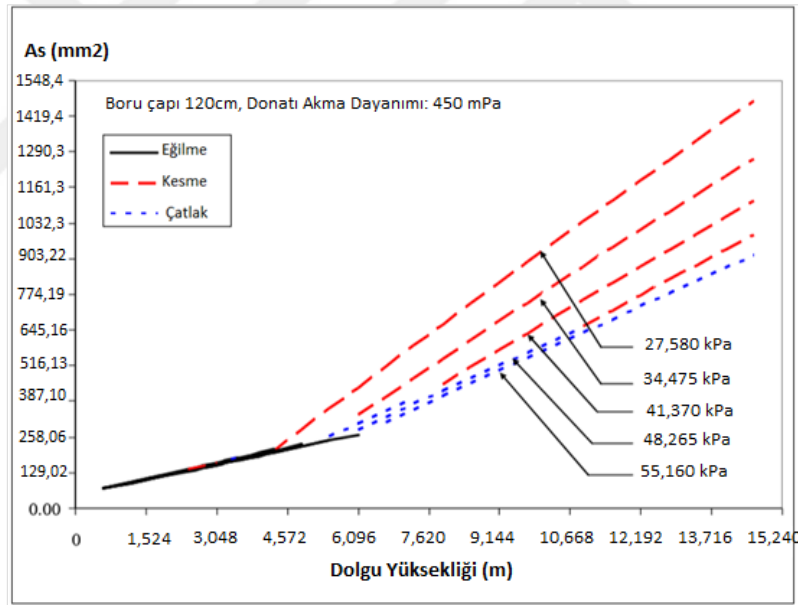
Kıyaslama sonucunda Tip 3 yataklama sistemine göre kurulmuş 120cm çaplı beton borular için yaklaşık 6 metre dolgu yüksekliğinde dolaylı ve doğrudan yöntemin sonuçlarının aynı olduğu görülmüştür.

Şekil 1.30 boru dayanımının, borunun üstündeki dolgu yüksekliğine bağlı olarak bükülme, çatlak kontrolü veya kesme ile nasıl kontrol edildiğini göstermektedir.

Makale kapsamında yapılan bir parametrik çalışmada Şekil 1.31’de gösterildiği gibi dolgu yüksekliğine bağlı olarak gömülü borulardaki donatı alanı değişimi beton mukavemeti sınıflarına göre sunulmuştur.



Şekil 1.30 Kontrol kriterleri (ASCE 15-98)

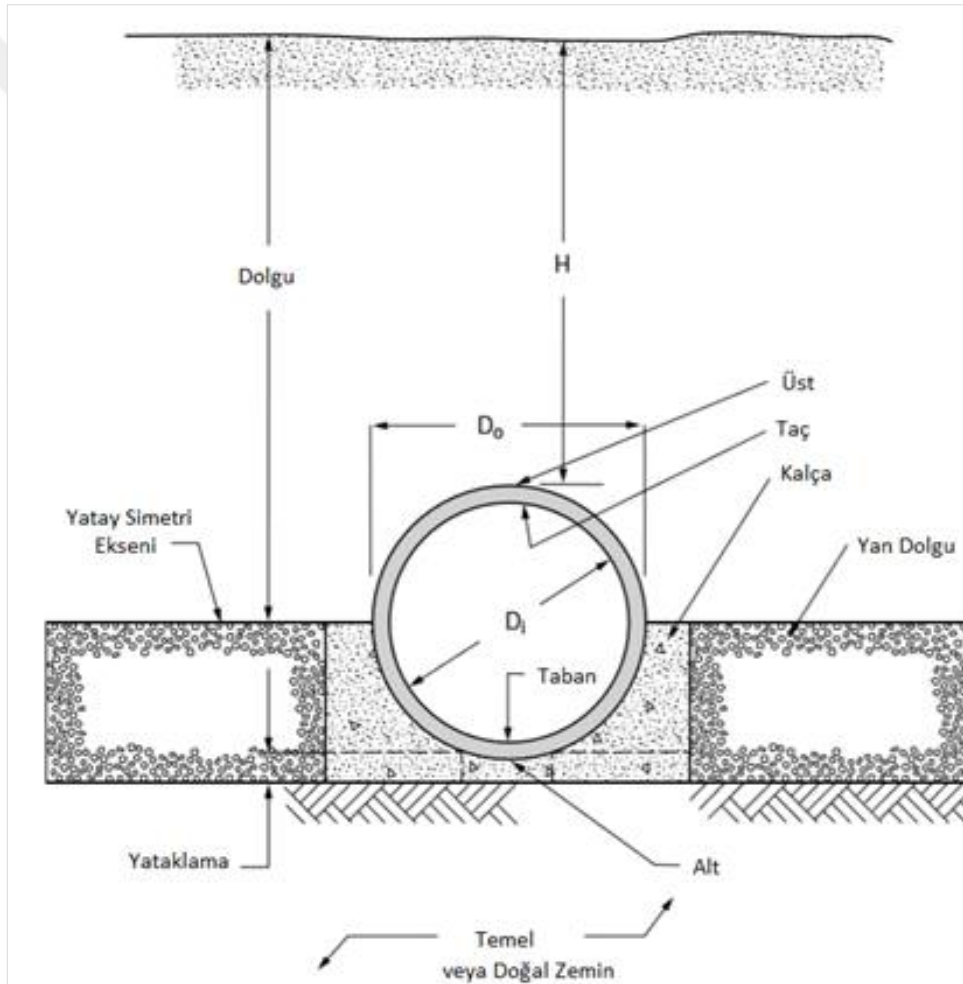


Şekil 1.31 Beton mukavemet sınıflarına göre dolgu yüksekliğine bağlı olarak gömülü borulardaki donatı alanı değişimi [9]

Burada görüldüğü üzere gömülü borularda kullanılan betonların mukavemeti arttıkça dolgu yüksekliğindeki artışa bağlı olarak ihtiyaç duyulan donatı miktarı azalmıştır. Yaklaşık 6 metre dolgu yüksekliğine kadar tüm beton mukavemeti sınıflarında donatı ihtiyacı aynı olmuştur.

Çalışmanın sonucunda hem dolaylı hem doğrudan yöntemi de kapsayan ve bu tasarım yöntemleri arasındaki çelişkiyi ve karışıklığı giderebilecek daha verimli bir tasarım yönteminin geliştirilebileceği savunulmuştur.

ACPA (American Concrete Pipe Association) [10] 2012 yılında yayınladığı dolaylı yöntem için standart kurulumlar ve yatak katsayıları bildirisinde, dolaylı yöntemin temellerini Marston teorisini anlatmış daha sonra 1970'lerde ACPA'nın SPIDA programını geliştirerek doğrudan yöntem üzerinde çalıştığından ve doğrudan yöntem ile birlikte yeni standart kurulumların literatüre kazandırıldığından bahsetmiştir. Şekil 1.32'de standart boru yerleştirme terminolojisi Tablo 1.1'de ise standart boru kurulumları ve minimum sıkıştırma oranları gösterilmiştir.



Şekil 1.32 Standart boru yerleştirme terminolojisi [10]

Tablo 1.1 Standart kurulum türleri ve minimum sıkıştırma oranları [10]

Yataklama Türü	Yatak	Boru Alt Yan Kısımındaki Malzeme ve Sıkıştırma	Hendek Duvarı Alt Kısımındaki Malzeme ve Sıkıştırma
Tip 1	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%95 Kategori I	%90 Kategori I %95 Kategori II %100 Kategori III
Tip2	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%90 Kategori I %95 Kategori II	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 3	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 4	Yatak gerekmez (tabanda kaya yoksa) Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	Sıkıştırma gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III	Sıkıştırma gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III

Dolaylı yöntemi, doğrudan yöntemden ayıran temel fark; boru tasarımı yapılırken yatak katsayılarının kullanılmasıdır. Bu yatak katsayıları bazı ampirik formüller ve üç kırıli deney sonuçları yardımı ile geliştirilmiştir. Tasarımların tamamı 0,01 inç çatlak sınır dayanımına göre yapılmıştır. Dolgu toprak ve doğal zemin kazısı yapılması durumunda yatak katsayıları verilmiştir. Aynı zamanda HS20 yükü için hareketli yük yatak katsayıları da boru çapına göre verilmiştir. Tüm bu veriler kullanılarak bir gömülü boru tasarımı yapılabilir.

Beakley [11] çalışmasında gömülü boruların tasarımlarında kullanılan dolaylı yöntem ve doğrudan yöntemin tanımlarını yapmış ve bu iki yöntemin temel dayanaklarını, kolaylıklarını ve farklılıklarını açıklamıştır. Çalışmada doğrudan yöntemin tercih edilme sebebinin, nispeten dolaylı yöntemle göre daha basit olması, güvenli olması ve kanıtlanmış olması olarak açıklanmıştır. Doğrudan yöntemin amacının ASTM (Amerikan Malzeme Testi Birliği)'de tanımlanmayan taşıma kapasitesi yüksek boruların hesaplarını yapabilmek, büyük çaplı boruların tasarımını yapabilmek, özelleştirilmiş yüklere göre boru tasarımı yapabilmek, etriye donatısının gerekli olduğu durumlarda boru taşıma gücünü daha doğru hesaplayabilmek olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında dolaylı yöntemin temelleri anlatılmış, 3 kirişli deneyin sonuçları sonlu eleman modeli ile yapılan analizin sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Şekil 1.33'de beton boru üzerinde yapılan 3 kirişli deney gösterilmiştir.



Şekil 1.33 3 Kirişli Deney [11]

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, gömülü boruların tasarımında kullanılmak üzere zemin-yapı etkileşimini de dikkate alabilen bir sonlu eleman modelinin geliştirilmesi, analiz sonuçlarının geleneksel hesap yöntemleriyle, günümüzde yaygın olarak kullanılan AASHTO standartları ve İller Bankası A.Ş verileri ile kıyaslanmasıdır. Sonlu eleman analizlerinde kullanılmak üzere iki farklı yazılım için farklı sayısal modeller ile çalışılmış, analiz sonuçları literatürden seçilen örnek modele ait saha verileri ile karşılaştırılarak modellerin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yatak malzemesi tipinin boru üzerindeki gerilmelere etkisinin gösterilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çalışmanın sonunda uygulamacı mühendislere yardımcı olabilmek amacıyla, farklı boru çapları ve gömme derinlikleri için boru imalatında gerekli olan donatı miktarlarını gösteren bir abak verilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Gömülü boru tasarımları yapılırken, geleneksel hesap yöntemlerinin yanı sıra zemin-yapı etkileşimini daha gerçekçi bir şekilde dikkate alan sonlu eleman modelleri ile gerçekleştirilecek sayısal analizlere dayalı boru tasarımını yapmak, boru kesitini ve donatı miktarını belirlemek, farklı zemin koşullarındaki gömülü boru sistemleri için faydalı olacaktır. Pratik bir şekilde boru tasarımı için, bu çalışmada önerilen sayısal model ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerine ait nihai sonuçlar kullanılarak farklı gömme derinliklerine ve farklı boru çaplarına bağlı tasarım momentlerini veren bir abak geliştirilebilir.

2.1 Gömülü Borular

Gömülü boru sistemleri taşıma ve iletim amacıyla çok eski zamanlardan beri kullanılan mühendislik yapıları olmuşlardır. Tarihteki ilk örnekleri su kanalları ve kanalizasyon hatları olan boru sistemleri bugün çok daha farklı alanlarda değerlendirilmektedir. Boru hattının güvenliği, çevre ve ekonomi faktörleri açısından diğer taşıma yöntemlerine göre daha avantajlı olmaları sebebiyle gömülü borular halen önemli bir taşıma aracıdır. İçme suyu sistemleri, kanalizasyon sistemleri, drenaj sistemleri, gaz hatları, ısı iletim sistemleri gibi günümüz şehirleri için tercihi zorunlu yapıları oluştururlar. Gömülü boru hattının güvenliği ve dış çevrede işgal ettikleri alandan tasarruf edebilmek için elektrik, telefon, televizyon hatlarının da gömülü boru sistemleriyle taşınması oldukça yaygınlaşmıştır. Şehirler arası yollardaki menfezler ve tüneller, gömülü boru sistemlerinin ulaştırma alanındaki uygulamalarındandır. Ayrıca maden cevherleri, petrol ve gaz gibi önem arz eden endüstriyel maddelerin de iletimi gömülü boru sistemleriyle yapılabilmektedir.

Gömülü boru sistemlerinin tasarım aşaması detaylı çalışmayı gerektirir. Bu iletim sisteminin teknik açıdan yeterli ve ekonomik açıdan uygun olmasında dikkat edilir. Gömülü boru sisteminin yatırım giderlerinin yanı sıra bakım giderleri ve ömürleri de dikkate alınmalıdır. Yatırım giderleri genellikle boru hattının inşaat giderine, bakım giderleri ise boru hattının temizlik ve tadilatına, proje ömrü ise borunun asıl malzemesinin mukavemetine bağlıdır.

2.1.1 Gömülü Boruların İnşaat Aşamaları

Gömülü boru hatlarının tasarımı tamamlandıktan sonra inşaat aşamaları aşağıdaki gibidir:

1. Mülkiyet sahipleriyle anlaşma ve onaylar: Boru hattı yapımı ve devam eden işletme sırasındaki mülklerine erişimi tartışmak ve bunlara katılmak üzere etkilenen arazi sahipleriyle toplantılar düzenlenir.
2. Saha incelemesi: Boru hattı güzergahı incelenir ve inşaat sırasında erişimi kolaylaştırmak için güzergâh değiştirilir.
3. Saha hazırlığı: Buldozerler ve ekskavatörler genellikle inşaatın başlaması için hazır olan boşluğu temizlemek ve hazırlamak için kullanılır. Boru hattı tamamlandıktan sonra restorasyon çalışmalarına yardımcı olmak için üst toprak ve bitki örtüsü ayrı depolanır.
4. Malzemelerin sahaya nakliyesi: Boru, açıklığa taşınır ve hendeğin kazılacağı yerin sonuna kadar uzanır.
5. Bükme: Gerektiğinde, boruyu arazinin dış hatlarına ve boru hattı güzergahına uyacak şekilde bükme için özel makineler kullanılır.
6. Kaynak ve birleştirmeler: Boru bölümleri birbirine kaynaklıdır. Tüm kaynaklar kalitesi sağlanması amacıyla test edilir.
7. Kaplama: Kaynak alanları temizlenir ve korozyon olasılığını azaltmak için boru bağlantıları kaplanır.
8. Hendek kazısı: Hendek açmak için özel hendek açma makineleri ve ekskavatörler kullanılır.
9. Yataklama işlemleri: Boru yatağındaki doğal zeminin durumuna göre boru yatağı keskin ve sivri nesnelere arındırılıp uygun yatak malzemesi yeterli kalınlıkta boru yatağına serilir.
10. Boruyu yerleştirilmesi: Boruyu kanalın içine indirmek için özel donanım (yan bomlar) kullanılır. Boru daha sonra boru hattı kaplamasını taşlardan veya diğer keskin nesnelere korumak için ince taneli malzeme (dolgu malzemesi) ile kaplanır.
11. Geri dolgu: Hendek daha önce kazılmış olan alt zemin malzemesi ile doldurulur. Bu işlem sırasında üst topraktan alt topraktan ayrılma

sağlanmasına özen gösterilmektedir. Alt zeminler kazı yerleşimini boru hattının işletme ömrü boyunca sabit kalabilmesi için sıkıştırılmıştır.

12. Test: Su kullanarak boru, operasyonel hizmete uygun olduğundan emin olmak için basınç testinden geçirilir.

13. Arazinin eski haline getirilmesi ve işaretleme: Kalıcı erozyon kontrol yapılarının yeniden şekillendirilmesi ve kurulumunu içeren mevcut arazi formlarına uyacak şekilde bozulmuş alanlar eski durumuna getirilir. İnşaat sırasında korunan bitkisel toprak, inşaat için kullanılan alanlara geri serilir. Düzenlemeler, onay gereklilikleri ve mülk sahiplerinin görüşlerine göre yapılır. İşaretler düzenli aralıklarla ve gömülü boru hattının varlığını belirtmek için görüş alanlarına göre yerleştirilir.

2.2 Boru Tipleri

2.2.1 Asbestli Çimento Borular

Boru pürüzlülüğü az olan, korozyona karşı oldukça dayanıklı ve ömrü uzun borulardır. Birleştirilmesi basit, boru ağırlığı az ve soğuk havalarda don olaylarına karşı dayanıklıdır. Kesme darbelerine karşı zayıftır ve eğilme mukavemetleri düşüktür. Asbest maddesi sağlığa zararlı olduğu için kullanımı yaygınlığını kaybetmektedir.

2.2.2 Beton Borular

Dış yüklere karşı oldukça dayanıklı olup birleştirilmesi kolay ve boru bakımı ekonomiktir. Genellikle korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Boru tamiri zordur ve oluşabilecek çatlaklardan sızıntılar olabilir. Kullanımı yaygındır.

2.2.3 Çelik Borular

Günümüzde birçok farklı şekilde yaygın olarak farklı alanlarda kullanılmaktadır. Borunun geometrik özellikleri et kalınlığı, çapı vb. duruma göre rahatça ayarlanabilir. Toprak kayması yaşanan bölgeler için oldukça avantajlıdır. Ağır olmamaları sebebiyle taşınmaları kolaydır. Çelik maddenin korozyona karşı korunması, bu boru sisteminin kullanıldığı hatlarda çok önemlidir.

2.2.4 Font Borular

Şehir içi su şebekelerinde yaygın olarak kullanılırlar. Yüklere karşı oldukça dayanıklıdırlar. Bitüm tabakasının uygulanması ile paslanma durumlarına karşı korunmaları gerekir. Ağır borulardır. Çarpma ve darbelere karşı dayanıksızdırlar. Günümüzde geliştirilen sünek tipleri, çelik boruların yerini almaya başlamış mukavemetli borulardır.

2.2.5 Plastik Borular

Günümüzde bu boruların endüstrisinde büyük gelişmeler olmaktadır. Boru imalatında kullanılan dört temel termoplastik PVC (Polyvinyl chloride), ABS (Acrylonitrilebutadiene-styrene), PE (Polyethylene) ve PB (Polybutylene)'dir. Dış yüzeyleri pürüzsüzdür. Hafif borulardır. Korozyona karşı dayanıklıdırlar. Kolay birleştirilmeleri, esnek olmaları ve sızdırmaz olmaları kattıkları faydalardır. Plastik boruların en yaygın kullanılan tipleri PVC borular, çürüme olayına karşı dayanıklıdırlar ancak 5°C'nin altındaki sıcaklıklarda kırılabilirler. PE boruların düşük sıcaklıklarda kullanılması daha uygundur fakat çürüme ve ayrık zemin ortamlarında dezavantaj sağlarlar. Plastik boruların olumsuz yönleri sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda ve zamana bağlı olarak dayanıklılıklarının azalmasıdır.

2.3 Boru Gömülme Koşulları

Gömülü boru üzerinde oluşan gerilmeler üzerindeki toprağın cinsi, trafik yükünün yanı sıra borunun gömülme şekline bağlıdır. Literatürde üç farklı şekilde kullanılan gömülme şekli; hendek, pozitif projeksiyon ve negatif projeksiyon durumu olarak yer almıştır.

2.3.1 Hendek Durumu

Hendek durumu kendini yeterince tutabilen ve örselenmemiş zemin üzerinde kazı yapıp boru genişliğinden çok da fazla olmayan dar bir hendeğe yerleştirildikten sonra üzeri geri dolgu malzemesiyle doldurulan boru sistemleri için kullanılırlar. Bu durum, kanalizasyon hatlarında, içme suyu hatlarında, drenaj hatlarında ve gazların iletim hatlarının imalatında kullanılabilir. Genellikle zemin yüzeyine yakın küçük çaptaki boruların imalatı bu yöntem ile yapılmaktadır. Bahsi geçen hendekler

genelde yollar üzerinde şeritlere paralel olarak açılır ve büyük şehirlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Hendeğin içine yerleştirilen borunun üzerindeki geri dolgunun oluşturduğu yükler, hendek duvarları ile aralarındaki sürtünmeden dolayı, boruya etkiyen toplam zemin yüküne oranla daha azdır.

2.3.2 Pozitif Projeksiyon Durumu

Bu gömülme tipi genellikle boru eğiminin çok olmadığı ve bozulmak istenmediği durumlarda kullanılır. Boru doğal zemin üzerine veya sıkıştırma işlemi yapılmış dolgu malzemesi üzerine yerleştirilir ve daha sonra geri dolgu malzemesi ile kaplanır. Nadiren kullanılan gömülme durumudur.

2.3.3 Negatif Projeksiyon Durumu

Bu gömülme durumunda boru kısmen dar ve derin bir yatağa yerleştirilir, doğal zemin kotuna kadar geri dolgu doldurulduktan sonra, bir miktar daha doğal zeminle kot yükseltilir. Boru üzerine gelen yükleri azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir gömülme durumudur. İki katmanlı hendek çukuru boru üzerinde oluşacak gerilmeleri azaltmada önemli rol oynar.

2.4 Geçmişten Günümüze Gömülü Boruların Tasarım Yöntemleri

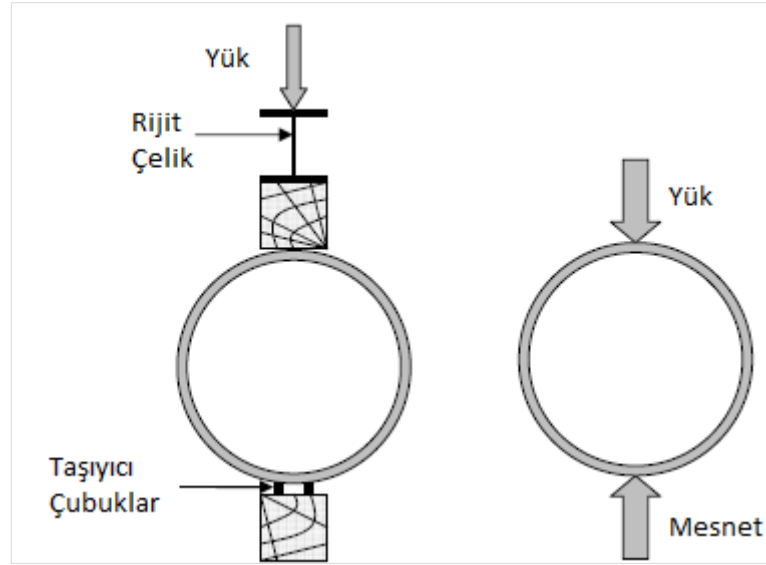
Gömülü boruların üzerindeki yükleri doğru bir şekilde hesaplayabilmek ve güvenli bir boru tasarımı yapabilmek amacıyla tarihten günümüze kadar farklı çalışmalar yürütülmüştür. 1920'lerin sonlarında Marston'un teorileriyle ortaya çıkan bu hesaplama yöntemleri 1970'lerde ACPA (American Concrete Pipe Association)'nın çalışmalarıyla geliştirilmiş ve 1983 yılında Marston'un teorileri AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials Bridge Design Specifications)'ya dahil edildi. Günümüzde çeşitli sonlu elemanlar programları da kullanılarak gömülü boruların tasarımı üzerine çalışmalar devam etmektedir.

2.4.1 Dolaylı Tasarım Yöntemi

Borular üretildikleri malzemenin direncine göre rijit ve esnek borular olarak ikiye ayrılırlar. Betonarme borular üzerlerine gelen yükün tümünü taşıyabilen ve genellikle yatay ve düşey boyutlarda %0,1'den fazla şekil değiştirmenin (ϵ) yapısal hasarlara neden olduğu rijit borular olarak tanımlanmışlardır.

Beton boru tasarımında ilk adım olarak, 1920'lerin sonlarında Marston'un teorilerini kullanarak toprak etkisine maruz kaldığında dolgu alanlarında gömülü rijit boruların üzerindeki etkilerini ve gerilmeleri belirlemek amacıyla Iowa Deney istasyonunda bir araştırma projesi yürütülmüştür. Boru tasarımı yapılırken borunun yalnızca üzerindeki zemin yüklerini taşıyacağı göz önüne alınmıştır. Ancak borunun üzerine etkiyecek yükün büyüklüğü boru rijitliğinin zemin rijitliğine oranı mertebesindedir. Boru, alt tarafının 1/3 veya 1/4'lük kısmı bir yatak malzemesi içinde kalacak şekilde yerleştirilir. Bu şekilde boruya destek sağlanarak hasar alıp kırılma durumu önlenmiş olmaktadır. Boruyu çevreleyen gömlek malzemesinin rijitlik modülü arttıkça boru üzerine etkiyen toplam yük, normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilmeler azalmaktadır. M.G. Spangler bu araştırmanın sonuçlarını ve çalışma kapsamında yatak katsayısı için genel bir denklemi literatüre kazandırmıştır [12]. Bu çalışma, daha önce Marston tarafından tanımlananlara benzer dört standart yatak tipinin tanımını da içermektedir. Marston ve Spangler'in araştırması, halihazırda kullanılan dolaylı tasarım yönteminin temelini oluşturmuştur.

Dolaylı tasarım yöntemine göre borunun gerekli mukavemeti toprak basıncının büyüklüğünün ve borunun etrafındaki gerilme dağılımının bir fonksiyonu olup ya daha evvel yapılan deneylerin ampirik değerlendirmelerinden ya da Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 3 kirişli deneyinin gerçek sonuçlarından elde edilir. 3 kirişli deneyde borunun taşıma mukavemetini belirlemek için 0,01 inç (2,54mm) çatlaklık kriteri kullanılır. Bu tasarım mukavemeti (Q_T) toplam yükün Marston-Spangler zemin-yapı etkileşim analizlerine dayanarak hesaplanan yatak katsayısına oranı olarak denklem 2.1'de tanımlanmıştır.



Şekil 2.1 3 kirişli deney ve boru yükleme durumu [9]

$$Q_T = \frac{W_E + W_L + W_F}{B_F} \quad (2.1)$$

Kolaylık sağlaması açısından tasarım mukavemeti D-yükü cinsinden ifade edilir. Bu yük, denklem 2.2'de tasarım mukavemetinin borunun iç çapına (D_i) oranı olarak belirlenmiştir. Burada; W_E = Toprak yükü, W_L = Hareketli yük, W_F = Akışkan yükü, B_F = Yatak katsayısını temsil etmektedir.

$$\text{ÖlüYük} = \frac{TEB}{D_i} \quad (2.2)$$

Burada; TEB = Tasarım mukavemeti, D_i = Boru iç çapını temsil etmektedir.

Bu D-yükleme değeri kullanılarak borunun et kalınlığı, beton dayanımı ve donatı miktarı daha önceden ilgili şartnamelerde (ASTM C 76, ASTM C 655, AASHTO M 170 ve M242) verilmiş standart değerlerle belirlenir.

Bu yöntemde seçilmiş olan yatak katsayıları tasarım parametrelerini doğrudan şekilde etkiler. Bu sebeple çoğunlukla seçilmiş olan parametreler çok fazla güvenli tarafta kalınmış olan dolayısıyla da ekonomiklikten uzak tasarımlara sebep olur. Yatak katsayısının temel açıklaması doğal zemin üzerinde çatlaklara sebep olan düşey yükün 3 kirişli deneyde beton boru üzerinde çatlama sebebinin düşey yüke oranıdır. Spangler yatak katsayısının boru ve zemin arasındaki genişlik ve

temas kalitesinin bir denklemi olduğu kanısına ulaşmıştır. Bu katsayı ayrıca yanal basıncın boyutuna ve bu basıncın etkisini gösterdiği borunun dűşey yüksekliğinin bir parçasına da bağlıdır. Yanal basınç boru üzerinde eğilme momentleri oluşmasına neden olur, bu da dűşey zemin basıncının sebep olduğu eğilme momentlerine karşı koyacak şekilde etki eder. Tüm bu ifadelerden yola çıkarak yatak katsayısı (B_f) için denklem 2.3'deki analitik denklem geliştirilmiştir:

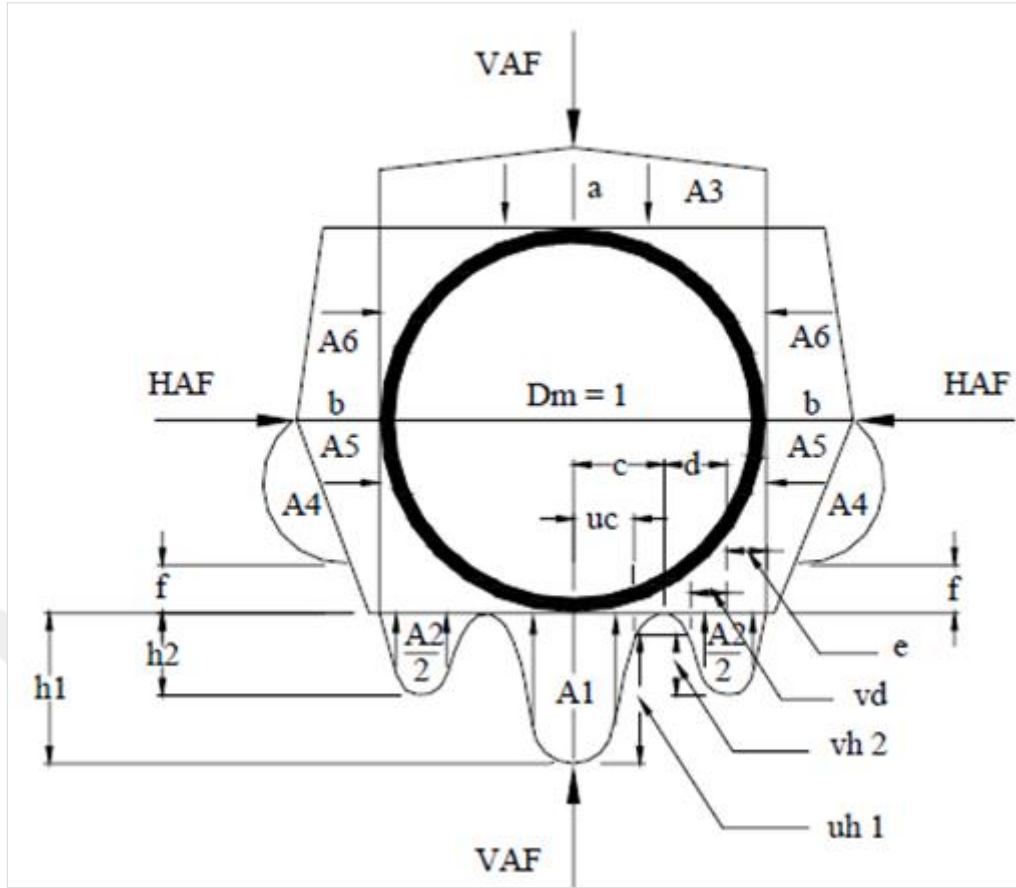
$$B_f = \frac{1.431}{N-xq} \quad (2.3)$$

Burada N dűşey yükleme ve dikey reaksiyona bağlı bir sabit, x yanal basınç dağılım fonksiyonu ve q toplam yanal basıncın toplam dikey basınca oranıdır. Yanal toprak basıncının oluşturduğu momentler borunun mukavemetine katkı sağlamaktadır. Yatak katsayısı hesaplamalarında bu durumun göz ardı edilmesi tasarım parametreleri sečilmesinde aşırı güvenli tarafta kalınmasına yol açmaktadır.

Özetle dolaylı tasarım yöntemi 19. yüzyılın başlarında geliştirilmiş olan ampirik bir yöntemdir. Bu yöntem günümüzde halen daha yaygın olarak kullanılmakta olup boru tasarımcıları bu yöntemin gömme derinliği tablolarından faydalanarak tasarım yapmaktadırlar.

2.4.2 Doğrudan Tasarım Yöntemi

Dolaylı tasarım yöntemi yakın geçmişte kabul görmüş ve yeterli bir yöntem olmasına rağmen zemin parametrelerinin daha iyi bilinmesi ve yapısal analiz yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde beton boruların tasarımında önemli ilerlemeler olmuştur. 1970'li yıllarda ACPA tarafından beton boru-zemin yerleşim performanslarını incelemek için uzun vadeli araştırma programları başlatılarak beton boruların yapısal davranışı ve boru-zemin etkileşimleri incelenmiştir. Bu araştırmanın bir sonucu olarak yeni standart yerleşim tipleri ve Heger toprak basınçları önerilmiştir. Şekil 2.2'de Heger toprak basınç dağılımı, Tablo 2.1'de ise kurulum tiplerine göre Heger toprak basınç dağılımı katsayıları gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Heger toprak basınç dağılımı [13]

Tablo 2.1 Kurulum tiplerine göre heger toprak basınç dağılımı katsayıları [13]

Kurulum Tipi	VAF	HAF	A1	A2	A3	A4	A5	A6	a	b	c	e	f	u	v
1	1,35	0,45	0,62	0,73	1,35	0,19	0,08	0,18	1,40	0,40	0,18	0,08	0,05	0,80	0,80
2	1,40	0,40	0,85	0,55	1,40	0,15	0,08	0,17	1,45	0,40	0,19	0,10	0,05	0,82	0,70
3	1,40	0,37	1,05	0,35	1,40	0,10	0,10	0,17	1,45	0,36	0,20	0,12	0,05	0,85	0,60
4	1,45	0,30	1,45	0,00	1,45	0,00	0,11	0,19	1,45	0,30	0,25	0,00	-	0,90	-

Heger toprak basıncı dağılımındaki A1-A6 katsayıları toprak basıncının boyutsuz düşey ve yatay bileşenleri, a-v ise boyutsuz düşey ve yatay ölçüleri tanımlamak için kullanılan katsayılardır. Heger basınç dağılımları sonucunda hesaplanan düşey kemerlenme faktörü (VAF), dolaylı tasarım yönteminde toprak basınçlarının hesaplanmasında da uygulanır.

Doğrudan tasarım yönteminde gerekli boru mukavemeti, moment, aksel kuvvet ve kayma gerilmeleri ile belirlenir. Bu tesir kuvvetlerinin değerlerini boru etrafındaki basınç dağılımı belirler. Moment, aksel kuvvet ve kayma bir bilgisayar programı veya uygun katsayılarla el hesaplamaları kullanılarak hesaplanabilir. Literatürde tanımlı moment (M), aksel kuvvet (N) ve kayma kuvveti (V) formülleri denklem 2.4, 2.5 ve 2.6'da verilmiştir. [13]

$$M = \frac{C_{mi} \times W_i \times D_m}{2} \quad (2.4)$$

$$N = C_{ni} \times W_i \quad (2.5)$$

$$V = C_{vi} \times W_i \quad (2.6)$$

Burada; C_{mi} = Moment hesabı için boru analiz katsayısı, C_{ni} = Aksel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısı, C_{vi} = Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısı, W_i = Boru üzerine gelecek yüklerin toplamı, D_m = Boru dış çapı'nı temsil etmektedir.

Bu programda beton mukavemeti, donatı gereksinimi ve et kalınlığı değerleri mukavemet ve çatlak genişlik sınır durumlarına dayanan rasyonel prosedürler kullanılarak belirlenir. Bu eşitliklerde W_i boru üzerindeki yüklerin toplamını ifade eder. Boru üzerindeki toprak yükü W_e , borunun kendi ağırlığından dolayı oluşacak olan yük W_p , varsa akışkan yükü W_f , varsa hareketli yük W_l yüklerini içermektedir. Her bir yük için kesit tesirleri hesaplanarak daha sonra ilgili şartnameye göre faktörlenerek toplanmalıdır. Farklı yükler için boru analiz katsayıları Tablo 2.2'deki sunulmuştur [13]

Tablo 2.2 4. kurulum tipi için boru analiz katsayıları [13]

Lokasyon	Yük Tipi	C_{mi}	C_{ni}	C_{vi}
Boru Alt	W_p	0,235	0,077	
	W_e	0,131	0,128	
	W_f	0,160	-0,403	
	WL1	0,185	0,152	
	WL2	0,237	-0,004	
Boru Üst	W_p	0,079	-0,077	
	W_e	0,118	0,079	
	W_f	0,076	-0,232	
	WL1	0,110	0,114	
	WL2	0,255	0,004	

Boru Yan Duvar	Wp	-0,101	-0,287	
	We	-0,127	0,504	
	Wf	-0,095	-0,057	
	WL1	-0,121	0,495	
	WL2	-0,168	0,492	
Kritik Kesme	Wp		0,188	0,431
	We		0,211	0,309
	Wf		-0,323	0,284
	WL1		0,229	0,305

Düsey ve yatay kemerlenme faktörleri boru üzerindeki boyutsuz toplam düsey ve yatay yükleri temsil ederler. Gerçek toplam düsey ve yatay yükler bu kemerlenme katsayılarının PL (boru üzerindeki prizma yükü) ile çarpıldıktan sonra bulunur. PL borunun üzerindeki toprak örtüsünün ağırlığıdır ve uluslararası birim sistemine göre denklem 2.7'deki gibi hesaplanır.

$$PL = \left(\frac{w \cdot D_o}{1000} \right) \cdot \left(H + \left(\frac{0,107 \cdot D_o}{1000} \right) \right) \quad (2.7)$$

Burada; PL= Prizma yükü, w= zemin birim hacim ağırlığı (kN/m³), D_o= borunun dış çapı (m), H= borunun üst kısmındaki dolgu yüksekliği (m)'ni temsil etmektedir.

Boru üzerine etkiyen araç yükü boru çapına ve dolgu yüksekliğine bağlı olarak Tablo 2.3 yardımıyla bulunur.

Tablo 2.3 Boru üzerindeki dolgu yüksekliğine bağlı araç yükü [14]

Boru Çapı (m)	Boru Üzerindeki Dolgu Yüksekliği (m)								
	0,305	0,610	0,914	1,219	1,524	1,829	2,134	2,438	2,743
0,38	34,44	18,68	9,63	6,57	5,11	4,09	3,36	2,77	2,34
0,46	38,09	21,31	10,95	7,59	5,84	4,67	3,79	3,21	2,77
0,53	41,15	23,64	12,26	8,46	6,57	5,25	4,38	3,65	3,06
0,61	43,93	25,98	13,57	9,34	7,30	5,84	4,82	4,09	3,50
0,69	42,91	28,17	14,74	10,22	8,17	6,42	5,25	4,38	3,79
0,76	41,30	30,21	15,76	10,95	8,61	7,01	5,69	4,82	4,09
0,84	42,76	32,11	16,93	11,82	9,19	7,44	6,13	5,25	4,38
0,91	41,01	34,00	17,95	12,55	9,78	8,03	6,57	5,55	4,82
0,99	38,97	35,61	18,83	13,28	10,36	8,46	7,01	5,98	5,11
1,07	37,21	37,36	19,85	13,86	10,95	8,90	7,44	6,28	5,40

1,22	34,00	36,19	21,45	15,18	11,97	9,78	8,17	6,86	5,98
1,37	31,38	34,44	23,06	16,35	12,99	10,65	8,90	7,59	6,42
1,52	29,04	32,84	24,52	17,37	13,86	11,38	9,49	8,17	7,01
1,68	27,00	31,52	23,93	18,39	14,74	12,11	10,22	8,61	7,44
1,83	25,25	31,96	22,91	19,41	15,47	12,84	10,80	9,19	7,88
1,98	23,79	32,69	22,18	20,29	16,20	13,43	11,38	9,63	8,32
2,13	22,47	33,42	21,31	19,85	16,93	14,01	11,82	10,07	8,76
<p>Bilgi ve Notlar: Ham zemin üzerine uygulandığı varsayılmıştır.</p> <p>AASHTO HS20 kamyon yüküne göre hesaplanmıştır.</p> <p>3,05 metre ve üzerindeki dolgu yüksekliklerinde araç yükü ihmal edilmiştir.</p> <p>Yük birimi kN/m'dir.</p>									

Özetle doğrudan ve dolaylı yöntem arasındaki farklar Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Dolaylı ve doğrudan yöntemin kıyaslanması [9]

Dolaylı Yöntem	Doğrudan Yöntem
1. Toprak yükünün hesaplanması	1. Toprak yükünün hesaplanması
2. Hareketli yük seçilmesi	2. Hareketli yük seçilmesi
3. Kurulum tipi seçilmesi	3. Kurulum tipi seçilmesi
4. Yatak katsayısının hesaplanması	4. Moment, aksenal kuvvet ve kayma kuvvetinin hesaplanması
5. Tasarım yükünün hesaplanması	5. Et kalınlığı, beton mukavemeti ve donatıların hesaplanması
6. İlgili şartnamelere göre boru özelliklerinin belirlenmesi	

Tablodan anlaşılacağı üzere dolaylı yöntem ve doğrudan yöntem toprak yükünün hesaplanması ve kurulum tipinin seçilmesi gibi bir çok açıdan benzerlik gösterse de dolaylı yöntemin esasları yatak katsayısı hesabına dayanırken, doğrudan yöntemin esasları kesit tesirlerinin hesaplanması ilkesine dayanır.

3.1 Plaxis2D-2018 Programı ile Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Gömülü rijit borular üzerinde yapılan çalışmalar, birbirinden farklı hesaplama yöntemlerini literatüre kazandırmış fakat günümüzde hemen her araştırmacı gömülü boru tasarımında sistemi sayısal olarak modellemenin çok önemli olduğunun vurgusunu yapmış hatta bazı araştırmacılar tarafından borunun sayısal ortamda modellenip analizinin yapılmasının mutlaka gerekli olduğu savunulmuştur.

Bu çalışmada, saha verilerini kalibre etmek ve boru üzerindeki gerilmelerin farklı durum ve senaryolardaki değişimini daha hızlı ve pratik olarak belirleyebilmek için iki boyutlu sonlu eleman programı (Plaxis2D-2018) kullanılarak bir arazi deneyi modellenmiştir. Plaxis2D-2018 programı [15] geoteknik mühendisliğinde zemin davranışını gerçeğe yakın olarak tahmin edebilmek için yaygın olarak kullanılan bir programdır. Bu programda arazideki zemin ve yükleme durumları gerçeğe yakın olarak modellenenmektedir. Bu amaçla zeminin başlangıç koşulları ve yükleme aşamaları, kazı ve dolgu işlemleri dikkate alınabilmektedir.

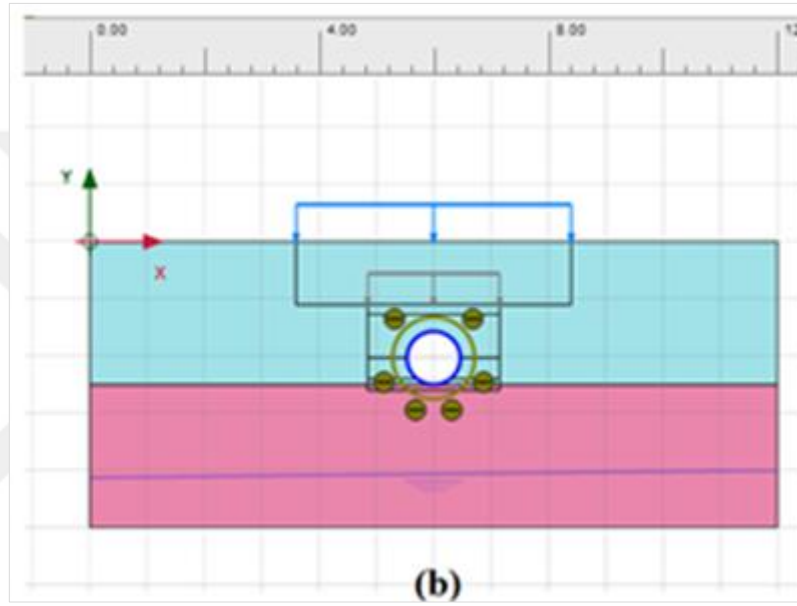
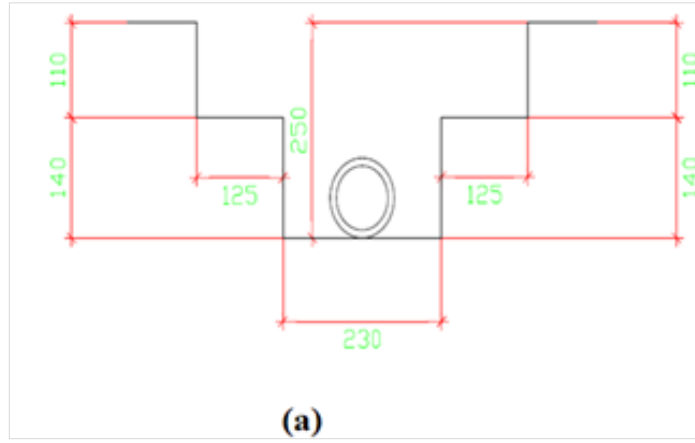
Tablo 3.1'de sonlu eleman programını kalibre etmek için kullanılan saha verileri gösterilmiştir. Saha deneyi 2000 yılında Kanada bölgesinde yapılmıştır. Bu deneyde 2,4 m uzunluğunda dış çapı 930 mm ve et kalınlığı 180 mm olan beton bir boru kullanılmıştır. Arazi deneyinin yapıldığı bölgede zemin siltli killi bir kum zemindir.

Tablo 3.1 Saha deneyi verileri [16]

Deney Sahası	Hanson Pipe and Products Canada Inc.
--------------	--------------------------------------

Doğal Dolgu Malzemesi	Siltli kil geçişleri olan siltli kum
Yatak Malzemesi	Düşük plastisiteli organik siltli kil
Toplam Kazı Derinliği(m)	2,50
Boru İç Ölçüsü(mm)	750
Boru Dış Ölçüsü(mm)	930
Segment Uzunluğu(m)	2,4

Saha deneyinde, önce 1,1 metrelik geniş bir kazı ardından 1,4 metrelik daha dar bir kazı yapılarak toplam kazı derinliği 2,5 metre olacak şekilde bir hendek açılmıştır. Daha sonra borunun oturacağı zemine 10 santimetre kalınlığında ince daneli bir malzeme konularak yatak elde edilmiştir. Ardından borunun altına, üstüne, sağına dikey ve soluna yatay olmak üzere basınç ölçerler yerleştirilmiştir. Basınç ölçerlerin, geri dolgu yapılması sırasında zarar görmesini engellemek için kum yastıklar kullanılmıştır. Şekil 3.1a'da hendek kazı kesiti ve basınç ölçerlerin yerleşimi gösterilmiştir. Şekil 3.1b'de gösterilen borunun sağ ve sol tarafına biri yatay biri dikey gerilmeyi ölçmek üzere 20cm mesafede basınç ölçerler yerleştirilmiştir. Boru taç kısmındaki basınç ölçer 10cm mesafede, boru alt kısmındaki basınç ölçer ise boru tabanına 10cm mesafeye yerleştirilmiştir. Hendek içine yerleştirilen boru, geri dolgu ile adım adım kapatılırken basınç ölçerlerden her bir geri dolgu adımı sonunda okumalar alınmıştır. Boru kurulumu tamamlandıktan sonra her bir basınç ölçerden zemin gerilmesi değerleri okunmuştur Böylece istenilen seviyeye ulaşmaya kadar dolgu gerçekleştirilerek arazi ölçümleri elde edilmiştir.



Şekil 3. 2 (a) Kazı geometrisinin bilgisayar ortamında çizimi (b) Plaxis-2018 programında kazı modelinin oluşturulması

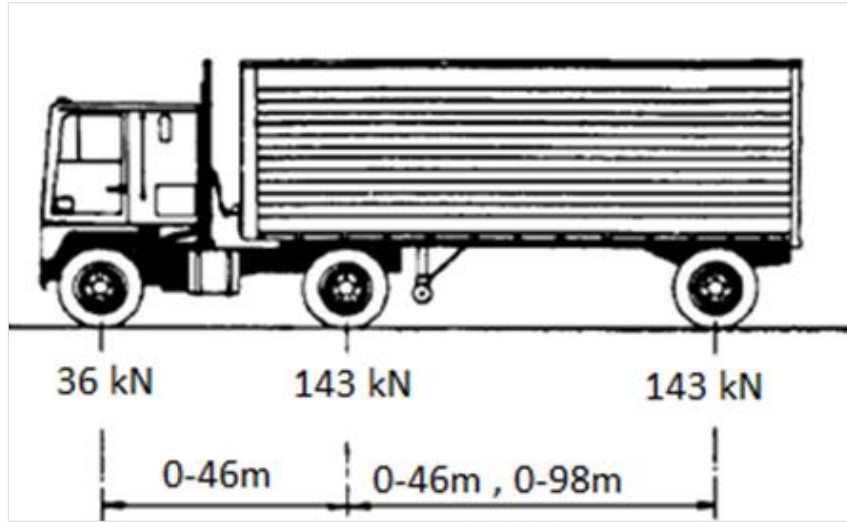
Zemin elastisite modülleri için literatür ile uyumlu veriler kullanılmıştır [17, 18, 19, 20]. Yatak malzemesi için saha deneyinde ince kum kullanıldığından bu malzeme için elastisite modülü 20000-50000 kN/m² arasında alınmıştır. Boru temelindeki malzeme düşük plastisiteli organik kil için elastisite modülü 5500 kN/m² alınmıştır. Geri dolgu malzemesi siltli kum için elastisite modülü 20000 kN/m² alınmıştır. Sonlu eleman modeli oluşturulurken ihtiyaç duyulan bir diğer önemli zemin parametresi de içsel sürtünme açılarıdır. Zemin içsel sürtünme açıları literatür ile uyumlu verilerden seçilmiştir. Yatak malzemesi ince kum için içsel sürtünme açısı 40 derece, boru temelindeki düşük plastisiteli organik kil için içsel sürtünme açısı 20 derece, geri dolgu malzemesi siltli kum için içsel sürtünme açısı 25 derece

alınmıştır [18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Sonlu eleman programına tanıtılan zeminlerin birim hacim ağırlıkları programa girilmelidir. Modelde kullanılan zemin birim hacim ağırlıkları için literatür ile uyumlu veriler kullanılmıştır. Yatak malzemesi ince kum için zemin birim hacim ağırlığı 20N/m^3 , boru temelindeki düşük plastisiteli organik kil için zemin birim hacim ağırlığı 20kN/m^3 , geri dolgu malzemesi siltli kum için zemin birim hacim ağırlığı 21kN/m^3 alınmıştır [22, 28]. Sonlu eleman modeline zemini tanıtırken girilen dördüncü ve son değer de zemin kohezyonlarıdır. Zemin kohezyonları literatür ile uyumlu verilerden alınmıştır [29, 30,]. Yatak malzemesi ince kum kohezyonsuz kabul edilmiş, boru temelindeki düşük plastisiteli organik kil için kohezyon 10 kPa , geri dolgu malzemesi kil geçişleri olan siltli kum için 7kPa alınmıştır. Sonlu eleman modelinde kullanılan zemin parametreleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Sonlu Eleman Modelinde Kullanılan Zemin Parametreleri

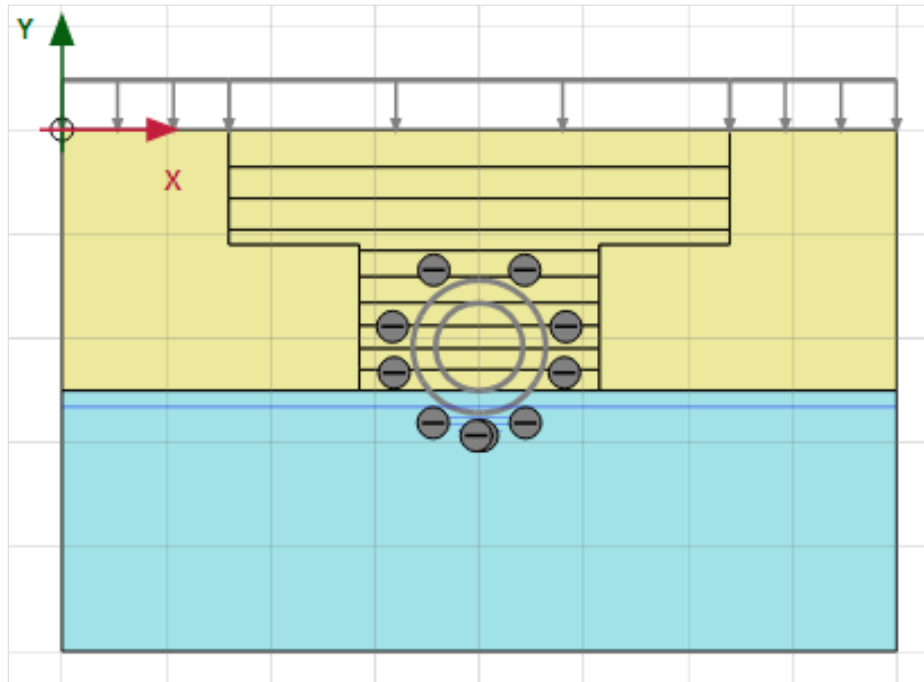
Zemin Parametresi	Yatak Malzemesi İnce Kum	Geri Dolgu Malzemesi Siltli kum	Boru Temelindeki Düşük Plastisiteli Organik Kil
Elastisite Modülü (kN/m^2)	35000	20.000	5500
İçsel Sürtünme Açısı ($^\circ$)	40	25	20
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	20	21	20
Kohezyon (kPa)	0	7	10

Trafik yükü olarak Şekil 3.3’de görüldüğü gibi AASHTO LRFD 2010’daki tasarım kamyonu kullanılmış, kamyonun arka dingillerinden her bir dingilden çizgisel olarak 280 kN , ön dingilden ise 80 kN yük geldiği kabul edilmiştir. Tasarım çizgisel yükü olarak $9,3\text{ kN/m}$ sonlu eleman modeline etkilmiştir. [31]

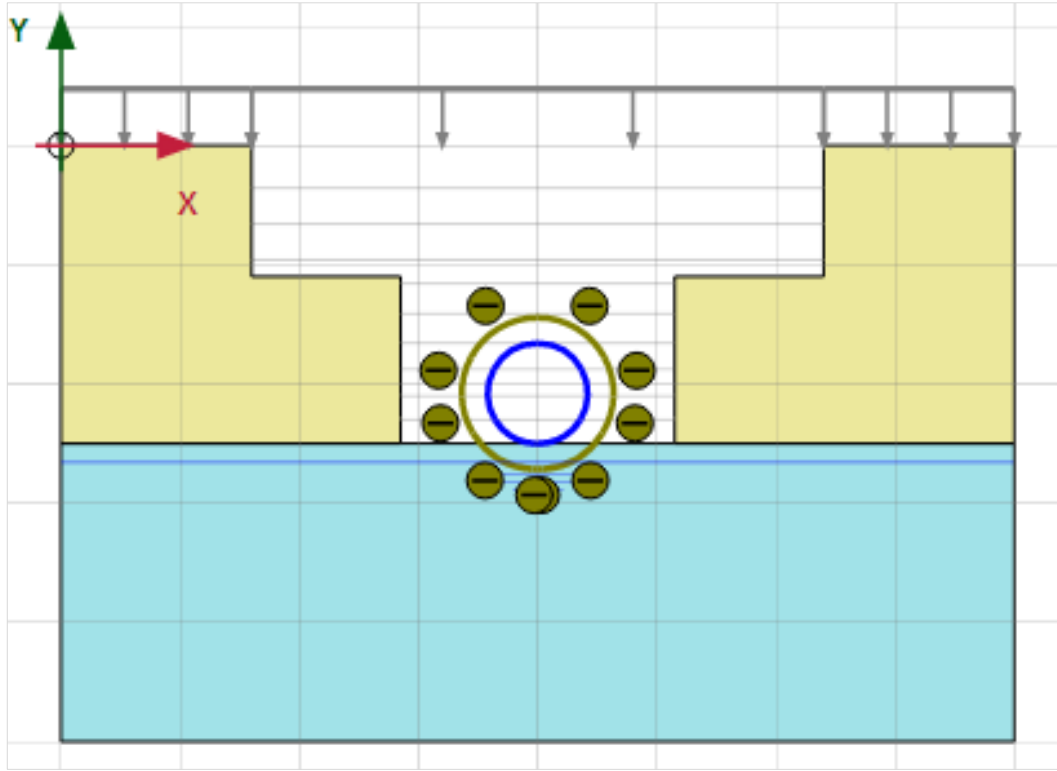


Şekil 3. 3 Tasarım Dingil Yükleri [31]

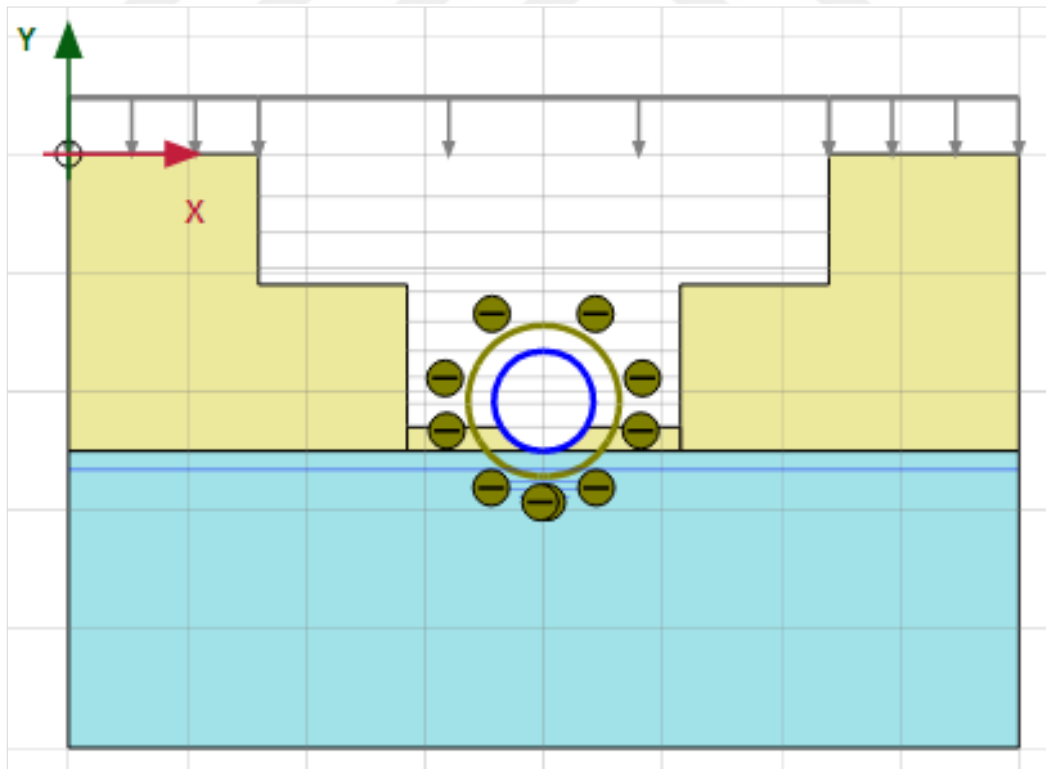
Sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamaları sahadaki deney ile benzer şekilde boru kurulumunun yapılması, boru üzerinin geri dolgu malzemesi ile örtülmesi ve trafik yüklemelerinin verilmesi aşama aşama Şekil3.4-Şekil 3.16 'da gösterilmiştir.



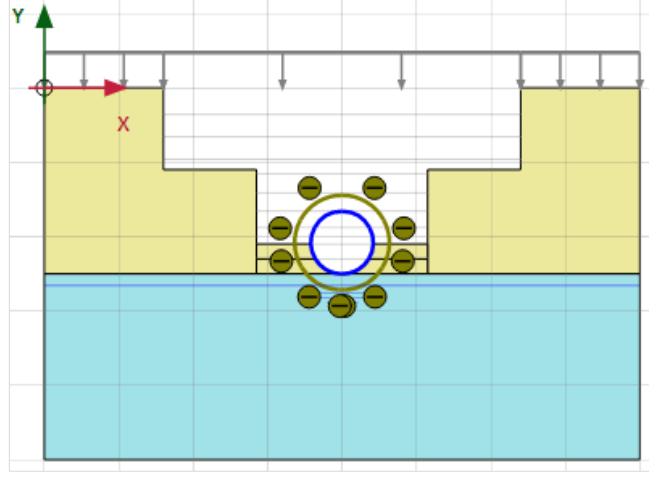
Şekil 3.4 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 1



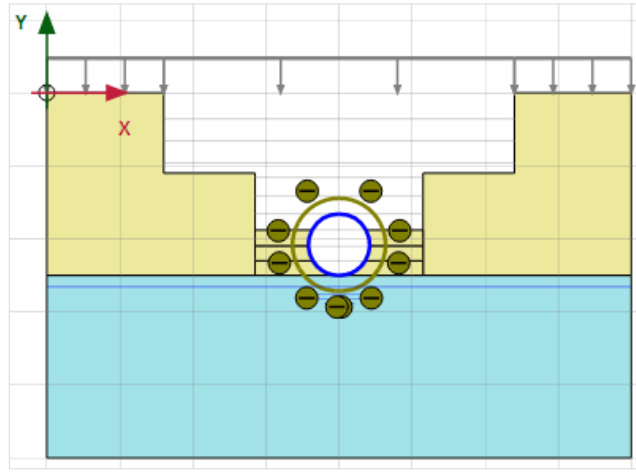
Şekil 3.5 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 2



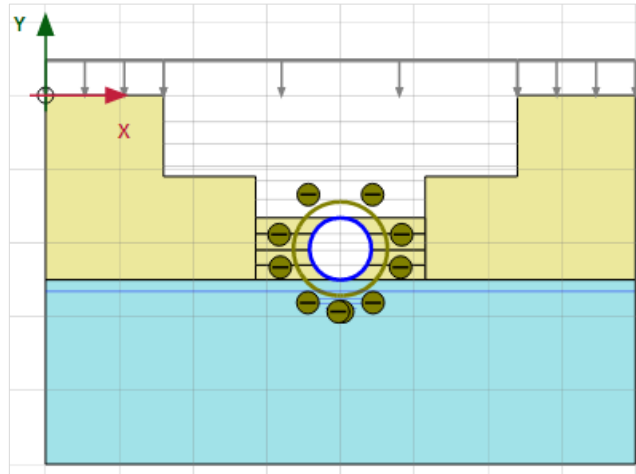
Şekil 3.6 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 3



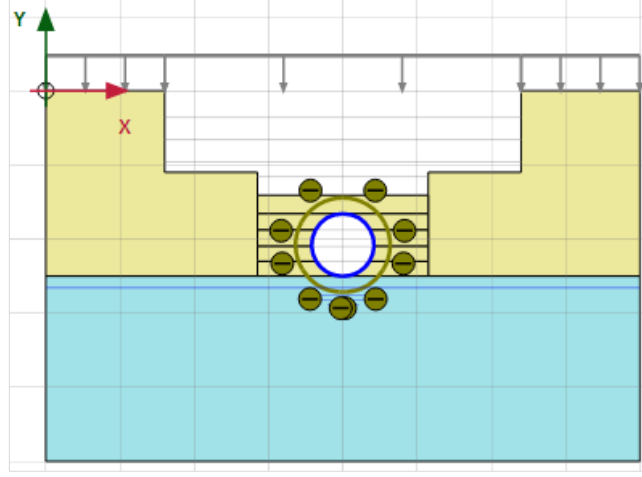
Şekil 3.7 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 4



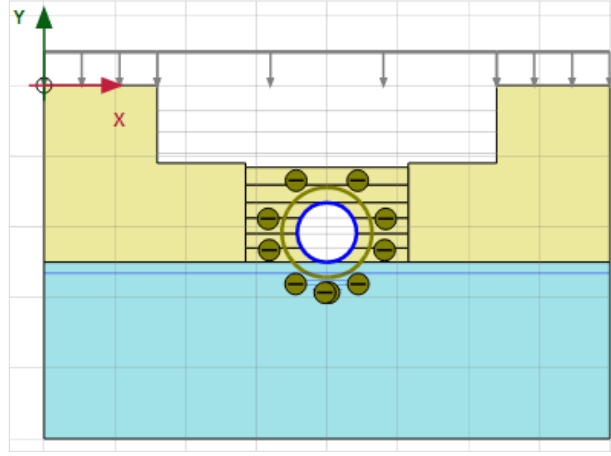
Şekil 3.8 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 5



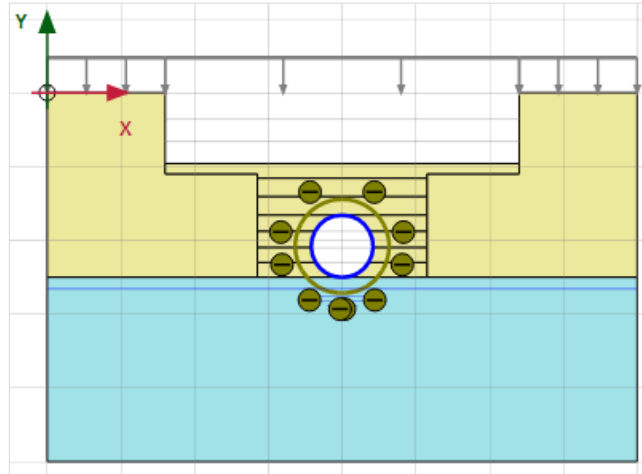
Şekil 3.9 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 6



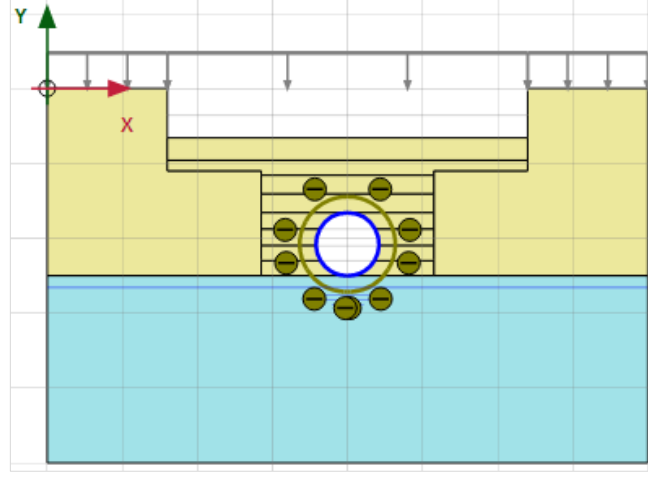
Şekil 3.10 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 7



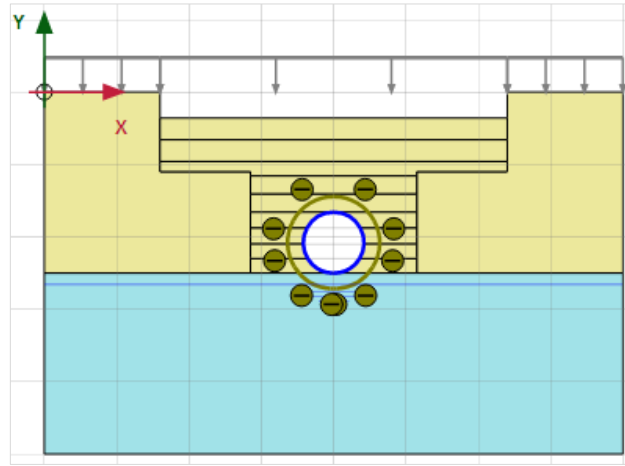
Şekil 3.11 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 8



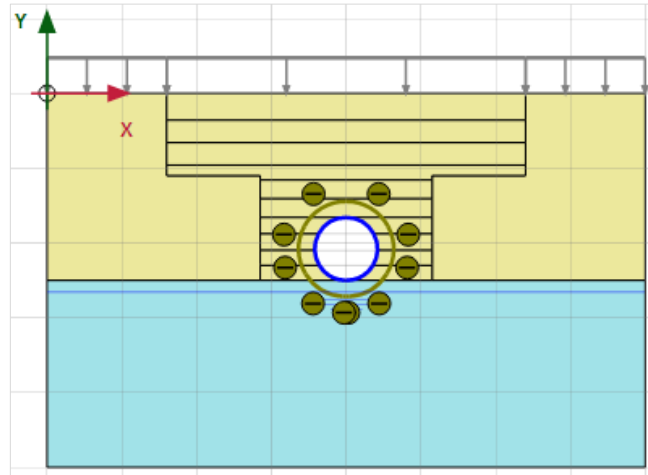
Şekil 3.12 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 9



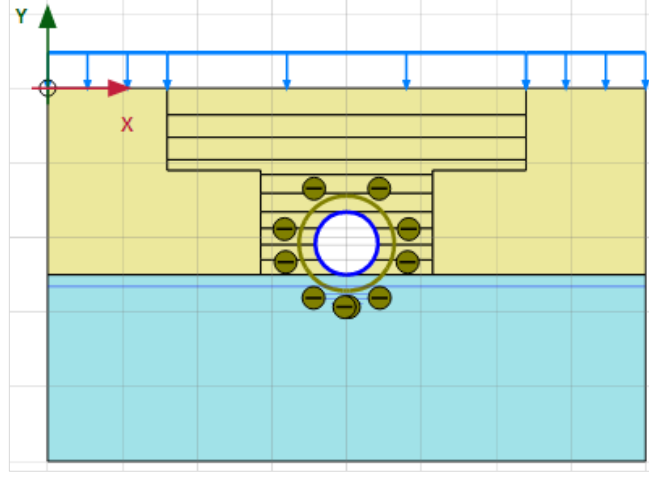
Şekil 3.13 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 10



Şekil 3.14 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 11

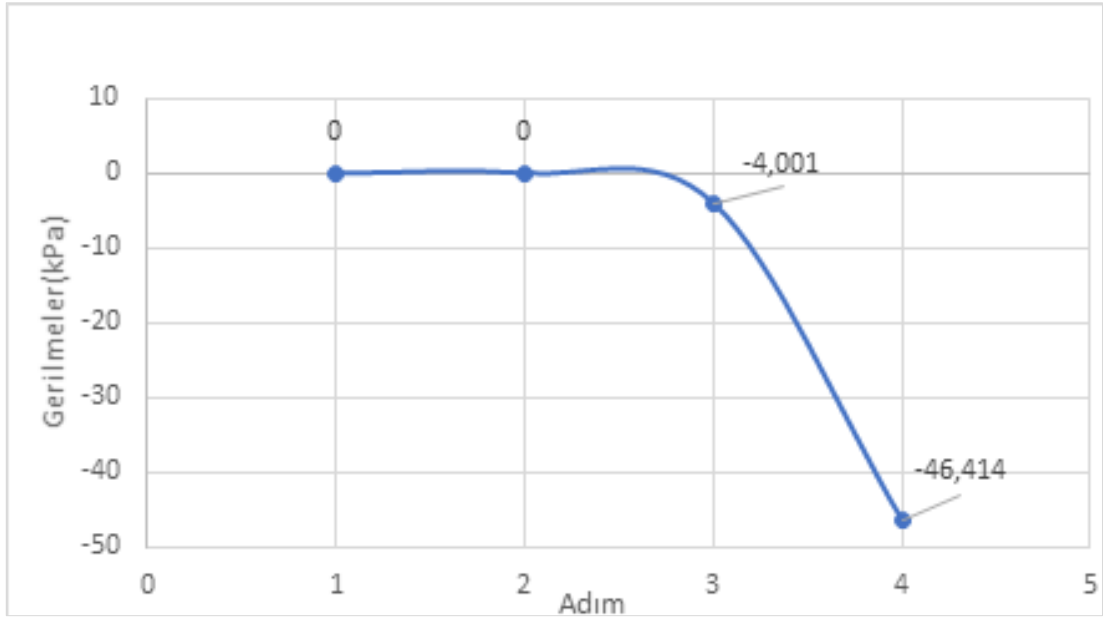


Şekil 3.15 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 12



Şekil 3.16 Plaxis2D-2018 Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması Aşama 13

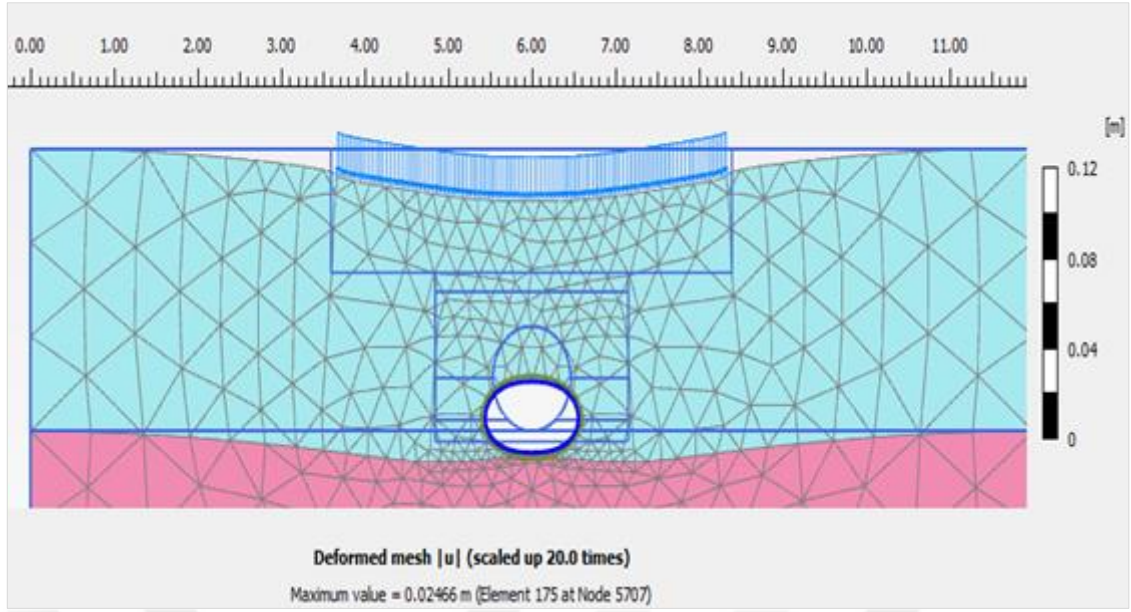
Ayrıca sahada boru kurulumu yapılırken geri dolgu malzemesi doldurulduğu esnada katman katman yapılan sıkıştırmalar, sonlu eleman modeline düşey yük olarak yansıtılmıştır. Ardından sonlu eleman programına analiz adımları tanımlanmıştır. Analiz adımları, saha deneyinin sonuçlarında olduğu gibi önce geri dolgu yapılmadan boru kurulumu bittikten sonraki adım daha sonra borunun yarısına kadar dolgu yapıldıktan sonraki adım, daha sonra borunun taç kısmını 300 milimetre geçinceye kadar dolgu yapıldıktan sonraki adım ve en son da boru kurulumunun bittiği ve trafik yüklemesinin yapıldığı adım olarak toplamda 4 adım tanımlanmış ve analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda çıkan gerilme değerleri not edilip, model üzerinde zemin genişliği artırılmış ve analiz sonuçlarında boru üzerindeki gerilme değerlerini etkilemeyecek seviyeye gelinceye kadar model sınırı genişletilmiştir. Analiz sonucunda saha deneyi sonuçlarına yakın gerilme değerleri bulunsa da literatürde verilen zemin parametreleri belirli aralıklar için verildiğinden o aralıklarda elastisite modülü vb. parametreleri değiştirerek saha deneyi sonuçlarındaki gerilme değerleriyle neredeyse aynı değerler elde edilinceye kadar iterasyon yapılmış ve sonuçta Şekil 3.17’de gösterildiği gibi sonlu eleman modeli saha verileriyle uyumlu hale getirilmiştir. Kalibrasyonu yapılmış olan bu sonlu eleman modeli çeşitli verileri değiştirerek bir gömülü boru üzerindeki etkilerin ve sonuçlarının analizinin yapılıp değerlendirme yapılabilecek duruma gelmiştir.



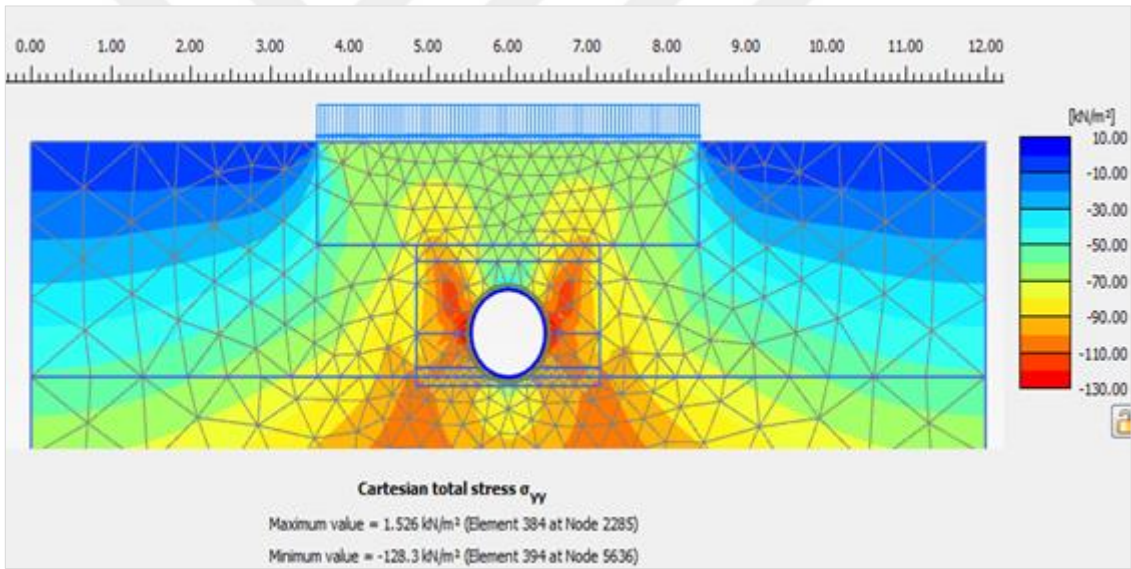
Şekil 3.17 Kalibrasyonu Yapılmış Sonlu Eleman Modeli Gerilmeler (Analiz adımları 1.Adım=2.Aşama, 2.Adım=4.Aşama, 3.Adım=8.Aşama, 4.adım=13.Aşama)

3.2 Yatak Malzemesi ve Geri Dolgu Malzemesinin Rijit Boru Üzerindeki Gerilmelere Etkisi

Gömülü boru sistemleri uygulanırken genellikle borunun altına yumuşak ve ince daneli bir zemin serilir. Bunun nedeni iri daneli zeminlerin borunun yapacağı basınca vereceği tepki ile boru üzerinde çatlamalara ve kırılmalara sebep olmasıdır. Yumuşak veya çok sert olmayan zeminlerde kazı yapıldıktan sonra doğal zemin de yatak malzemesi olarak borunun altına 10-20 cm aralıklarında serilebilmektedir. Birçok zaman gömülü boru sistemini uygulamak için hendek kazısı yapıldıktan sonra dışarıdan mukavemeti yüksek ve ince daneli zemin temin edilir. Bu da bu sistemlerin uygulanmasında ciddi bir maliyet kalemi oluşturmaktadır. Özellikle ariyet ocaklarının imalat bölgesine uzak olduğu yerlerde nakliyat bedeli maliyeti ciddi oranda etkilemektedir. SIDD (Direk dizayn yöntemiyle standart kurulum) tip4 gömülü boru sistemlerinde geri dolgu malzemesi ve yatak malzemesi olarak doğal zeminin kullanılmasını ön görür. Bu çalışmada da bu yöntem kullanılarak elde edilmiş saha deneyi verileri kullanılarak kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde, yatak malzemesi olarak kullanılan zeminin tipinin değiştirilmesinin boru üzerindeki gerilmelere olan etkisi incelenmiştir. Yatak malzemesi değiştirilen sayısal model Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

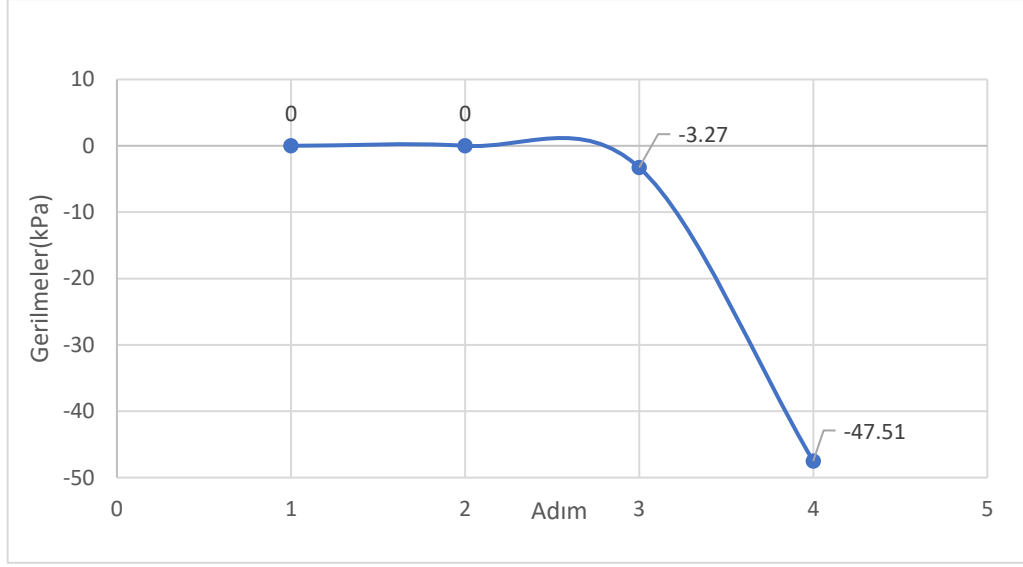


Şekil 3.19 Analiz Sonucunda Deforme Olmuş Boru ve Zemin Modeli

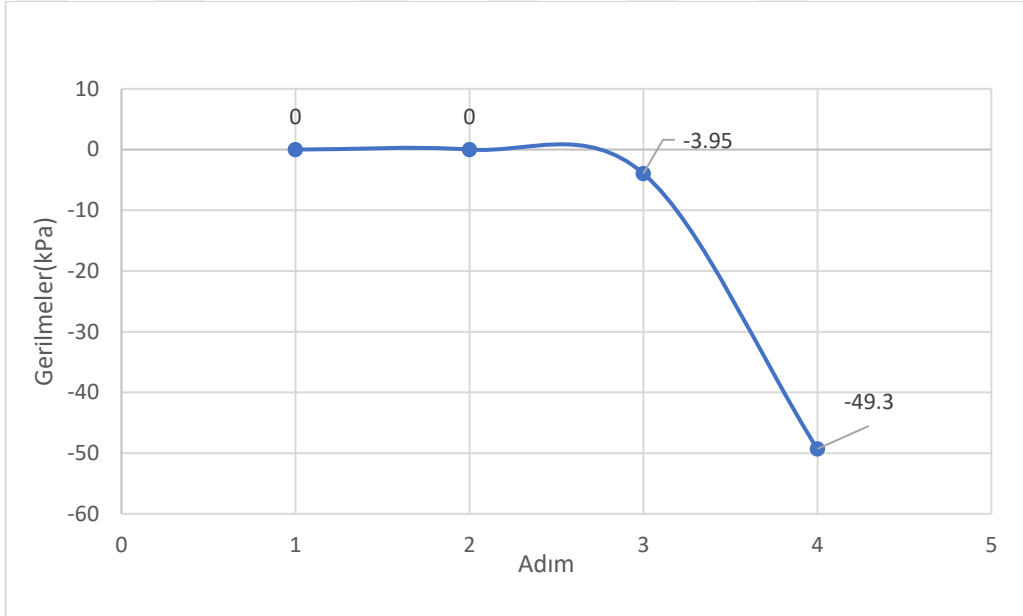


Şekil 3.20 Düşey Yönde Gömülü Boru Etrafında Oluşan Gerilme Dağılımı

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi, yatak malzeme cinsi gevşek kum seçildiğinde nihai durumda borunun taç kısmında oluşan gerilme 46,4 kPa iken, yatak malzemesi orta sıkı kum seçildiğinde bu değer 47,51 kPa, sıkı kum seçildiğinde 49,3 kPa olmuştur. Bu sonuçların gösterdiği üzere, yatak malzemesi sıklığı arttıkça boru üzerinde oluşan gerilmeler de artış meydana gelmiştir.



(a)

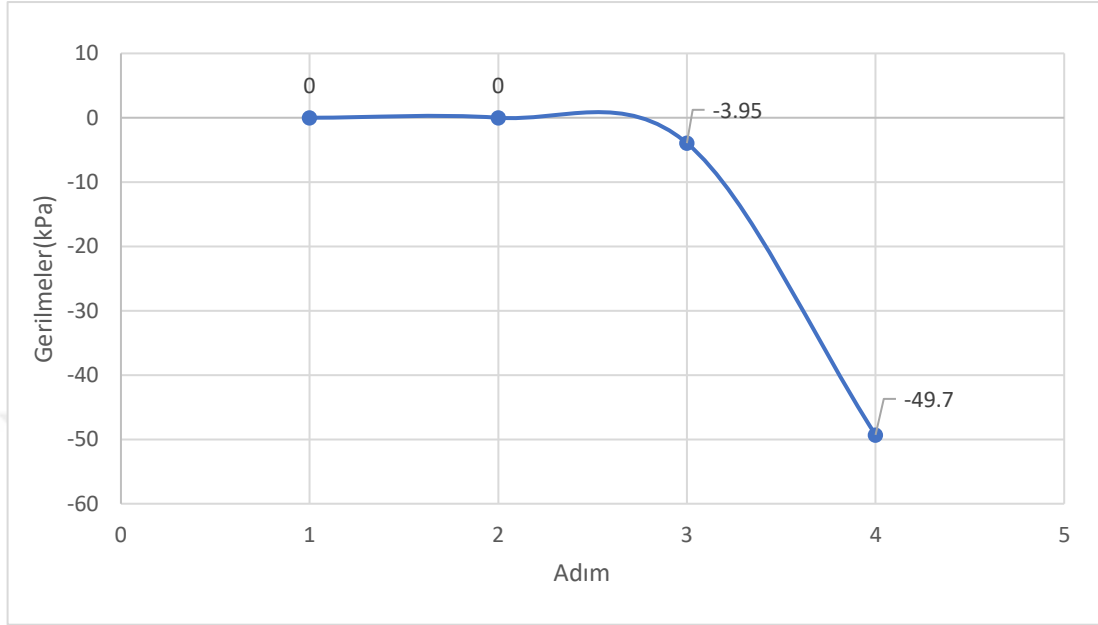


(b)

Şekil 3.21 (a) Orta sıkı kum gerilme sonuçları (b) Sıkı kum gerilme sonuçları
(Analiz adımları 1.Adım=2.Aşama, 2.Adım=4.Aşama, 3.Adım=8.Aşama, 4.adım=13.Aşama)

Son olarak, yatak malzemesi olarak sıkı kum kullanılan zemin modelinde 10 cm olan yatak malzemesi kalınlığı iki katına çıkarılıp 20 cm yapıldığında, boru üzerinde oluşan gerilmelerin analizi yapılmıştır. Şekil 3.22'de görüldüğü üzere, analiz

sonuçları sıkı kum olarak kullanılan yatak malzemesinin kalınlığının arttıkça boru üzerindeki gerilmelerin arttığını göstermiştir.



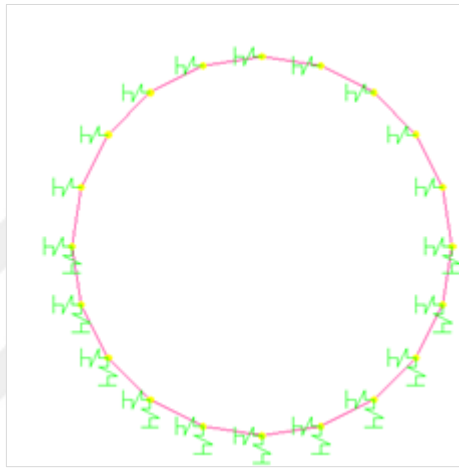
Şekil 3.22 Kalınlığı Artırılmış Sıkı Kum Gerilme Sonuçları (Analiz adımları 1.Adım=2.Aşama, 2.Adım=4.Aşama, 3.Adım=8.Aşama, 4.adım=13.Aşama)

3.3 SAP2000 Programı ile Sayısal Modelin Oluşturulması

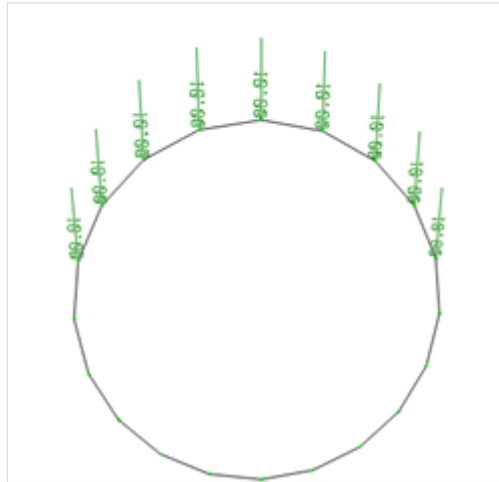
SAP2000-ver.15 [2], her çeşit yapı sisteminin tasarımı ve yapısal analizi için kullanılan bir inşaat mühendisliği programıdır. SAP2000-ver.15 nesne tabanlı bir modelleme imkânı sunar. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak kullanıcıya karmaşık geometrileri sonlu sayıya bölerek her birinin ayrı ayrı analizini yapma olanağı sağlar. SAP2000-ver.15 programında yapılar basit bir kiriş, levha veya kendi kesit özelliğinde tanımlanabilir. Yapı üzerindeki yüklemeler yapıldıktan sonra en elverişsiz duruma göre yapının analizi yapılır ve üzerinde oluşan kesit tesirleri ve gerilmeler rahatça okunabilir.

Bu çalışma kapsamında saha deneyi yapılan ve üzerindeki gerilmeler okunan gömülü boru sistemi öncelikle zemin verilerini daha detaylı girerek zemini daha iyi tanıtmaya olanak sağlayan yapı zemin etkileşimini dikkate alan bir program olan Plaxis2D-2018 programı ile modellenmiş ve analiz gerçekleştirilerek boru üzerinde kesit tesirleri hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen kesit tesirlerini doğrulamak

amacıyla boru, SAP2000-ver.15'de modellenerek çözüm tekrarlanmıştır. Sayısal modelde öncelikle 1m genişliğinde boru kesiti bir boyutlu (1B) çubuk eleman (Frame) ile modellenmiştir. Ayrıca daha gerçekçi olması açısından boru iki boyutlu (2B) alan eleman (Area) olarak modellenmiş ve çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki modellemeye de gömülü boru sistemi etrafındaki zemin elastik yaylar ile tanımlanmıştır. Yay katsayıları için yatak zemini düşük plastisiteli organik kil için 30000 kN/m³ geri dolgu malzemesi siltli kum için ise 24000 kN/m³ alınmıştır [15]. Kiriş olarak modellenen boru sistemi Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Boru üzerine uygulanan 10 kN/m³ sürşarj yükü Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



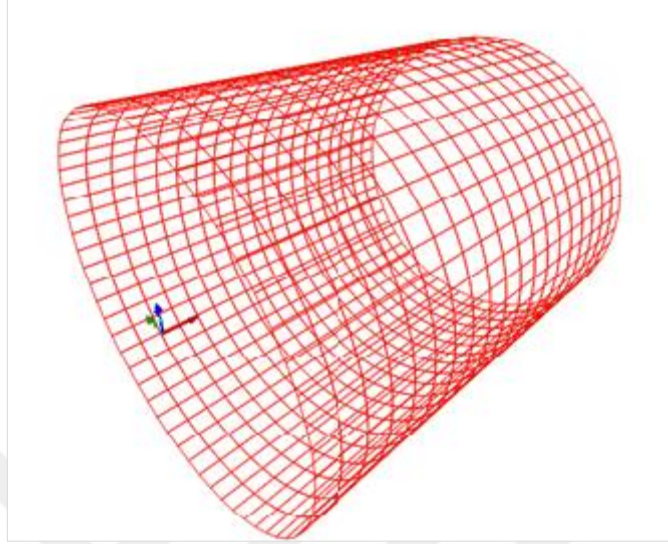
Şekil 3.23 1B Sayısal Model



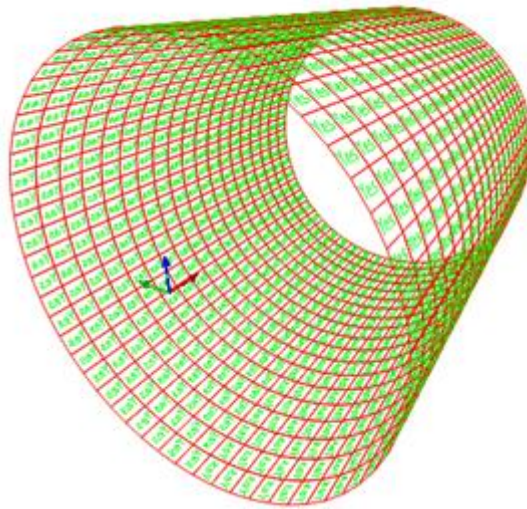
Şekil 3.24 Boru Üzerine Etkiyen Sürşarj Yükü

Gömülü boru sistemi kiriş olarak modellendikten sonra SAP2000-ver.15 programının boru modülü yardımı ile Şekil 3.25'de görüldüğü üzere levha olarak da

modellenmiştir. Alan elemanlar uygun sayıda sonlu elemanlara bölünmüş ve her bir alan elemanı üzerine Şekil 3.26’da görüldüğü gibi sadece basınca çalışan alan yayları tanımlanmıştır.

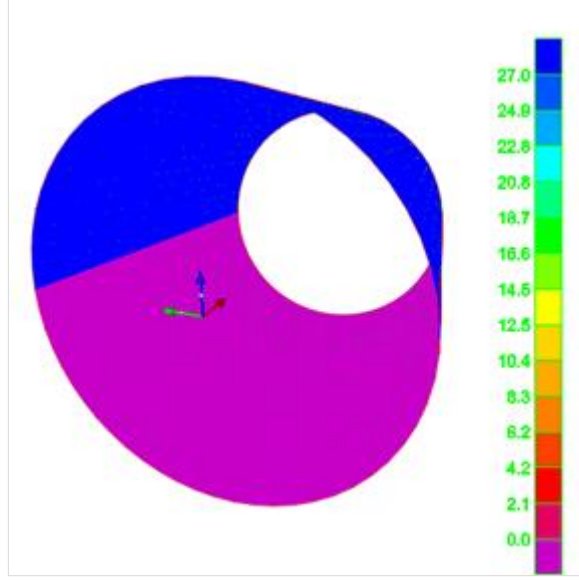


Şekil 3.25 2B Sayısal Model

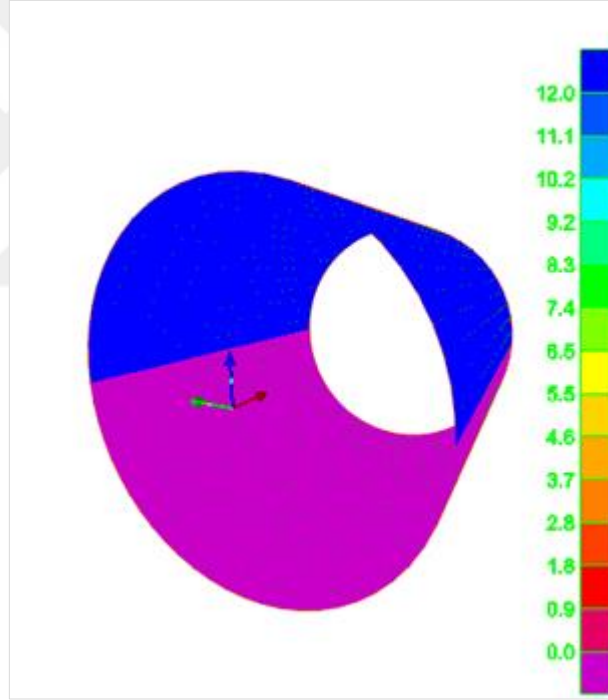


Şekil 3.26 Alan Yayları

Levha olarak modellenen gömülü boru sistemine Şekil 3.27’de görüldüğü gibi 27 kN/m³ toprak yükü, Şekil 3.28’de görüldüğü üzere 12 kN/m³ de hareketli yük uygulanmıştır.



Şekil 3.27 Gömülü Boru Üzerindeki Toprak Yüğü



Şekil 3.28 Gömülü Boru Üzerindeki Araç Yüğü

3.4 Sayısal Analizden Elde Edilen Sonuçların Geleneksel Yöntemlerle Kıyaslanması

Bu kısımda Lui S. Wong ve arkadaşları tarafından 2006 yılında yapılan saha deneyi sonuçları, doğrudan yöntem formülleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ve Plaxis 2D -2018 analizinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Doğrudan yöntem

kullanılarak hesaplanan momentler, kesme ve eksenel kuvvetler sonlu eleman modeli analizi sonuçlarında okunan değerler ile karşılaştırılacaktır.

3.4.1 Doğrudan Yöntem ile Moment ve Donatı Alanı Hesabı

Doğrudan yönteme göre öncelikle boru üzerindeki toprak yükünün hesaplanması gerekir. Boru üzerindeki toprak yükü, düşey kemerlenme faktörü ile boru üzerindeki düşey toprak yükünün çarpımına eşit olmak üzere denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$W = PL \times VAF \quad (3.1)$$

Plaxis2D sonlu eleman programı uluslararası birim sistemine göre sonuç verdiği için, kıyaslamayı daha kolay yapabilmek adına boru üzerindeki prizma yükü de denklem 3.8'deki gibi $PL = \left[\frac{19.930}{1.000} \right] \cdot \left[1.57 + \left(\frac{0.107.930}{1.000} \right) \right] = 29.500 \text{ kN/m}$ şeklinde hesaplanır.

Düşey kemerlenme katsayısı Şekil 3.3'de 4.kurulum tipi için 1,45 olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre boru üzerindeki gerçek toprak denklem 3.1'e göre $W = 29.500 \times 1.45 = 42.775 \text{ kN/m}$ şeklinde hesaplanır.

Boru taç kısmındaki toprak yükünden dolayı oluşacak momenti hesaplamak için boru analiz katsayısı Tablo 3.1'de $C_{me} = 0.118$ olarak verilmiştir. Buradan boru üzerindeki moment denklem 2.4'e göre $M_e = 0.118 \times 42.775 \times (0.93/2) = 2.347 \text{ kNm/m}$ şeklinde hesaplanır.

Boru üzerindeki hareketli yük Tablo 2.2'den 9.778 kN/m olarak seçilmiştir. Boru analiz katsayısı WL1 veya WL2 seçiminde, boru üzerindeki dolgu yüksekliği 3,28 metre ise WL2, boru üzerindeki dolgu yüksekliği boru dış çapının 1.75 katı kadar ise WL1 seçilmelidir. Dolgu yüksekliği bu iki değer arasında ise hareketli yük için boru analiz katsayısı WL, Tablo 2.1'de enterpolasyon yapılarak 0.254 bulunur [12].

Boru taç kısmında araç yükünden dolayı oluşacak moment $M_l = 0.254 \times 9.778 \times (0.93/2) = 1.155 \text{ kNm/m}$ olarak hesaplanır.

Boru tacındaki toprak ve araç yükünden dolayı oluşan toplam moment $M = 2.347 + 1.155 = 3.502 \text{ kNm/m}$ olarak hesaplanır.

Boru ta kısmındaki toprak yükünden dolayı oluşacak eksenel kuvveti hesaplamak için boru analiz katsayısı Tablo 3.1’de $C_{ne}=0.079$ olarak verilmiştir. Buradan boru üzerindeki eksenel kuvvet denklem 2.5’e göre $N_e = 0.079 \times 42.775 = 3.379 \text{ kN/m}$ şeklinde hesaplanır.

Boru zerindeki hareketli yük Tablo 3.2’den 670 lbs/ft yani 9.778 kN/m olarak seçilmiştir. Boru analiz katsayısı WL1 veya WL2 seçiminde, boru üzerindeki dolgu yüksekliği 1ft ise WL2, boru üzerindeki dolgu yüksekliği boru dış çapının 1.75 katı kadar ise WL1 seçilmelidir. Dolgu yüksekliği bu iki değerin arasında ise hareketli yük için boru analiz katsayısı WL, Tablo 2.1’de enterpolasyon yapılarak 0.113 bulunur [12].

Boru ta kısmında araç yükünden dolayı oluşacak eksenel kuvvet;

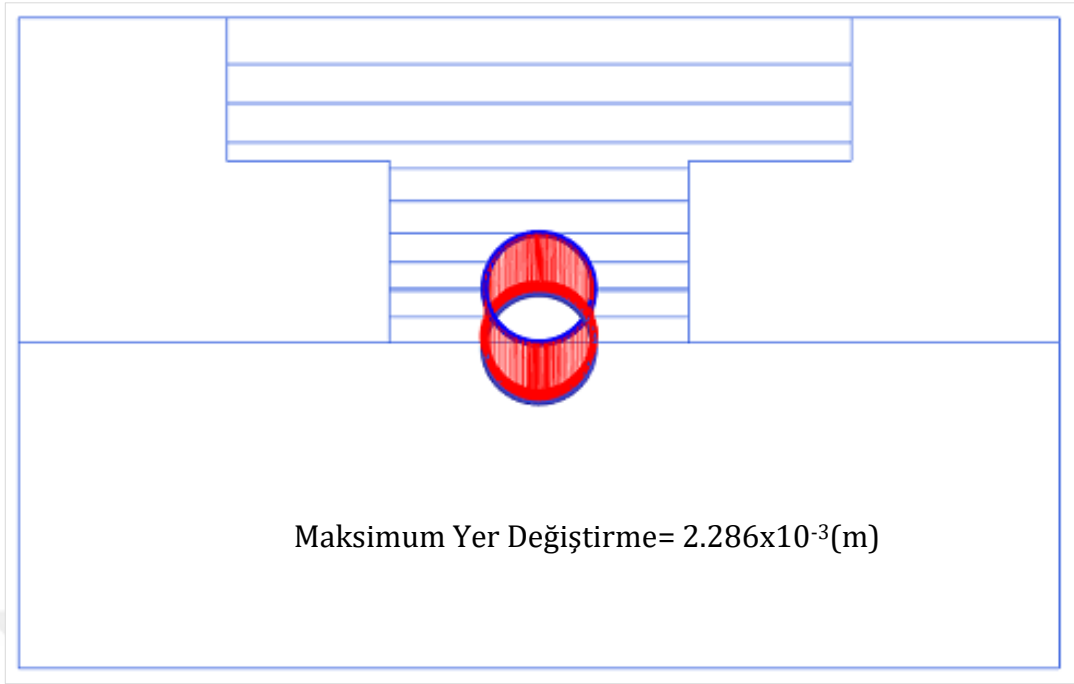
$$N_l = 0.113 \times 9.778 = 1.105 \text{ kN/m},$$

Boru tacındaki toprak ve araç yükünden dolayı oluşan toplam eksenel kuvvet;

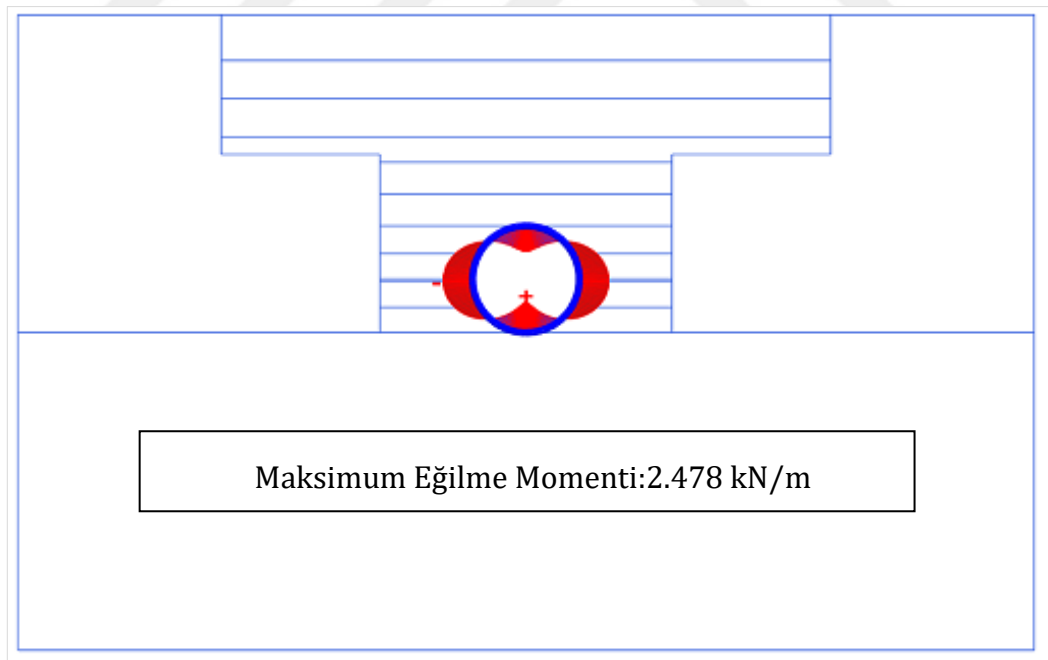
$$N = 3.379 + 1.105 = 4.484 \text{ kN/m} \text{ olarak hesaplanır.}$$

3.4.2 Sayısal Analiz Sonuçları

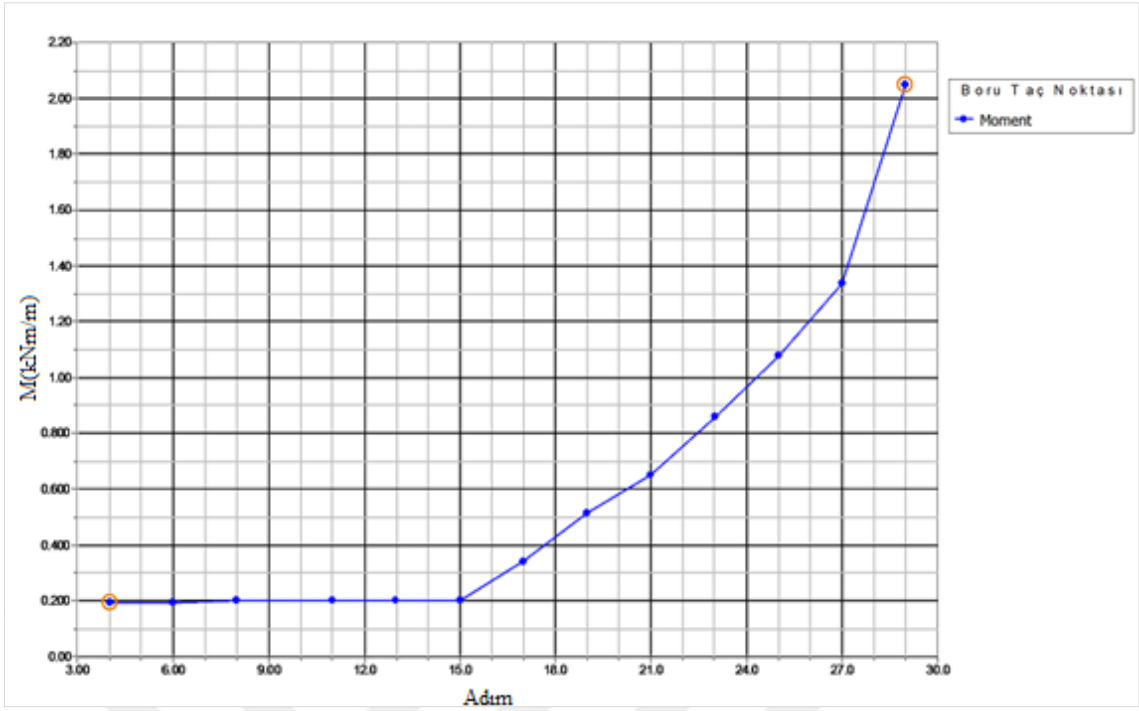
Doğrudan tasarım yöntemine göre hesaplanan boru ta kısmındaki moment ve eksenel kuvvetlerin ardından aynı gömülme koşullarına ve zemin tipine göre Plaxis2D-2018 programında modellenmiştir. Plaxis modeli analizi sonucu çıkan deforme olmuş boru şekil 3.29’de gösterilmiştir.



şekil 3.29 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki yer değiştirme dağılımı
Sayısal analiz sonucu boru üzerindeki moment dağılımı ve en fazla moment şekil
3.30'de gösterilmiştir.

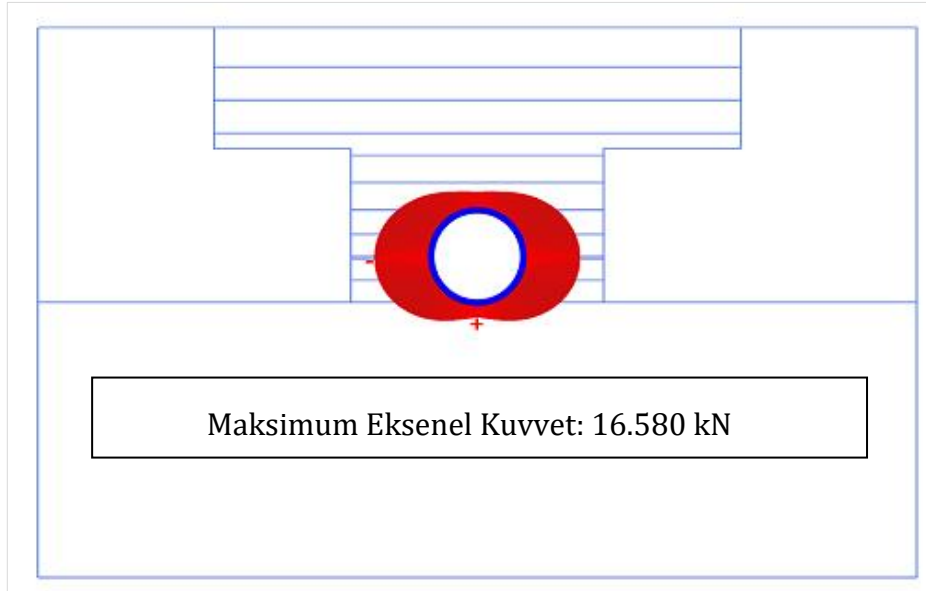


şekil 3.30 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki eğilme momenti dağılımı
Boru taç kısmı üzerindeki momentin gömülme adımlarına göre değişimi şekil
3.31'de gösterilmiştir.



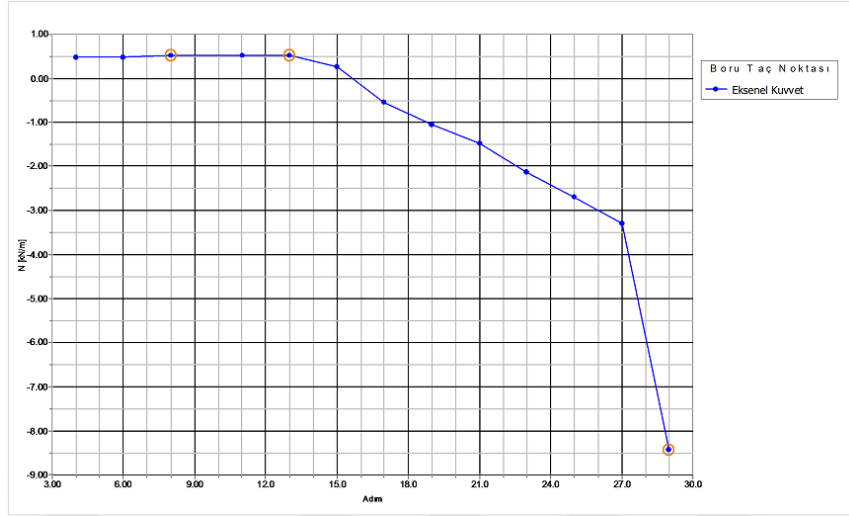
Şekil 3.31 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki eğilme momentinin adımlara göre artışı

Şekil 3.31'e göre boru taç kısmındaki moment trafik yükü altında en son adımda 2,065kN/m olarak bulunmuştur. Boru üzerindeki aksel kuvvetin dağılımı Şekil 3.32'de gösterilmiştir.



Şekil 3.32 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki aksel kuvvetin dağılımı

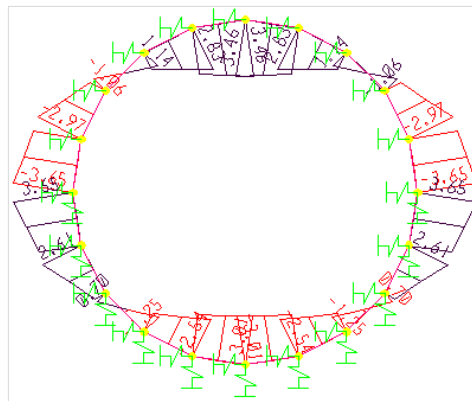
Boru taç kısmı üzerindeki aksenal kuvvetin adımlara göre değişimi Şekil 3.33'de gösterilmiştir.



Şekil 3.33 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki aksenal kuvvetin adımlara göre artışı

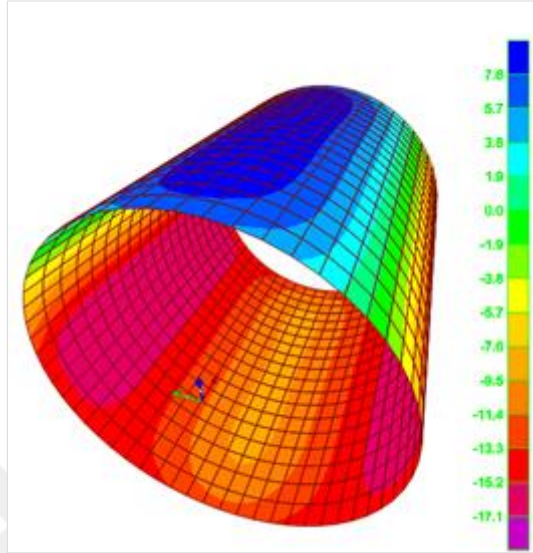
Boru ta kısmındaki aksenal kuvvet trafik yükü altında en son adımda 8,422 kN/m olarak bulunmuştur.

SAP2000-ver.15 programında gömülü boru sistemi üç boyutlu (3B) gerilme uzayında hem bir boyutlu (1B) kiriş elaman (Frame) olarak hem de iki boyutlu (2B) alan eleman (Area) olarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Kiriş olarak modellenen boru sisteminin nihai yükleme durumu için analizi sonucunda boru üzerinde oluşan eğilme momenti dağılımı Şekil 3.34'de gösterilmiş ve maksimum eğilme momenti 3,65 kNm/m olarak okunmuştur.



Şekil 3.34 1B Kiriş Olarak Modellenen Boru Sisteminde Oluşan Eğilme Momenti Dağılımı

Bu model için boru sistemi üzerinde oluşan aksenal kuvvet dağılımı Şekil 3.37’de gösterilmiştir. En büyük aksenal kuvvet 15,85 kN/m olarak okunmuştur. Analiz sonucunda boru taç kısmındaki en büyük aksenal kuvvet ise 7,20 kN/m olarak okunmuştur.



Şekil 3.37 Alan Eleman olarak Modellenen Boru Sisteminde Oluşan Aksenal Kuvvet Dağılımı

Boru taç kısmındaki kesit tesirlerinin geleneksel yöntemlerden doğrudan yöntem ile hesaplanan sonuçları, Plaxis2D-2018 programı ve SAP2000-ver.15 programı analizi sonucu elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Boru Taç Kısmında Doğrudan yöntem, Plaxis2D-2018 ve SAP2000-ver.15 Analizi Sonucu Hesaplanan Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

	Doğrudan Yöntem	Plaxis2D	SAP2000 (2B)	SAP2000 (1B)
Eğilme Momenti (kNm/m)	3,502	2,065	1,92	3,46
Aksenal Kuvvet (kN/m)	4,484	8,422	7,20	2,74

Sayısal model sonuçları incelendiğinde, her birinin doğrudan yöntem sonuçlarına yaklaşmış olduğu görülmüştür. Bu sebeple Plaxis2D-2018 modelinin gömülü boruların boyutlandırılmasında kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Zemin yapı-etkileşiminin Plaxis2D-2018 programı ile daha detaylı bir şekilde dikkate alınabilmesi nedeniyle bu aşamadan sonra çalışmaya Plaxis2D-2018 programı verileri ile devam edilmiştir.

3.4.3 Gerekli Donatı Alanlarının Hesaplanması

Sayısal model sonuçlarından elde edilen kesit tesirleri kullanılarak boru tasarımı için gerekli donatı alanı AASHTO şartnamesi 12.10.4.2.4a'da belirtildiği üzere denklem 3.2'deki gibi hesaplanacaktır.

$$A_s \geq \frac{g\phi d - Nu \sqrt{g[g(\phi d)^2 - Nu(2\phi d - h) - 2Mu]}}{f_y} \quad (3.2)$$

Burada; A_s , birim uzunluk için gerekli donatı alanı; f_y , donatı akma dayanımı; d , paspayı; h , Boru et kalınlığı; M_u , ;Tasarım momenti; N_u , eksenel kuvvet; (basınç durumunda pozitif alınır); ϕ , direnç faktörü (AASHTO 12.5.5-1); g , $0.85 \times b \times f_c$; b , hesap genişliği; f_c , Beton tasarım mukavemetini temsil etmektedir.

Farklı çaptaki boruların gömülme derinliğine bağlı tasarım momenti değişimi Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki momentin derinliğe ve çapa bağlı değişimi

		Dolgu Yüksekliği H(m)			
		2m	4m	6m	8m
Boru Çapı(mm)	Ø600	0,991	0,999	1,307	1,573
	Ø800	1,233	1,804	2,321	2,777
	Ø1000	2,039	2,982	3,826	4,559
	Ø1200	3,068	4,439	5,627	6,75
	Ø1400	3,996	5,982	7,771	9,393
	Ø1600	5,503	8,082	10,4	12,51
	Ø1800	7,069	10,27	13,13	15,74
	Ø2000	9,201	13,1	16,61	19,8

Farklı çaptaki boruların gömülme derinliğine bağlı eksenel kuvvet değişimi Tablo 3.5'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Plaxis2D-2018 analizi sonucu boru üzerindeki aksenal kuvvetin derinliğe ve çapa bağlı değişimi

Dolgu Yüksekliği H(m)					
Boru Çapı(mm)		2m	4m	6m	8m
	Ø600	18,96	30,85	42,09	53,22
	Ø800	26,85	41,76	56,57	71,31
	Ø1000	35,2	54,07	72,75	91,26
	Ø1200	43,82	66,5	88,32	110,2
	Ø1400	52,92	79,07	104,9	130,5
	Ø1600	63,47	92,88	122,3	151,5
	Ø1800	73,61	106,6	139,4	172,2
	Ø2000	85,31	121,7	158	194,1

Farklı çaptaki boruların gömülme derinliğine bağlı gerekli donatı alanının değişimi Tablo 3.6'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6 Plaxis2D-2018 analizi sonucu gerekli sarmal donatı alanının derinliğine ve çapa bağlı değişimi

Dolgu Yüksekliği H(m)					
Boru Çapı(mm)		2m	4m	6m	8m
	Ø600	131,169	164,398	220,535	273,206
	Ø800	148,11	224,27	297,273	366,633
	Ø1000	199,795	300,567	396,399	486,48
	Ø1200	251,828	374,531	487,696	598,915
	Ø1400	288,702	433,696	571,71	703,827
	Ø1600	344,381	507,014	662,629	811,999
	Ø1800	421,817	615,376	799,436	977,028
	Ø2000	491,944	705,036	908,786	1104,42

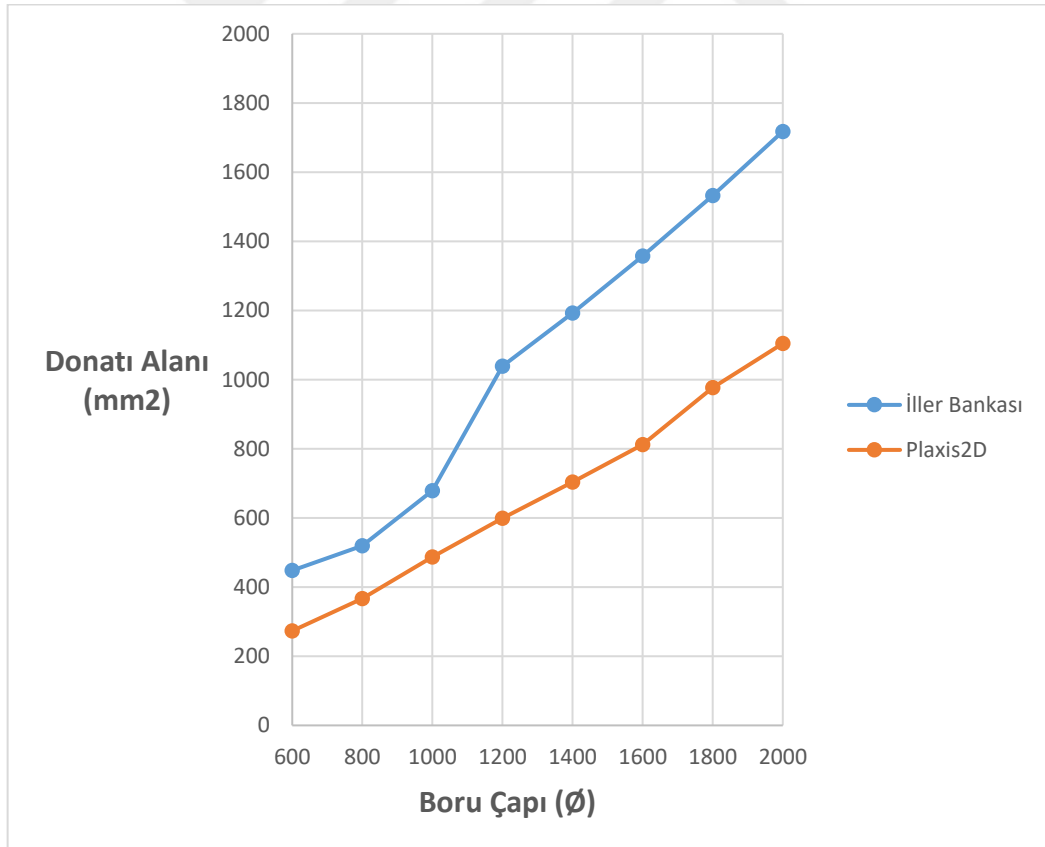
3.4.4 İller Bankası A.Ş Verileri ile Plaxis2D-2018 Donatı Alanlarının Kıyaslanması

Günümüzde gömülü borular tasarlanırken ülkemizde en yaygın kullanılan boru tasarım kriterleri İller Bankası A.Ş tarafından sağlanmaktadır. Tablo 3.7'de İller Bankası A.Ş'nin güncel olarak kullanılan boru çaplarına göre gerekli donatı alanları gösterilmiştir. Bu donatı alanları 1-8 metre arasında borunun en elverişsiz gömülme durumuna göre tüm zemin tipleri için verilmiştir.

Tablo 3.7 Çaplarına göre İller bankası Temmuz 2015 onay tarihli günümüzde boru tasarımında kullanılan boru sarmal donatı alanları

Donatı Alanı(mm ²)		
Boru Çapı(mm)	Ø600	447,958
	Ø800	519,526
	Ø1000	678,564
	Ø1200	1039,05
	Ø1400	1192,79
	Ø1600	1357,13
	Ø1800	1532,07
	Ø2000	1717,62

Plaxis2D-2018 programı üzerinde 1-8 metrede her iki metre için model oluşturulmuş ve bu modeller Ø600-Ø2000 arasındaki tüm boru çapları için analiz edilmiş, kesit tesirleri bulunmuş ve donatı alanları hesaplanmıştır. Her boru çapı için hesaplanan donatı alanlarından en elverişsiz olanları, İller Bankası A.Ş verileri ile kıyaslanmıştır. Şekil 3.38’de İller Bankası A.Ş ve Plaxis2D-2018 programı sonucu elde edilen en elverişsiz duruma göre hesaplanan donatı alanları kıyaslanmıştır.

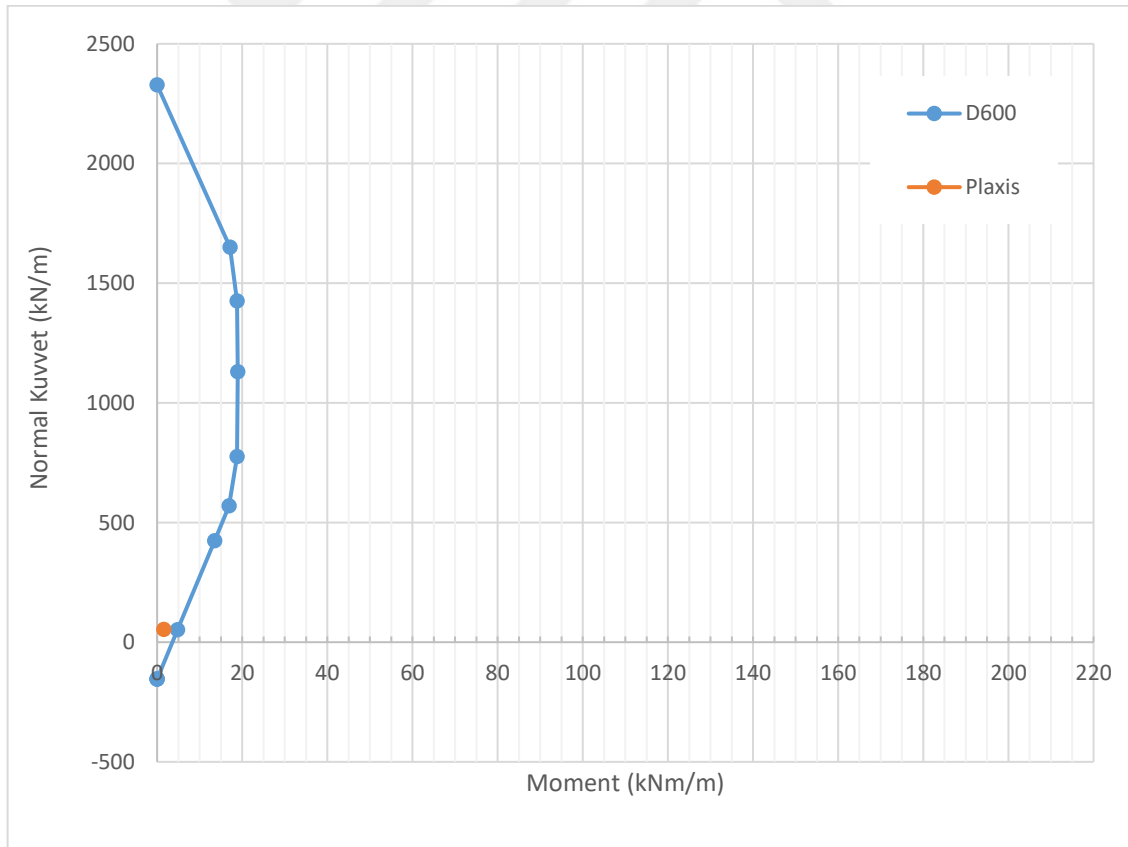


Şekil 3.38 İller Bankası A.Ş ile Plaxis2D-2018 Boru Çaplarına Göre Gerekli Donatı Alanlarının Kıyaslanması

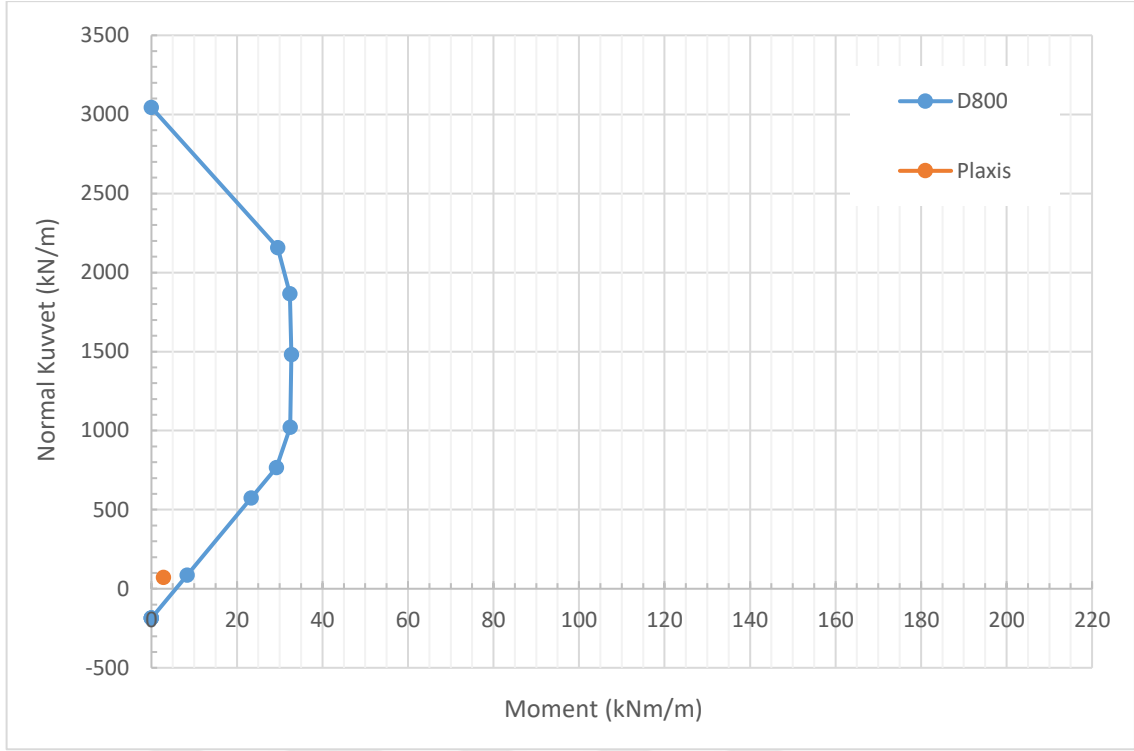
Sayısal modelden elde edilen veriler ışığında İller Bankası A.Ş gömülü boru tasarım kriterlerinin güvenli tarafta kalınarak hazırlandığı görülmüştür. Özellikle boru hatlarının uygulama alanının geniş olduğu yerlerde ekonomik açıdan bakıldığında, gömülü boru tasarımları yapılırken bir sayısal model geliştirmek efektif olacaktır.

3.4.5 Moment-Eksenel Kuvvet Karşılıklı Etkileşim Grafiklerinin Oluşturulması ve Kıyaslanması

İller Bankası A.Ş tarafından verilen donatı alanları yardımıyla SAP2000-ver.15 programı üzerinden moment-eksenel kuvvet karşılıklı etkileşim diyagramları oluşturulmuştur. Bu diyagramlar üzerinde sayısal analizden elde edilen normal kuvvet ve moment değerleri işaretlenmiştir. Şekil 3.39'de Ø600 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 3.40'da Ø800 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.

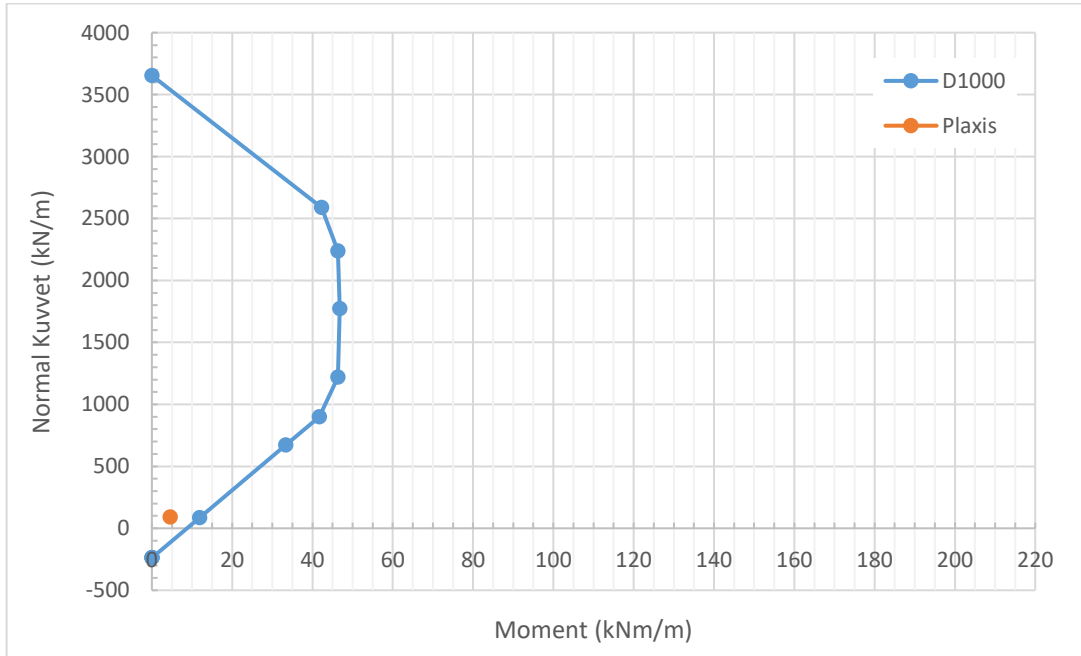


Şekil 3.39 Ø600 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri



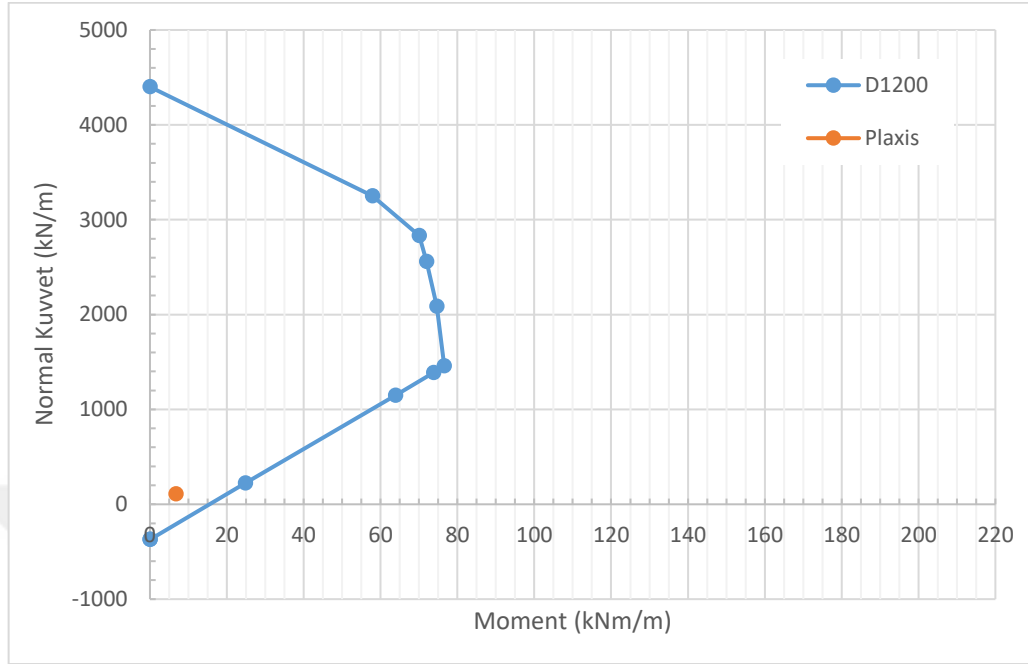
Şekil 3.40 Ø800 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Şekil 3.41'de Ø1000 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.



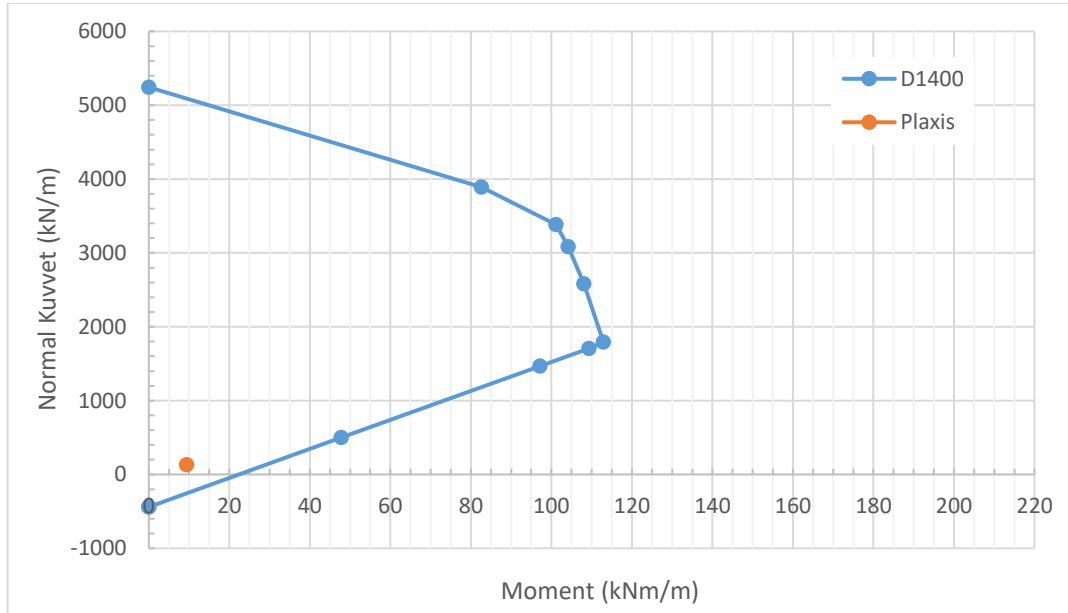
Şekil 3.41 Ø1000 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Şekil 3.42'de Ø1200 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.



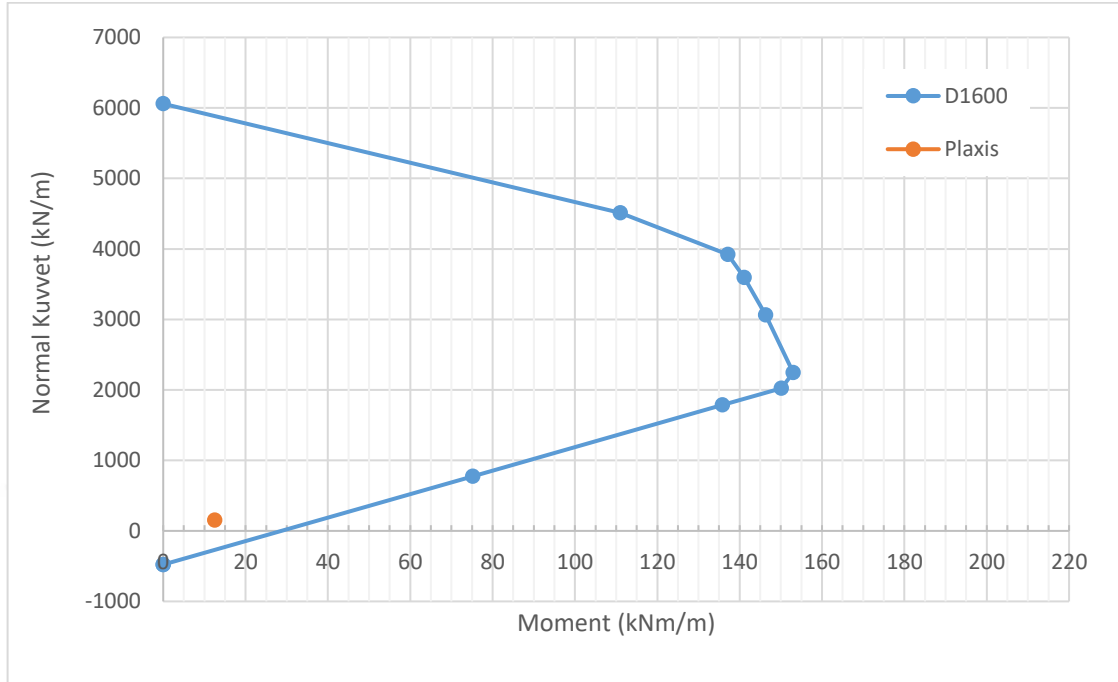
Şekil 3.42 Ø1200 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Şekil 3.43'de Ø1400 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.



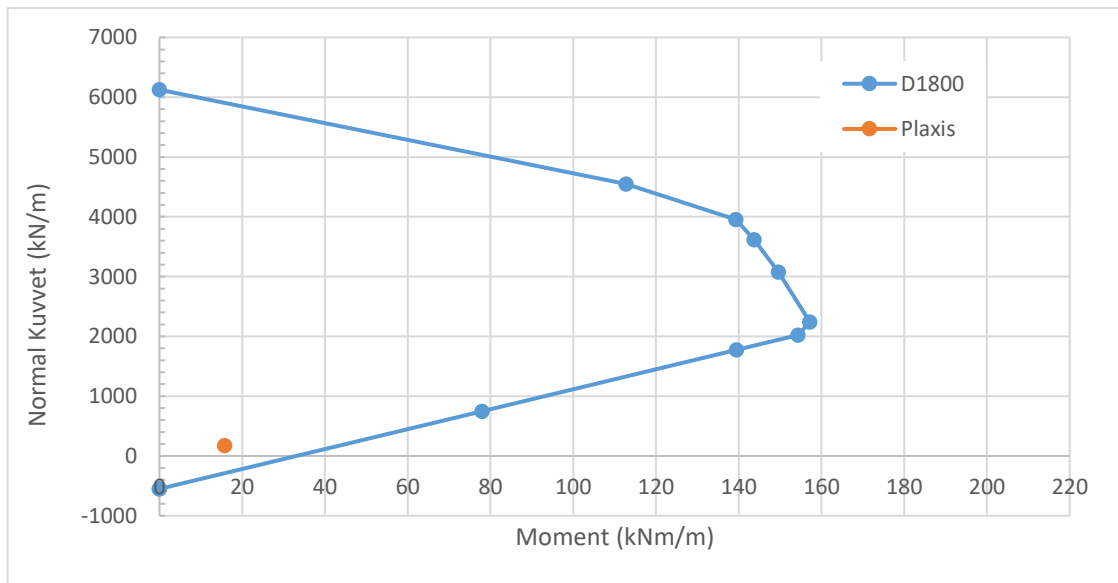
Şekil 3.43 Ø1400 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Şekil 3.44'de Ø1600 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.



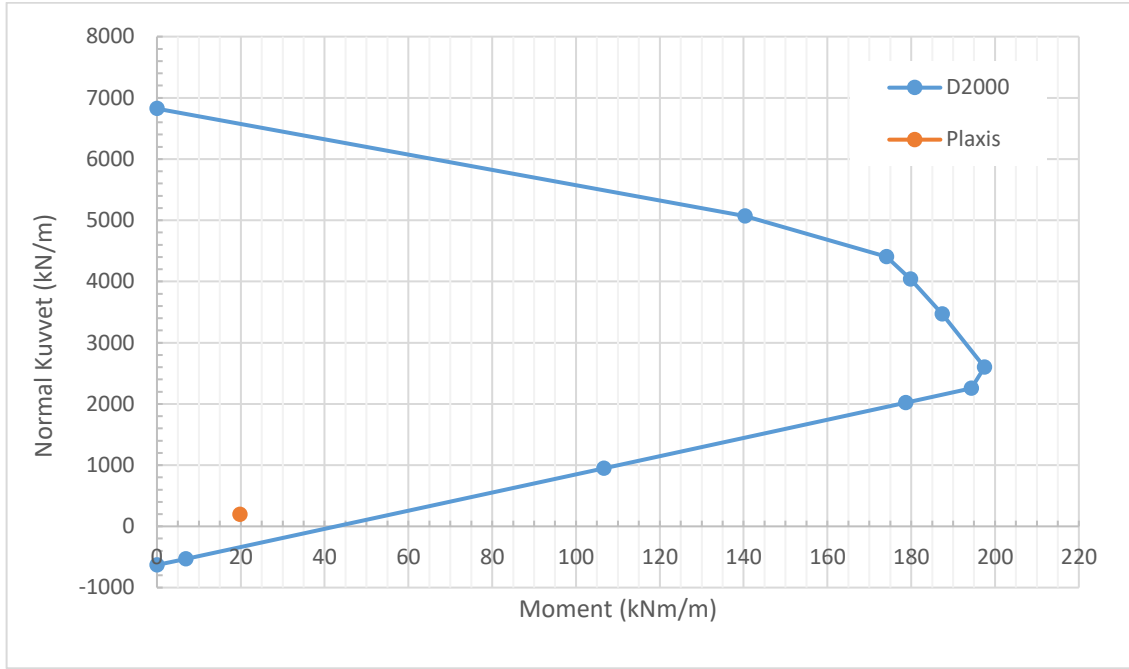
Şekil 3.44 Ø1600 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Şekil 3.45'de Ø1800 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.



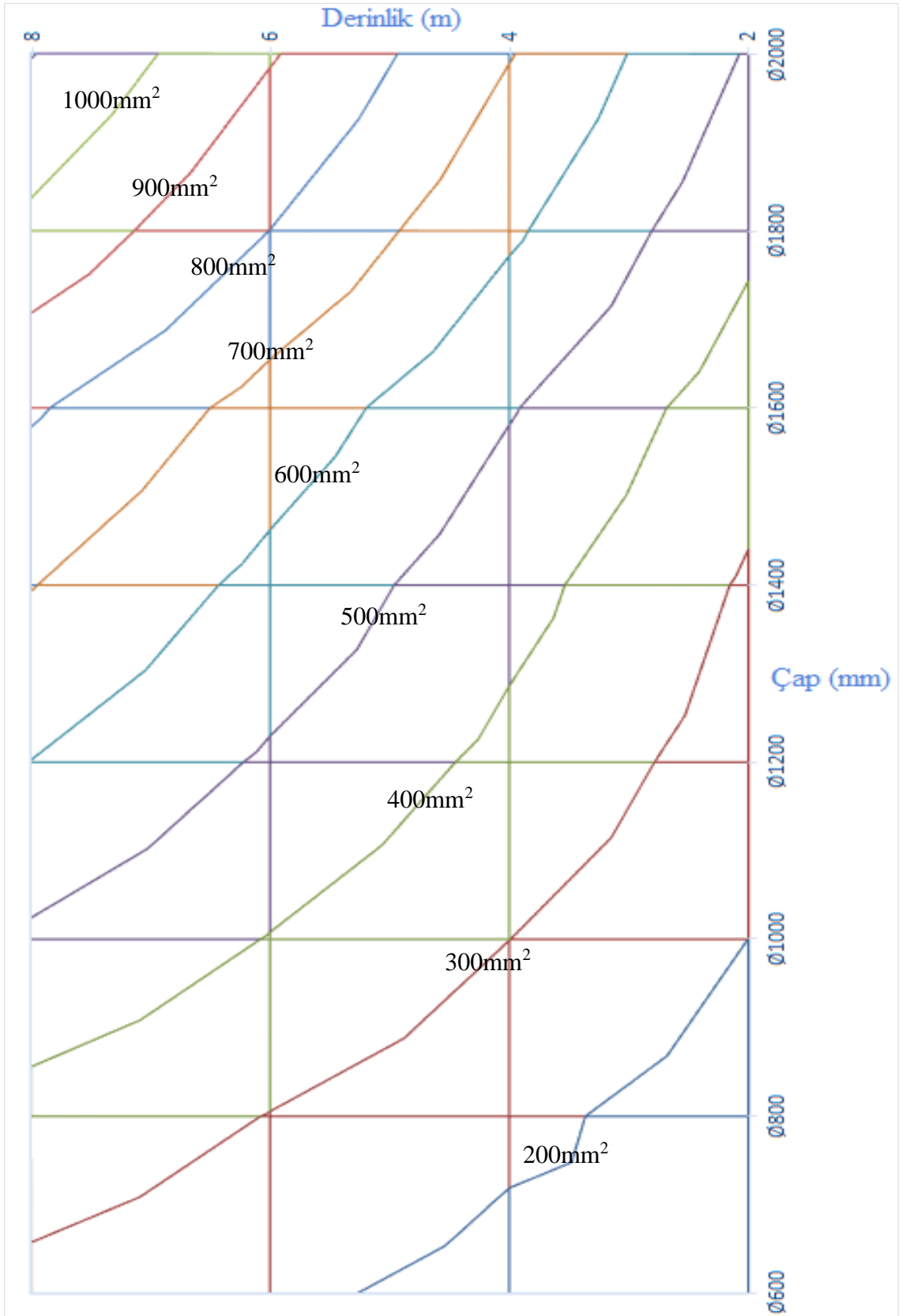
Şekil 3.45 Ø1800 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Şekil 3.46'de Ø2000 çapında boru için karşılıklı etkileşim grafiği gösterilmiş ve Plaxis2D sonucu elde edilen kesit tesirlerinin grafik üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 3.46 Ø2000 Boru için Karşılıklı Etki Diyagramı ve Plaxis2D-2018 sonucu elde edilen Kesit Tesirleri

Tüm boru çapları için Plaxis2D-2018 programı ile elde edilen moment ve normal kuvvet değerleri, İller Bankası A.Ş verilerine göre oluşturulan normal kuvvet ve moment taşıma kapasitesi grafiklerinin içerisinde kalmıştır. Her çap için normal kuvvet taşıma kapasiteleri sayısal model ile elde edilen normal kuvvet değerinin çok üstünde olurken, moment taşıma kapasiteleri sayısal model ile elde edilen moment değerlerine yakın bulunmuştur. Şekil 3.47'de farklı boru çapları için değişken derinliklerde gösterilen donatı alanları abağı bu çalışma ile birlikte literatüre kazandırılmıştır.



Şekil 3.47 Boru çapı ve derinliğe bağlı gerekli minimum sarmal donatı alanını gösterir abak

Bu çalışmada doğrudan yöntemin dördüncü kurulum tipi kullanılarak yapılan bir saha deneyinin sonuçları, sonlu eleman program üzerinde geliştirilen sayısal modelin analiz sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Ardından yatak malzemesi tipi ve kalınlığı değiştirilerek boru üzerindeki gerilmelerin değişimi grafikler halinde verilmiştir. Daha sonra aynı sayısal model analizinden elde edilen kesit tesirleri, gömülü boru tasarımlarında kullanılan geleneksel yöntemlerden doğrudan hesap yöntemi ile hesaplanan kesit tesirleri ile kıyaslanmış ve sayısal modelin kullanılabilirliği gösterilmiştir. Farklı derinlikler ve farklı boru çapları için analizler yapılmış ve bu analizler sonucunda çıkan donatı alanları günümüzde gömülü boru tasarımlarında güncel olarak kullanılan İller Bankası A.Ş kriterleri ile kıyaslanmıştır. Tüm bu çalışmaların sonucuna göre;

1. Doğrudan tasarım 4. Kurulum tipi uygulamasında doğal zeminin yatak malzemesi olarak kullanılması durumunda nihai durumda borunun taç kısmındaki gerilme 46,414 kPa bulunurken, yatak malzemesi olarak sıkı kum kullanıldığında boru tacındaki gerilme 49,300 kPa bulunmuş ve yatak malzemesi kumun sıklığı arttıkça boru üzerindeki gerilmenin arttığı görülmüştür.
2. Yatak malzemesi kalınlığı doğal dolgu malzemesi ve sıkı kum kullanılan boru yataklarında arttırıldığında boru üzerindeki gerilmelerin arttığı görülmüştür.
3. Gömülü boru sistemleri imal edilirken özellikle dışarıdan dolgu malzemesi getirmenin zor ve maliyetli olduğu bölgelerde doğal kazı malzemesinin de yatak malzemesi olarak kullanılabileceği hatta ariyet ocağından getirilen sıkı malzemenin belirli bir kalınlıktan fazla kullanılması durumunda borunun düşey yer değiştirmenin oldukça kısıtlanarak boru üzerindeki gerilmelerin arttığı ve beton boru üzerinde çatlaklar oluşturabileceği öngörülmüştür.

4. Sonlu eleman modeli analizleri sonucu elde edilen kesit tesirleri, geleneksel yöntemlerden doğrudan tasarım yöntemi ile hesaplanan kesit tesirlerinden daha az bulunmuş olup doğrudan tasarım yönteminin güvenli tarafta kaldığı gösterilmiştir.

5. Plaxis2D-2018 programı analizi sonucu elde edilen kesit tesiri değerleri SAP2000-ver.15 programı analizi sonucu elde edilen kesit tesiri değerleriyle aynı mertebede bulunmuş ve Plaxis2D-2018 programının gömülü boru sistemlerinin analizinde efektif olduğu görülmüştür.

6. Sayısal modelden elde edilen kesit tesirleri oluşturulan tüm boru çapları için İller Bankası A.Ş tarafından kullanılan tasarım kriterlerinden oluşturulan moment ve aksenal kuvvet taşıma kapasitesi diyagramlarının içerisinde kalmıştır. İller Bankası A.Ş'nin donatı paftaları gömülü boru tasarımları için uygundur.

7. Sayısal modelden elde edilen normal kuvvet değerleri, borunun normal kuvvet taşıma kapasitesinin çok altında kalırken, moment değerleri taşıma kapasitesine yakın bulunmuştur.

8. Bu çalışmada kullanılan, saha deneyi sonuçları ve geleneksel tasarım yöntemleri ile kalibre edilen sonlu eleman modelinin bundan sonraki çalışmalara da ışık tutmak amacıyla gömülü boru sistemlerindeki çeşitli elemanların boru üzerindeki gerilmelere etkisini incelemek için yeterli olduğu görülmüş, çalışma kapsamında; farklı boru çapları için çeşitli derinliklerde, birim genişlik için gerekli donatı alanını gösteren abak literatüre kazandırılmıştır.

- [1] A. Sağlamer ve M. Balkaya, "Gömülü Boru Hatlarının Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışı," Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 2005, pp. 77.
- [2] A. Abolmaali ve A. Kararam, "Nonlinear Finite-Element-Based Investigation of the Effect of Bedding Thickness on Buried Concrete Pipe," Journal of Transportation Engineering ASCE, pp. 793-799, 2010.
- [3] E. T. Selig ve D. L. Packard, "Buried Concrete Pipe Embankment Installation Analysis," Journal of Transportation Engineering ASCE, vol.112, no.6, pp. 576-592, 1986.
- [4] J. Kang, F. Parker, C. H. Yoo, "Soil-structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes Part I: Embankment installation," Engineering Structures 30 pp. 384-392, 2008.
- [5] R. K. Watkins, "Buried Pipe Encased in Concrete," Pipeline Engineering and Construction, Pipeline Division Specialty Congress, 2004, 1-10.10.1061/40745(146)87. 2004.
- [6] M. Xu, D. Shen, D. Jin, "The behaviour of jointed large-diameter reinforced concrete pipeline buried in various conditions," Engineering Structures 153, pp. 354-369, 2017.
- [7] S. Alzabeebee, D. N. Chapman, A. Faramarzi, "A comparative study of the response of buried pipes under static and moving loads," Transportation Geotechnics 15, pp. 39-46, 2018.
- [8] M.R Ahmed, V.D.H Tran ve M.A Meguid, "On the Role of Geogrid Reinforcement in Reducing Earth Pressure on Buried Pipes: Experimental and Numerical Investigations," Soils and Foundations, vol.55, no.3, pp. 588-599, 2015.
- [9] E. Erdogmus and M. K. Tadros, "Behaviour and Design of Buried Concrete Pipes Phase II," Nebraska Department of Roads Research Reports, pp. 75, 2009.
- [10] American Concrete Pipe Association, "Standart Installations and Bedding Factors for the Indirect Design Method," Design Data 9M, pp. 11-12, 2012.
- [11] J. Beakley, "Direct Design and Indirect Design of Concrete Pipe Part 1," 2011.
- [12] M.G. Spangler, "The Supporting Strength of Rigid Pipe Culvert," Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts Official Publication, vol. 31, no.37, 1933.
- [13] ASCE (American Society of Civil Engineers), "Standart Practice for Direct Design of Buried Precast Concrete Pipe Using Standart Installations (SIDD), ASCE, pp.15-93, 2004.
- [14] ACPA (American Concrete Pipe Association), "Multiple Pipe Installations: Trench Condition," Design Data 5, pp. 07-11, 2011.

- [15] PLAXIS 2D 2018 (Software). PLAXIS BV (www.plaxis.nl) P.O. Box 572, 2600 AN Delft, The Netherlands.
- [16] L. S. Wong, E. N. Allouche, A. S. Dhar, M. Baumert and I. D. Moore, "Long-term monitoring of SIDD Type IV installations," *Can. Geotech. J.* 43, pp. 392-408, 2006.
- [17] Geotechdata.info, Soil Young's modulus, <http://geotechdata.info/parameter/soil-elastic-young-modulus.html> (as of September 17.09.2013).
- [18] O. R. & Truty, A. The hardening soil model- a practical guidebook Z soil.PC 100701 report, pp. 47-127, 2012.
- [19] A. Kezdi, "Handbook of Soil Mechanics. Elsevier, Amsterdam," 1974.
- [20] M. Prat, E. Bisch, A. Millard, P. Mestat and G. Cabot, "La modelisation des ouvrages, Hermes, Paris," 1995, pp. 770.
- [21] Geotechdata.info, Angle of Friction, <http://geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html> (as of September 14.12.2013).
- [22] Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers, 1999.
- [23] J. W. Koloski, S. D. Schwarz and D. W. Tubbs, " Geotechnical Properties of Geologic Materials, Engineering Geology in Washington, Vol. 1, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78," 1989.
- [24] M. Carter and S. Bentley, "Correlations of soil properties. Penetech Press Publishers, London," pp. 130, 1991.
- [25] G. Meyerhof, "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. J Soils Mechanics and Foundation Division ASCE," vol. 82, no. SM1, pp. 1-19', 1956.
- [26] R. Peck, W. Hanson, and T. Thornburn, "Foundation Engineering Handbook. Wiley, London," 1974.
- [27] Minnesota Department of Transportation, "Pavement Design," 2007.
- [28] Geotechdata.info, Dry unit weight, <http://geotechdata.info/parameter/soil-dry-unit-weight.html> (as of August 29, 2013).
- [29] Geotechdata.info, Cohesion, <http://geotechdata.info/parameter/cohesion> (as of December 15, 2013).
- [30] NAVFAC Design Manual 7.2, "Foundations and Earth Structures,SN 0525-LP-300-7071, revalidated by change 1 september," 1986.
- [31] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, "Washington, D.C. :American Association of State Highway and Transportation Officials," Section 3: Loads and Load Factors 3-23, 3.6.1.2.2, 2010.
- [32] CSI, "SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, California."

İletişim Bilgisi: recepatasoy22@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. 3rd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT2018)

Sep 20-22, 2018, Kırklareli / TURKEY

Non-linear Analysis of Buried Pipes Under the Static Loads