

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÖMÜLÜ BORULARDA DEPREM ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜMİT KUT

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NAZİLE URAL

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. AYFER ERKEN

BİLECİK, 2022

10465433

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÖMÜLÜ BORULARDA DEPREM ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜMİT KUT

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. NAZİLE URAL

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. AYFER ERKEN

BİLECİK, 2022

10465433

BEYAN

“Gömülü Borularda Deprem Etkisi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığımı, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	✘
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Ümit KUT

Tarih

22.06.2022

İmza

ÖN SÖZ

Tez çalışmam boyunca her türlü konuda bana yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen, tez danışmanım kıymetli hocam Prof. Dr. Nazile URAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca lisansüstü eğitim sürecinde bilgi, tecrübe ve destekleri ile yanımda olan eş danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi, eğitim hayatım boyunca da beni destekledikleri ve yanımda oldukları için değerli aileme ve özellikle tez sürecinde bana her türlü desteği sağlayan kıymetli eşime çok teşekkür ederim.

Ümit KUT

ÖZET

GÖMÜLÜ BORULARDA DEPREM ETKİSİ

Son yıllarda meydana gelen depremlerin üst yapılarda oluşturduğu hasarlardan dolayı, üst yapıların dinamik yükler altındaki davranışı ve tasarımı hakkındaki araştırmalar artmıştır. Ancak literatüre bakıldığında, dinamik yüklere maruz kalan alt yapı sistemleri hakkındaki çalışmalar üst yapı elemanları hakkındaki çalışmalara kıyasla eksik kalmaktadır. Bu bakımdan, inşaat mühendisliği açısından dinamik yükler altında, üst yapıların tasarımı kadar alt yapı sistemlerinin de tasarımı önem arz etmektedir. Kırsal ve özellikle şehir hayatının sürekliliği bakımından, gömülü boru hatları vazgeçilmez mühendislik yapılarıdır. Gömülü boru hatlarının ilk örneklerini eski zamanlarda içme suyu ve kanalizasyon hatları oluştururken, günümüzde bunlara ek olarak petrol, doğalgaz, elektrik, telefon ve drenaj gibi hatlar oluşturmaktadır. Günümüzde gömülü boru hatlarının kullanımının yaygın olmasına bağlı olarak, deprem gibi doğal afetlerde özellikle de şehir hayatının sürdürülebilirliği açısından gömülü boruların tasarımı ve imalatı çok önemlidir. Eğer farklı malzeme özelliklerine sahip gömülü boruların, deprem yüklerine göre farklı zemin koşullarındaki davranışı bilinirse, gömülü boru hatlarının projelendirilmesi ve uygulanabilirliği o derece kolay olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HSSS) olmak üzere üç farklı zemin modeli, beton (rijit) ve PVC (esnek) olmak üzere iki farklı boru cinsi, %80, %90 ve %100 relatif sıkılıkta olmak üzere üç farklı boru gömlek malzemesi ve iki farklı yeraltı su seviyesi, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak, tek zemin profilinde modellenmiş ve deprem yükü altındaki analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, zemin modelinin, boru cinsinin, boru gömlek malzemesinin ve yeraltı su seviyesinin gömülü boruların dinamik yük altındaki davranışına etkisini görmek için analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, dinamik koşullarda gömülü boruların daha fazla yer değiştirme yaptığı ve daha fazla yüklere maruz kaldığı görülmüştür. HS zemin modeli ile yapılan analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Boru türünün yer değiştirme üzerinde bir etkisinin olmadığı ancak borunun rijitliğinin artmasıyla birlikte daha fazla yüklere maruz kaldığı görülmüştür. Ayrıca, yer altı su seviyesinin borunun alt noktasına göre daha da aşağıda olması durumunda yer değiştirmelerin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gömülü Borular, Dinamik Davranış, Deprem, Plaxis 2D, Sonlu Elemanlar

ABSTRACT

EARTHQUAKE EFFECT ON BURIED PIPES

Due to the damage to the superstructures caused by the earthquakes that occurred in recent years, research on the behavior and design of superstructures under dynamic loads has increased. However, when we look at the literature, studies on infrastructure systems under dynamic loads are less compared to studies on superstructure systems. In this respect, the design of infrastructure systems is as important as the design of superstructures under dynamic loads in terms of civil engineering. Buried pipelines are indispensable engineering structures for the continuity of rural and especially urban life. While drinking water and sewer lines were the first examples of buried pipelines in the past, today there are lines such as oil, natural gas, electricity, telephone and drainage in addition to drinking water and sewer lines. Due to the widespread use of buried pipelines today, the design and manufacture of buried pipes is very important in natural disasters such as earthquakes, especially in terms of the sustainability of city life. If the behavior of buried pipes with different material properties in different soil conditions under earthquake loads is known, the design and applicability of buried pipelines will be much easier.

In this study, three different soil models, namely Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) and Hardening Soil Small Strain (HSSS), two different pipe types, concrete (rigid) and PVC (flexible), three different pipe lining materials with 80%, 90% and 100% relative density and two different ground water levels were modeled in a single soil profile by using Plaxis 2D finite element program and analyzed under earthquake load. In this scope, the analysis results were compared to see the effect of soil model, pipe type, pipe liner material and groundwater level on the behavior of buried pipes under dynamic load. As a result, it has been observed that buried pipes have more displacement and are exposed to more loads in dynamic conditions. It has been concluded that the results of the analysis made with the HS soil model are closer to reality. It has been observed that the pipe type has no effect on the displacement, but the pipe is exposed to more loads with increasing rigidity. In addition, it has been observed that when the groundwater level is lower than the bottom of the pipe, displacements are less.

Keywords: Buried Pipes, Dynamic Behavior, Earthquake, Plaxis 2D, Finite Elements

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ALTYAPI SİSTEMLERİ VE GÖMÜLÜ BORU HATLARI.....	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. Gömülü Boru Türleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	5
2.2.1. Gömülü Boru Türleri.....	5
2.2.2. Gömülü Boruların Kullanım Alanları.....	9
2.3. Gömülü Boru Hatlarının Projelendirilmesinde Etkili Olan Boru ve Zemin Özellikleri.....	11
2.4. Boru Döşeme Yöntemleri ve İlgili Yönetmelikler.....	13
2.4.1. Boru Döşeme Yöntemleri.....	13
2.4.1.1. Özel Boru Döşeme Metotları.....	18
2.4.1.2. Atık Su Arıtma Tesislerinde ve Deşarj Boru Hatlarında Döşeme Metotları.....	19
2.4.1.3. Kazı Yapılmadan Boru Hattının Döşenmesi.....	19
2.4.2. Depreme Dayanıklı Boru Hattı Tasarımı.....	20
2.4.2.1. Türk Yönetmeliği.....	20
2.4.2.2. Amerikan Yönetmeliği.....	22

2.4.2.3. Japon Yönetmeliği.....	23
2.5. Sonuç	27
3. GÖMÜLÜ BORU HATLARI ÜZERİNE ETKİYEN YÜKLER	28
3.1. Giriş	28
3.2. Boruların Maruz Kaldığı Yüklerin Tanımlanması.....	29
3.3. Boruya Etki Eden Dış Yükler ve Dış Yükleri Etkileyen Durumlar	30
3.4. Marston ve Spangler Teorilerine Göre Dış Yüklerin Hesaplanması	32
3.4.1. Marston Yük Teorisi	32
3.4.2. Spangler Yük Teorisi.....	33
3.5. Boru Zemin Etkileşimi ve Depreme göre Modellenmesi	35
3.6. Sonuç	39
4. DEPREMİN GÖMÜLÜ BORU HATLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE MEYDANA GELEBİLECEK HASARLAR	40
4.1. Giriş	40
4.2. Altyapı Sistemlerinin Üstyapı Sistemlerinden Farklılıkları.....	41
4.3. Hasar Çeşitleri.....	41
4.4. Gömülü Borularda Hasarlara Sebep Olan Parametreler	44
4.4.1. Dalga Yayılımı.....	45
4.4.2. Fay Hattı Hareketleri	46
4.4.3. Heyelan, Oturma ve Yıpranma	46
4.4.4. Sıvılaşma	47
4.5. Zeminde Oluşan Geçici ve Kalıcı Yer Değiştirmeler	48
4.6. Gömülü Boru Hatlarının Dinamik Davranışı.....	49
4.6.1. San Francisco Depremi	49
4.6.2. Anchorage Depremi.....	49
4.6.3. Santa Rosa Depremi	50

4.6.4. San Fernando	50
4.6.5. Guatemala Depremi.....	50
4.6.6. San Juan ve Mendoza Depremi	50
4.6.7. Meksika Depremi.....	50
4.6.8. San Salvador Depremi.....	51
4.6.9. Napo Proviencie Depremi	51
4.6.10. Whittier Depremi.....	51
4.6.11. Loma Prieta Depremi	51
4.6.12. Limon Depremi	52
4.6.13. Northridge Depremi	52
4.6.14. Kobe Depremi	52
4.6.15. Cariaco Depremi.....	52
4.6.16. Chi-Chi Depremi.....	53
4.7. Türkiye'deki Gömülü Boru Hatlarının Dinamik Davranışı	53
4.8. Sonuç	56
5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	57
6. PLAXİS 2D SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE FARKLI ZEMİN KOŞULLARINDA GÖMÜLÜ OLAN BORULARIN DEPREM YÜKÜ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ ANALİZİ.....	66
6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	66
6.2. Plaxis 2D Sonlu Elemanlar Programı	67
6.3. Zemin Malzeme Modeli	71
6.3.1. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli	71
6.3.2. Hardening Soil (HS) Zemin Modeli	72
6.3.3. Hardening Soil Small Strain (HSSS) Zemin Modeli	73
6.4. Analiz Çalışması.....	73

6.4.1. Analizlerde Kullanılan Model Boyutlarının ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısının Belirlenmesi.....	78
6.4.2. Analiz Sonuçları.....	80
6.4.2.1. Analiz Sonuçlarının Zemin Modeline Göre Karşılaştırması	88
6.4.2.2. Analiz Sonuçlarının Boru Gömlek Malzemesine Göre Karşılaştırması	95
6.4.2.3. Analiz Sonuçlarının Boru Türüne Göre Karşılaştırması	102
6.4.2.4. Analiz Sonuçlarının Yer Altı Su Seviyesine Göre Karşılaştırması	105
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	107
KAYNAKÇA	109

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Defleksiyon Limitleri	15
Tablo 2.2. Kabul edilebilir yataklama zemin sınıfları	17
Tablo 2.3. Atık Su Tesislerinde Deprem Sonrası Performans Hedefleri.....	21
Tablo 2.4. İçme ve Kullanma Suyu Tesislerinde Deprem Sonrası Performans Hedefleri	21
Tablo 2.5. Sismik bölge katsayısı	25
Tablo 3.1. Sayısal modeller ve yapılan kabuller	36
Tablo 5.1. Boruların deprem yükü altındaki davranışları.....	60
Tablo 6.1. Analizlerde kullanılan boru malzeme özellikleri	75
Tablo 6.2. HSSS zemin modeline ait zemin özellikleri.....	76
Tablo 6.3. HS zemin modeline ait zemin özellikleri	76
Tablo 6.4. MC zemin modeline ait zemin özellikleri	77
Tablo 6.5. Model boyutlarına göre analiz sonuçları	79
Tablo 6.6. Sonlu elemanlar ağ yapısına göre analiz sonuçları	80
Tablo 6.7. MC zemin modeline ait A noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları.....	82
Tablo 6.8. MC zemin modeline ait A noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları	82
Tablo 6.9. MC zemin modeline ait B noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları	82
Tablo 6.10. MC zemin modeline ait B noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları.....	83
Tablo 6.11. MC zemin modeline ait C noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları	83
Tablo 6.12. MC zemin modeline ait C noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları.....	83
Tablo 6.13. HS zemin modeline ait A noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları.....	84
Tablo 6.14. HS zemin modeline ait A noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları	84
Tablo 6.15. HS zemin modeline ait B noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları	84
Tablo 6.16. HS zemin modeline ait B noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları.....	85
Tablo 6.17. HS zemin modeline ait C noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları	85

Tablo 6.18.	HS zemin modeline ait C noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları.....	85
Tablo 6.19.	HSSS zemin modeline ait A noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları	86
Tablo 6.20.	HSSS zemin modeline ait A noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları ..	86
Tablo 6.21.	HSSS zemin modeline ait B noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları.....	86
Tablo 6.22.	HSSS zemin modeline ait B noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları ..	87
Tablo 6.23.	HSSS zemin modeline ait C noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları.....	87
Tablo 6.24.	HSSS zemin modeline ait C noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları ..	87

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Esnek borunun yük altındaki davranışı.....	6
Şekil 2.2. Boru türlerinin aşınma miktarları	9
Şekil 2.3. Zemin oturmasının (a) rijit ve (b) esnek borular üstündeki etkisi (S: rijit borunun çevresine yapılmış dolgunun düşey deformasyonu D: zemin yüklerinin etkisi altında esnek borunun düşey deformasyonu).....	12
Şekil 2.4. (a) Rijit ve (b) Esnek boruda yük aktarımının şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.5. Boru döşeme yöntemleri a) Hendek tipi b) Pozitif Projeksiyon tipi c) Negatif Projeksiyon tipi	14
Şekil 2.6. Tipik hendek kesitinin kısımları	15
Şekil 2.7. Hendek kesitinde yataklama (gömlekleme) elemanları.....	16
Şekil 2.8. Boru çevresinin doğru yataklanması.....	17
Şekil 2.9. Kaplamalı hendek yöntemi	18
Şekil 2.10. Çimento katkılı dolgu malzemesi uygulama şekli (DN: Nominal Çap).....	19
Şekil 2.11. Sismik dalga hızı.....	24
Şekil 2.12. Hız spektrumu.....	24
Şekil 3.1. Borunun maruz kaldığı yükler ve basınçlar	28
Şekil 3.2. Boruya etkiyen geri dolgu yükünün dağılımı	30
Şekil 3.3. Farklı boruların deformasyon şekilleri	32
Şekil 3.4. Spangler teorisine göre yük dağılımı	34
Şekil 3.5. Elastik kiriş modeli	37
Şekil 3.6. Düzlem gerilme modeli	37
Şekil 3.7. Shell modeli	38
Şekil 3.8. Hybrid modeli	38
Şekil 4.1. 1993 Hokkaido – Nansei – Oki depreminde (M=7.8) gömülü boru hatlarında meydana gelen hasarlar	42

Şekil 4.2. 1999 Kocaeli depreminde boru hatlarında oluşan hasarlar.....	44
Şekil 4.3. Fay hareketi sonucunda boruda meydana gelen buruşma	46
Şekil 4.4. Düzce depreminden sonra yol güzergahında meydana gelen heyelan	46
Şekil 4.5. Sıvılaşma sonucu borunun zemin yüzeyine çıkması	48
Şekil 4.6. 1999 Marmara depremi sonrasında demiryolu hattında oluşan KYD	48
Şekil 4.7. Heyelan sonucunda borularda oluşabilen KYD.....	48
Şekil 4.8. Fay hareketi sonucunda borularda oluşabilen KYD	49
Şekil 4.9. Erzincan şehrine ait su dağıtım hattı.....	53
Şekil 4.10. Çelik su borusunun deprem sonucunda burkulmuş hali	54
Şekil 4.11. Normal fay ile kesişen borunun zeminde oluşan düşey deformasyonlar sonucunda kırılması.....	54
Şekil 4.12. Ana fay hattını kesen kanalizasyon borusunun kırılması	55
Şekil 4.13. Fay kırılması sonucunda boru hattında görülen hasar	55
Şekil 5.1. Modele ait sonlu elemanlar ağı.....	58
Şekil 5.2. Upland (1990) depreminin ivme-zaman grafiği	58
Şekil 5.3. a) SK-1 b) SK-2 c) SK-3 zemin sondajlarının Plaxis sonlu elemanlar programına tanımlanan modelleri.....	59
Şekil 5.4. Dinamik analiz modeli Plaxis 2D	60
Şekil 5.5. Tünelin derinliğine bağlı olarak zemin yüzeyinde meydana gelen oturmaların (a) MC zemin modeli ile (b) HS zemin modeli ile miktarları.....	61
Şekil 5.6. İksa sisteminin Plaxis 2D sonlu elemanlar programında modellenmesi	62
Şekil 5.7. Arazi ölçümü ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	62
Şekil 5.8. Model boyutları ve sonlu elemanlar ağı	63
Şekil 5.9. Analiz sonuçlarının arazi ölçümleri ile karşılaştırılması.....	64
Şekil 5.10. HS zemin parametrelerinin belirlenmesi	64
Şekil 5.11. a) Model deneyleri ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması b) Kumun içsel sürtünme açısının zemin davranışına etkisi.....	65

Şekil 5.12. a) E_{50} b) E_{ur} c) E_{oed} parametresinin zemin davranışına etkisi	65
Şekil 6.1. Sonlu elemanlar ağ yapısını oluşturan gerilme ve düğüm noktaları.....	67
Şekil 6.2. Model sınırlarının ve özelliklerinin girildiği pencere	68
Şekil 6.3. Plaxis 2D sonlu elemanlar programının ana kısımları.....	68
Şekil 6.4. Zemin profilinin tanımlandığı pencere	69
Şekil 6.5. Zemin ve yapısal eleman özelliklerinin tanımlandığı pencere	69
Şekil 6.6. Tünel penceresinden boru malzeme özelliklerinin ve geometri bilgilerinin tanımlanması	69
Şekil 6.7. Mesh sekmesinden sonlu elemanlar ağının tanımlanması.....	70
Şekil 6.8. Programa tanımlanan YASS'ın görüntülenmesi.....	70
Şekil 6.9. Grafik çizimi için kritik bölgelere noktaların tanımlanması.....	70
Şekil 6.10. MC zemin modeli gerilme-şekil değiştirme eğrisi	72
Şekil 6.11. Drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen zemin modüllerinin tanımı.....	72
Şekil 6.12. Analizlerde kullanılan ana model	74
Şekil 6.13. Yer altı su seviyesinin yüzeyden 2m aşağıda olması durumu (Y1).....	74
Şekil 6.14. Yer altı su seviyesinin yüzeyden 10 m aşağıda olması durumu (Y2).....	75
Şekil 6.15. 1990 Upland depremine ait ivme-zaman grafiği	75
Şekil 6.16. Boyutları $B = 20$ m ve $D = 20$ m olan model	79
Şekil 6.17. Boyutları $B = 200$ m ve $D = 20$ m olan model	79
Şekil 6.18. Boyutları $B = 20$ m ve $D = 20$ m olan sıkı sonlu elemanlar ağı	80
Şekil 6.19. Boyutları $B = 20$ m ve $D = 20$ m olan daha sıkı sonlu elemanlar ağı.....	80
Şekil 6.20. Denge durumu (Hesap Aşaması 1)	81
Şekil 6.21. Boru ve boru gömlek malzemesinin tanımlanması (Hesap Aşaması 2)	81
Şekil 6.22. Deprem yükünün tanımlanması (Hesap Aşaması 3).....	81
Şekil 6.23. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği	89
Şekil 6.24. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği	89

Şekil 6.25. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği.....	89
Şekil 6.26. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği.....	90
Şekil 6.27. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği.....	90
Şekil 6.28. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği.....	90
Şekil 6.29. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği.....	91
Şekil 6.30. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği.....	91
Şekil 6.31. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği.....	91
Şekil 6.32. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği.....	92
Şekil 6.33. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği.....	92
Şekil 6.34. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği.....	92
Şekil 6.35. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği.....	93
Şekil 6.36. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği.....	93
Şekil 6.37. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği.....	93
Şekil 6.38. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği.....	94
Şekil 6.39. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği.....	94
Şekil 6.40. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği.....	94
Şekil 6.41. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği.....	96
Şekil 6.42. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği.....	96
Şekil 6.43. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği.....	96
Şekil 6.44. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği.....	97
Şekil 6.45. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği.....	97

Şekil 6.46. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği	97
Şekil 6.47. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği	98
Şekil 6.48. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği	98
Şekil 6.49. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği	98
Şekil 6.50. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği	99
Şekil 6.51. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği	99
Şekil 6.52. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği	99
Şekil 6.53. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği	100
Şekil 6.54. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği	100
Şekil 6.55. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği	100
Şekil 6.56. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği	101
Şekil 6.57. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği	101
Şekil 6.58. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği	101
Şekil 6.59. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde yatay yer değiştirme grafiği	103

Şekil 6.60. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde düşey yer değiştirme grafiği	103
Şekil 6.61. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde boşluk suyu basıncı grafiği.....	103
Şekil 6.62. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde yatay yer değiştirme grafiği	104
Şekil 6.63. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde düşey yer değiştirme grafiği	104
Şekil 6.64. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde boşluk suyu basıncı grafiği.....	104
Şekil 6.65. C noktası için yer altı su seviyesine göre MC, HS ve HSSS zemin modellerinde yatay yer değiştirme grafiği.....	106
Şekil 6.66. C noktası için yer altı su seviyesine göre MC, HS ve HSSS zemin modellerinde düşey yer değiştirme grafiği.....	106
Şekil 6.67. C noktası için yer altı su seviyesine göre MC, HS ve HSSS zemin modellerinde boşluk suyu basıncı grafiği.....	106

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- GYD:** Geçici yer değiştirme
- KYD:** Kalıcı yer değiştirme
- MC:** Mohr-Coulomb
- HS:** Hardening Soil
- HSSS:** Hardening Soil Small Strain
- PVC:** Polivinil klorür
- HDPE:** High Density Polyethylene
- CTP:** Cam Takviyeli Polietilen
- PE:** Polietilen
- DN:** Nominal Çap
- YYs:** Yönlendirilebilir Yatay Sondaj
- TSE:** Türk Standardları Enstitüsü
- YASS:** Yer Altı Su Seviyesi
- AWWA:** American Water Works Association
- API:** American Petroleum Institute
- ASCE:** American Society of Civil Engineers
- ASME:** American Society of Mechanical Engineers
- ANSI:** American National Standard Institute
- ALA:** American Lifelines Alliance
- FEMA:** Federal Emergency Management Agency
- JSCE:** Japan Society of Civil Engineering

1. GİRİŞ

Gömülü borular, günümüzde kırsal alanlarda özellikle şehir bölgelerinde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sebepten, insanoğlu hayatının sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez mühendislik yapılarıdır. Özellikle insan nüfusunun yoğun olduğu şehir bölgelerinde, meydana gelen bir deprem sonrasında gömülü boru hatlarında oluşabilecek hasarlar ve bundan sonra meydana gelebilecek yangın gibi felaketler ciddi kayıplara sebep olabilmektedir. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, gömülü boru hatlarının projelendirilmesi ve tasarımı önem arz etmektedir.

Gömülü borular hakkında yapılan ilk çalışmalar, 1900'lü yıllarda Anson Marston'un daha çok rijit gömülü borulara etkiyen statik yüklerin hesaplanması kapsamındaki çalışmaları gelmektedir. Marston'un öğrencisi olan A.P. Spangler ise bu çalışmalara ek olarak, esnek boruların statik yükler altındaki davranışını inceleyerek gömülü borular hakkındaki çalışmalara katkı sağlamıştır (Moser, 2001). Günümüzde bilgisayarların ileri derecede gelişmesine bağlı olarak, gömülü boruların statik veya dinamik yükler altındaki davranışını incelemek için sonlu elemanlar programları kullanılmaktadır. Gömülü borunun rijit ya da esnek olmasına göre tasarım yapılabilir. Rijit olan gömülü bir boru, maruz kaldığı yükü doğrudan temel zemine aktarırken esnek olan gömülü bir boru ise, maruz kaldığı yük altında esneme yaparak üstündeki yükü temel ve yan dolgu zemine aktarmaktadır. Bundan dolayı, borunun cinsi göz önünde bulundurularak borunun yerleştirilmesi ve dolgunun uygun bir şekilde yapılması çok önemlidir.

1906 San Francisco ve 1995 Kobe depremlerinde yaşanan büyük kayıplar sonucunda, depremlerin büyük problemlere yol açtığı Amerika ve Japonya gibi ülkeler, gömülü boru hatlarının projelendirilmesi ve tasarımı hakkında deprem yönetmelikleri hazırlamışlardır. Bu gibi ülkeler bundan sonraki gömülü boru hatlarının projelendirilmesinde, hazırladıkları yönetmelikleri esas almışlardır. Ülkemizin birçok bölgesi deprem açısından riskli bölge olmasına rağmen, gömülü boruların depreme göre projelendirilmesine dair bir yönetmelik bulunmadığı için deprem sonrasında gömülü borularda ciddi problemler oluşmaktadır. Bundan dolayı, gömülü boru hatlarının deprem yüklerine göre davranışının bilinmesi ve ona göre projelendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Amerika ve Japonya'nın hazırladıkları deprem yönetmeliklerine bakıldığında, gömülü boru hatlarının tasarımında en önemli hususun boru hattı güzergahının olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, kritik bölgelerde deprem sonrasında yaşanacak büyük yer hareketleri sonucunda

gömülü boru hatlarında hasarların meydana gelme olasılığının yüksek olmasıdır. Bu kritik bölgeler, daha çok fay hatlarının geçtiği, heyelan bölgelerinin olduğu veya boru hattının bağlantı noktaları gibi yüksek miktarda farklı yer değiştirmelerin olduğu alanlardır. Amerikan ve Japon deprem yönetmeliklerinin esası, borunun deprem yüklerine göre yer ve şekil değiştirme değerleri göz önünde bulundurularak sınır değerlere göre kontrolünü yapmaya dayanmaktadır. Gömülü borunun yer ve şekil değiştirme değerleri ise ana kayanın derinliğine, deprem yükünün doğal periyoduna, kayma dalgası hızına, dalga boyuna ve borunun gömme derinliği gibi parametrelere bağlıdır (Japan Gas Association, 2000, ALA, 2008).

Deprem sonrasında gömülü boru hatlarında meydana gelen hasarlar ile ilgili raporlar incelendiğinde, borularda oluşan geçici yer değiştirmelerin (GYD) ve kalıcı yer değiştirmelerin (KYD) boru hatlarında çeşitli hasarlar oluşturduğu görülmektedir. Rapor sonuçlarına göre, GYD ve KYD'lerin oluşma sebepleri ise gelen deprem dalgasının yayılım şekli, boru hattının fay bölgesinde veya fay bölgesine yakın olması, heyelan, sıvılaşma ve boruların gömüldüğü zeminlerde farklı oturmaların olması gibi faktörler gözükmemektedir. Bunların dışında, boruların parçalı bir şekilde birleştirilmesinden dolayı süreksizliklerin fazla olması ve boruların bir yapı elemanına bağlantısının yapılması gibi sebeplerden dolayı bağlantı noktalarının olduğu alanlarda da çoğunlukla hasarlar ile karşılaşmıştır. Bunun sebebi ise, bağlantı noktalarının fazla esnek olmaması ve bir yapı elemanına bağlantı yapıldığı durumlarda zeminlerde farklı oturmaların meydana gelmesinden dolayı kırılmaların olmasıdır (Moser, 2001).

Bu çalışmanın amacı, özellikle deprem açısından riskli olan bölgelerde inşa edilmesi planlanan gömülü boru hatlarında, deprem sonrasında oluşabilecek hasarları öngörmek ve buna bağlı olarak gömülü boru hatlarının doğru bir şekilde projelendirilmesini sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda tez çalışması kapsamında, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak farklı zemin koşullarında farklı malzeme özelliklerine sahip olan gömülü boruların deprem yükü altındaki davranışı incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, altyapı sistemleri ve gömülü borular hakkında genel bilgilere değinilmiştir. Altyapı sistemlerinde kullanılan gömülü boru türleri ve özelliklerinden bahsedilmektedir. Gömülü boru hatlarının projelendirilmesinde etkili olan boru ve zemin özellikleri anlatılmaktadır. Boru döşemenin farklı yöntemleri ve depreme dayanıklı boru hatlarının tasarımını konu alan yönetmeliklere yer verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, boru hatlarının maruz kaldığı yüklere değinilmiştir. Marston ve Spangler yük teorileri anlatılmaktadır. Zemin ve boru arasındaki etkileşimler, gömülü boruların depreme göre nasıl modellendiği hakkında bilgilere yer verilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, depremin

boru hatları üzerinde oluşturduğu etkiler ve bu etkilerden dolayı meydana gelebilecek hasarlar hakkında bilgiler verilmiştir. Depremler meydana geldikten sonra gömülü boru hatlarında oluşan hasarlara ve bu hasarlara sebep olan etkenlere yer verilmiştir. Bu bölümde son olarak geçmişte dünyada ve Türkiye’de meydana gelen önemli depremlerin gömülü boru hatları üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde, tez konusu ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmanın altıncı bölümünde, öncelikle sonlu elemanlar ve zemin modelleri hakkında bilgilere değinilmiştir. Bu bölümde ayrıca, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı genel olarak tanıtılmıştır. Son olarak tez çalışması kapsamında yapılan analizlere ve sonuçlarına yer verilmiştir. Çalışmanın yedinci bölümünde ise, tez çalışmasının genel sonuçları verilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

2. ALTYAPI SİSTEMLERİ VE GÖMÜLÜ BORU HATLARI

2.1. Giriş

Altyapı sistemleri, insan ve şehir yaşamının sürdürülebilirliği için gerekli olan bütün altyapı elemanlarını kapsamaktadır. Gelişmiş bir ülkenin hem ekonomik büyümesi hem de kalkınması bakımından altyapı sistemleri çok önemlidir. Günümüzde altyapı sistemleri, yaşam şartlarını kolaylaştırması açısından çok önemli bir yere sahiptir. Gömülü boru hatları ise bu altyapı sistemlerinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Gömülü boru hatlarının kullanım alanlarına bakıldığında özellikle içme suyu, kanalizasyon, doğalgaz ve petrol boruları önde gelmektedir. Son zamanlarda içme suyu, kanalizasyon, petrol özellikle de doğalgaz projelerinin çok fazla olması ve bu projelerin insan yaşamı için çok önemli olması gömülü boruların önemini ortaya koymaktadır.

HAZUS (Hazards US) 97'nin altyapı tanımına bakıldığında, altyapı kapsamına giren sistem elemanları ulaşım ve hizmet sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Karayolu ve demiryolu sistemleri, hafif raylı sistemler, deniz ve hava limanları sistemleri, otobüs ile ulaşım sistemleri, iskele ve liman sistemleri ulaşım sistemlerine dahil iken içme suyu, doğalgaz, enerji, elektrik, kanalizasyon, petrol ve telekomünikasyon gibi sistemler ise hizmet sistemleri kapsamına girmektedir (Jamieson & Milheizer, 1997). Hizmet sistemleri kapsamında yer alan kanalizasyon, su, telefon, gaz, petrol gibi hatlar, su kanalları, drenaj kanalları, atık su arıtma tesisleri, raylı sistem tünelleri, menfezler çok geniş kullanım alanlarına sahiptir (Vaslestad, 1991). Gömülü boru hatları, genel olarak toprağa gömülen boru sistemi ve bunun ile ilgili sanat yapılarından oluşmaktadır. Gömülü boruların tercih edilmesinin en önemli sebebi, borunun taşınan maddenin fiziksel (tat, koku, renk gibi) veya kimyasal özelliğini bozmadan iletimini sağlamasıdır (Spangler, 1948, Moser, 2001).

Gömülü boru hatlarının herhangi bir sebepten dolayı hasara uğramaması, meydana gelen hasar veya arıza probleminin en kısa zamanda çözülmesi gerekmektedir. Özellikle deprem, sel gibi doğal afetlerde içme suyu ihtiyacının giderilmesi, atık suların hem çevreye hem de insanların yaşamına zarar vermemesi için gömülü boru hatlarının hasar görmemesi önem arz etmektedir. Ancak özellikle deprem gibi doğal afetlerde gömülü boru hatlarının hasara uğramaması konusu bazen göz ardı edilebilmektedir. Oysaki özellikle büyük depremler sonucunda gömülü boru hatları çok ciddi hasarlara maruz kalmaktadır. Elektrik, su, doğalgaz, kanalizasyon gibi boru hatlarının deprem gibi doğal afetlerde zarar görmesi özellikle nüfusun

yoğun olduğu şehir hayatını olumsuz etkiler ve buna bağlı olarak hem ekonomik kayıplar olur hem de insanların sağlık durumları tehlikeye girmiş olur (Yüzügüllü & Birgören, 2003).

Özellikle son yıllarda meydana gelen depremler sonucunda, gömülü boruların zarar görmesi ve bundan dolayı da sosyal yaşantının bundan oldukça etkilenmesi gömülü boru hatlarının deprem açısından değerlendirilmesini beraberinde getirmiştir. ABD ve Japonya, gömülü boruların deprem performansı açısından değerlendirilmesi hakkında en çok araştırmaları olan iki ülkedir. Şimdiye kadar meydana gelen en büyük depremlerden biri olan 1906 San Francisco depreminde, doğalgaz boru hatlarında oluşan hasarlardan dolayı meydana gelen yangın sonucunda itfaiye binaları zarar görmüş ve şehir hayatının ihtiyaçları için gerekli olan suyun büyük bir kısmı yangınların söndürülmesi için kullanılmıştır. 1906 San Francisco depremi hem ABD hem de diğer dünya ülkeleri açısından özellikle içme suyu, doğalgaz gibi gömülü boru hatlarının deprem açısından tasarımının gerekliliğini ortaya koymuştur. 1971 San Fernando depremi sonucunda su, doğalgaz, elektrik, acil yardım tesisleri gibi altyapılar zarar görmüştür. Özellikle 1971 San Fernando depreminden sonra ABD’de altyapı sistemlerinin deprem açısından performansının araştırılması hakkındaki çalışmalar hız kazanmıştır. Böylece altyapı sistemlerinin depreme karşı performansı ve deprem sonrasında oluşabilecek hasarların giderilmesi kapsamında yol alınmıştır. Bütün bu çalışmalara rağmen, 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge Kaliforniya depremlerinde fazla olmasa da, altyapı sistemlerinde hasarlar oluşmuştur. Türkiye’de ise 1992 Erzincan, 1995 Dinar ve özellikle 1999 Marmara depremleri sonucunda altyapı sistemlerinde oldukça hasarlar meydana gelmiştir. 2000’li yıllarda altyapı sistemleri hakkındaki çalışmalar artmıştır (Balkaya, 2001).

2.2. Gömülü Boru Türleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları

2.2.1. Gömülü Boru Türleri

İnsanlar çok eski çağlardan günümüze kadar, kırsal veya şehir hayatının standartlarını iyileştirmeye çalışmışlardır. Asya, Avrupa ve Amerika gibi kıtalarda, eski çağlardaki medeniyetlere ait içme suyu ve kanalizasyon sistemlerinin kalıntıları bulunmuştur. Pers medeniyeti ovalardaki şehirlere içme suyu getirmek için dağların altından yer altı tünelleri kazmışlardır. Ortaçağda Paris, Londra gibi şehirlerdeki kalıntılara bakıldığında tuğla kaplamalı atık su kanalları ile karşılaşmıştır (Moser, 2001). Ortaya çıkan sorunlar ve ihtiyaçlar, boru teknolojisinin gelişmesini tetiklemiş ve günümüze kadar gelmesinde etkili olmuştur. Günümüzde gömülü borular; içme suyu ve kanalizasyon boru hatları, gaz ve petrol boru hatları,

telefon ve elektrik hatları, ısı dağıtım hatları, su arıtma sistemleri, deniz deşarj sistemleri olmak üzere çok farklı amaçlar için kullanılmaktadır.

Günümüz toplum yaşam seviyesine gelinceye kadar, altyapı sistemlerinde kullanım amaçlarına yönelik ihtiyaç odaklı ve teknolojik ilerlemelere paralel olarak gelişmeler olmuştur. Bu altyapı sistemlerinde ihtiyaçları karşılamaya yönelik ne tür malzemelerin kullanılması gerektiğine dair araştırmalar olmuştur ve bu konuda sıkıntılar yaşanmıştır. Günümüzde farklı maksatlar için farklı türde gömülü borular kullanılmakta olup en yaygın olanları beton, çelik, dökme demir, font, cam takviyeli plastik ve PVC malzeme kökenli borulardır. Gömülü borular, yaptıkları malzemenin yük altındaki davranışına göre rijit ya da esnek olmak üzere genel olarak iki sınıfa ayrılırlar. Asbestli çimento, beton, betonarme gibi boruların dahil olduğu rijit boruların deformasyona uğramadığı kabul edilmektedir. Bu sebepten dolayı, rijit borular maruz kaldığı yükün tamamını taşırlar. Yatay veya düşey boyutlarda %0.1'in üzerindeki deformasyonlar, rijit borularda çatlaklıklara sebep olmaktadır. İnce çelik, plastik malzeme kökenli esnek borular ise maruz kaldıkları yükler altında deformasyona uğrayabilirler (Linsley & Franzini, 1955, Babbitt & Baumann, 1958, Moser, 2001). Şekil 2.1'de gösterildiği gibi esnek bir borunun yük altında kırılmadan şekil değiştirebildiği görülmektedir. Esnek borular, en az %2 oranında şekil değiştirebilen borular olduğu için maruz kaldıkları yük boru ve etrafındaki zemin tarafından beraberce taşınmaktadır (Moser, 2001).



Şekil 2.1. Esnek borunun yük altındaki davranışı

Kaynak: (Yüzügüllü & Birgören, 2003:25)

Betondan üretilen gömülü borular, değişik dış yük ve trafik yüklerine karşı dayanımları oldukça yüksektir. İç basınç dayanımları yüksektir. Beton boruların birim hacim ağırlıkları yüksek olduğu için içleri boş olsa bile zemin içinde yüzme ihtimalleri düşüktür. Normal şartlar altında korozyondan etkilenmezken, asit gibi sıvılara maruz kaldıklarında korozyona uğrarlar. Porozite ve bünyesinde oluşan çatlaklar sonucunda içindeki sıvıların dışarıya sızma ihtimalleri

yüksektir. Tamirleri zor olmakla birlikte bakım maliyetleri düşüktür. Sabit zemin yükleri ve yol gibi dinamik yüklere karşı işletme süresince borunun kesiti zarar görmeden kalabilmektedir (Babbitt, Donald, & Cleasby, 1962, Muslu, 1998).

Normal font döküm borularının, çelik borulara göre zemin ve trafikten kaynaklı yüklere karşı dayanıklılıkları daha fazladır. Font boruların, paslanmaya karşı korunması için fabrikada üretilirken iki katlı bitüm tabakası ile kaplanırlar. Hizmet ömürleri yaklaşık olarak 50 yıldır. Buna rağmen, kırılabilirlikleri fazla, darbelere karşı mukavemetleri kısmen daha az, ağır ve maliyetlidirler. Son zamanlarda font borulara daha esnek bir özellik katılarak darbelere karşı daha dayanıklı olmaları sağlanmıştır. Bu tür boru çeşidine Duktıl Font Boru denmektedir. Duktıl özellikteki font boruların mukavemet özelliği çelik borulara yakın olmasına rağmen korozyona karşı dayanıklılık özelliği normal font borular gibidir. Özellikle atık su ve yağmur projelerinde, mekanik ve kimyasal dirençleri fazla oldukları için dökme demir gömülü boru tipleri tercih edilmektedirler (Samsunlu, 1995, Öztürk, 1996, Muslu, 1998).

Çelik borular, daha çok isale hatlarında kullanılmaktadır. Çelik boruların boyları uzun oldukları için, döşenmeleri kolay ve kısa zamanda gerçekleşir. Heyelan bölgelerinde daha çok çelik borular tercih edilmektedir. Su şebekelerinde ek yapılmasındaki zorluklara rağmen az da olsa kullanılırlar. Beton ve dökme borulara kıyas ile hafif olmaları taşıma masraflarını azaltmaktadır. Font borulara göre, maliyetinin az ve daha hafif olmaları, nakliyesini ve döşenmesi daha kolaylaştırmaktadır. Diğer yandan iç basınlara karşı dayanıklılıkları daha azdır. Cidar miktarlarının az olması ve korozyona karşı dayanıksız olmaları hem bakım maliyetlerini artırır hem de hizmet ömrünü kısaltmaktadır (Samsunlu, 1995, Öztürk, 1996, Muslu, 1998, Balkaya, 2001).

Cam takviyeli polietilen (CTP) borular, büyük çaplara sahip isale boru hatlarında kullanılırlar. Et kalınlıkları ince olmalarına rağmen dayanımları oldukça yüksektir. Çelik boruya kıyasla 6 kat, beton boruya kıyasla ise 15 kat ağırlıkları daha azdır. Boru uzunlukları fazla olabildikleri için eklenti yerleri azdır ve sızıntı yapma ihtimalleri oldukça düşüktür. Hizmet ömürleri 50 yıldır (Süperlit, 2008).

Asbestli çimento boruların kimyasal mukavemetleri yüksektir. İşlenmeleri, kesilebilmeleri ve delinebilmeleri kolaydır. Yük kayıplarının az ve dona karşı dayanıklı olmaları pozitif yönleridir. Darbelere veya çarpmalara karşı hassas ve eğilme rijitliklerinin düşük olmaları ise negatif yönleridir. Heyelana açık alanlarda ve dolgu yapılan zeminlerde kullanılmaları sakıncalıdır. Asbestli çimento borularının dirsek kısımları özel parçalardır.

Bunun dışında ayırım kısımları, vana yerleri, çapın değiştiği yerler fonttan yapılan hususi parçalarla imal edilirler. Bu sebepten dolayı bu gibi bağlantı yerleri az olan boru projelerinde kullanılmaları tercih edilmektedir (Balkaya, 2001).

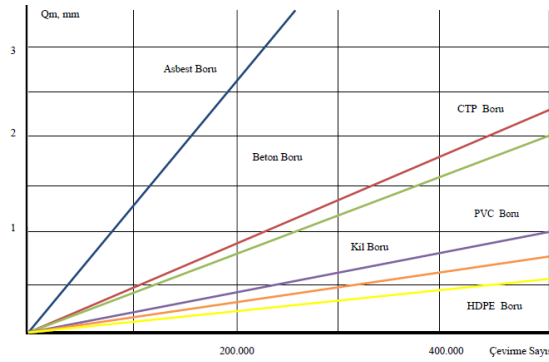
PVC (Polivinil Klorür) boruları, özellikle atık su borusu olarak kullanılan sert plastik malzemedен oluşan ve yüksek yoğunluklu polietilen boruların neredeyse bütün pozitif özelliklerini barındırmaktadırlar. PVC boruların hizmet ömürleri yaklaşık olarak 50 yıldır. Asit ve bazlara karşı dirençleri yüksektir. Hafif oldukları için taşınmaları ve döşenmeleri oldukça kolaydır. Montajları kolay olmakla birlikte diğer borular ile bağlantıları yapılabilmektedir. Aynı çapa sahip olan diğer borulara kıyasla birim zamanda daha çok su iletirler. 60 cm çap miktarına kadar kullanımları ekonomiktir. PVC borularının, ortam koşulları bakımından 15 ve 60 derecedeki sıcaklık aralıklarında kullanılmaları tavsiye edilmektedir. Kırılabilirlikleri yüksektir, güneş ve deniz ortamından etkilenmektedirler (Samsunlu, 1995, Öztürk, 1996, Balkaya, 2001).

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular esnek oldukları için şekil almaları kolaydır. Bu özelliğe sahip oldukları için diğer boru çeşitlerine göre montajları oldukça kolaydır. Kimyasal malzemelere karşı dayanımları yüksektir. Maliyetleri düşüktür. Hafif olmaları taşınma ve döşenmelerini kolaylaştırmaktadır. Esnek oldukları için trafiğin yoğun olduğu bölgelerde kullanılmaları tavsiye edilmektedirler. Naklieleri esnasında kırılma veya çatlama gibi durumlarla çok az karşılaşıldığı için malzeme israfı çok azdır. HDPE boruları neredeyse pürüzsüz oldukları için diğer boru çeşitlerine kıyasla birim zamanda %10-25 daha fazla su ilettikleri için daha küçük çaplarda tercih edilebilmektedirler. Hizmet ömürleri en az 50 yıldır. Doğada çürümeleri ise çok uzun zaman almaktadır. Mevsim koşullarına karşı oldukça dayanıklıdırlar. Bakım ve onarım maliyetleri çok azdır. Diğer boruların eklenti kısımları daima sorun teşkil ederken, HDPE borularının eklenti yerlerinin iyi montaj yapılması durumunda hem içten dışa hem de dıştan içe sızıntı yapmazlar. Mekanik darbelere karşı dayanıklılıkları oldukça yüksektir. HDPE boruları elastik malzemedен yapıları için, özellikle deprem bölgelerinde kullanılmaları durumunda deprem yüklerini sönmüleyebildikleri için, deprem yüklerine karşı performansları diğer borulara kıyasla oldukça daha iyidir. Arazi şekillerine uyum sağlarlar. Zemin hareketlerinden hemen hemen hiç etkilenmezler (Samsunlu, 1995, Öztürk, 1996, Balkaya, 2001).

Polietilen (PE), sünek demir, CTP, PVC ve HDPE gibi esnek özelliğe sahip olan boruların, depreme maruz bölgelerde kullanılmaları şiddetle tavsiye edilmektedir. Gömülü boru

hattında kullanılması planlanan boruyu seçerken, maliyetinin düşük olması, teknik ve işletme standartları yönünden uygun olması gerekmektedir (Datta, 1999).

Günümüzde projelerde boru seçiminde Şekil 2.2’de gösterildiği gibi boruların aşınma miktarları göz önünde bulundurulmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi HDPE borunun diğer borulara kıyasla gösterdiği direnç en yüksektir. Diğer bir ifade ile aşınma miktarları en az olan boru çeşididir. Bu durum yapıldığı polietilen malzemesinden kaynaklanmaktadır. Asbest ve beton borular ise aşınma miktarlarının çok olması ve buna bağlı olarak dayanımlarının daha az olmalarından dolayı yer altında diğer borulara göre daha çok hasara uğramaları beklenmektedir.



Şekil 2.2. Boru türlerinin aşınma miktarları

Kaynak: (Fırat Pen, 2008)

2.2.2. Gömülü Boruların Kullanım Alanları

Temiz su veya içme suyu boru hatlarını, taşıma ve dağıtım sistemleri olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Taşıma sistemleri, kaynaktan alınan suyun dağıtım sistemine ulaştıran kısımdır. Bağlantı kısımları azdır. Bu sebepten dolayı, taşıma sistemleri hatlarında su akımı genel olarak sabit olarak kabul edilmektedir. Bu boru hatlarının gömülme derinlikleri fazladır. Bu kapsamda kullanılan boruların iç basınçlarının kriterlere uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Dağıtım sistemleri ise, taşıma sistemlerinden gelen suyu ihtiyaca göre farklı farklı kullanıcılara ulaştırır. Bu yüzden bağlantı noktaları oldukça fazladır. Bağlantı noktaları fazla olduğu içinde eğilmeleri ve farklı oturmaları engellemek için titiz bir şekilde döşenmelidirler. Dağıtım sistemleri, birbirlerine içten geçirmeli olacak şekilde bağlanırlar. Boruların zarar görmemesi için uygun derinliğe gömülmesi gerekmektedir. Bağlantı noktalarının herhangi olumsuz bir duruma karşı sağlam olması gerekir. Su ve zemin ile kimyasal bakımdan tepkimeye girmemeleri gerekmektedir (Toprak, 1994, Moser, 2001).

Kanalizasyon hatları, kullanılan suların toplanması ve mümkünse bu suların arıtılması için kurulan boru hatlarından oluşur. Bu boru hatları, genel olarak bodrum katlarından atık

suyun toplanmasına imkan sağlayacak şekilde mümkün olan derinliklere gömülmektedirler. Boruların gömülme derinlikleri fazla olacağı için zemin yüklerinden dolayı, gömülü boru hattı yüksek miktarda basınçlara maruz kalır. Bu sebepten dolayı, kanalizasyon boru hatlarında kullanılacak borunun seçiminde mukavemet ve rijitlik değerlerini göz önünde bulundurmak gerekir. Kanalizasyon boru hatlarının, muhtemel sızıntıları önleyecek şekilde bağlanması, kullanılan borunun malzemesinin hem zemin hem de kanalizasyona karşı kimyasal tepkime açısından uygun olması, boru içindeki akıntının sürekli olması bakımından borunun pürüzsüz olması ve boru hattının hizmet ömrünün minimum 50 yıl olması gerekmektedir (Moser, 2001). Kanalizasyon hatlarının akıntısının kendi cazibesiyle olması gerekmektedir. Atık suların taşınması esnasında mümkün olduğu kadar içindeki sıvıların pH değerlerinin sabit olması için beton borular tercih edilmektedir. Bu yüzden en yaygın kullanılan boru tipi beton borudur. Bazı farklı durumlarda plastik kökenli borularda kullanılabilir (Toprak, 1994, Balkaya, 2001).

Drenaj hatlarının, yer altı atık su bağlantı noktaları genelde dökme demirden yapılırlar. Bu hatların bağlantı noktalarının montajı geçmeli veya manşon tipinde olabilir. Boru hattında havalandırma kısımları olmalıdır. Temizlik amaçlı hat boyunca bağlantı noktaları olmalıdır. Boru hattının eğimi 20 mm/m olmasına dikkat edilmelidir (Toprak, 1994, Balkaya, 2001).

Gaz boru hatlarında, seçilen borunun malzemesi dökme demirden oluşmaktadır. Borular eğer zemine gömülecek ise zemin alkali veya asidik özelliğe sahip ise gaz borularını uygun koruyucu bir malzeme ile kaplamak gerekmektedir. Bununla birlikte, taşınan gazın bünyesinde hidrojen sülfür gibi bir malzeme bulunuyorsa borunun korozyona karşı korunması gerekir (Toprak, 1994, Balkaya, 2001).

Deniz hatlarının inşasında plastik, çelik ve betonarme kökenli boru cinsleri kullanılmaktadır. Dökme demir, PVC, betonarme, çelik ve HDPE tipi borular en kullanılan boru çeşitleridir. Son zamanlarda boru hattının maliyetini azaltmak için, daha çok plastik ve çelik borular tercih edilmektedir. Genelde 1 metre çapından büyük borular için betonarme boru tipleri tercih edilir. Ağır olmalarından dolayı deniz tabanına yerleştirilmeleri kolay olmaktadır. Bu tür boruların iç kısımlarının korozyona uğramaması için içleri katran ile sağlam hale getirilir (Samsunlu, 1995, Öztürk, 1996, Balkaya, 2001).

2.3. Gömülü Boru Hatlarının Projelendirilmesinde Etkili Olan Boru ve Zemin zellikleri

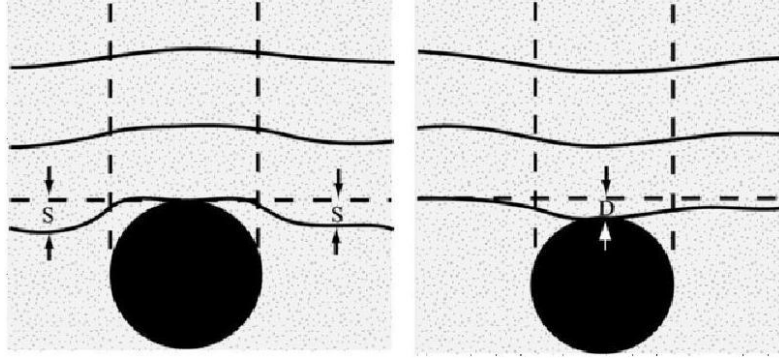
Zeminler inŖaat mühendisliği açısından, gemiŖten günümüze kadar hem inŖaat malzemesi olarak kullanılmıŖ hem de köprü, bina, tünel, boru hatları gibi yapı elemanlarından gelen yüklerin taŖıttırıldıđı önemli bir unsur olmuŖtur. Gömülü boruların projelendirilmesinde etkili olan parametreler çoktur. Gömülü borunun etrafındaki gömlek ve boru malzemesinin özellikleri etkili olan parametreler arasında önde gelen parametrelerdir. Zemine gömülü olan boru ve etrafını çevreleyen zemin, dıŖarıdan gelen yükleri beraber karŖırlar. Bu durum zemin-yapı etkileŖimi açısından önemlidir. Bu kapsamda gömülü boru hattının tasarımında, borunun etrafındaki zeminin sıklılığı, doğunluk derecesi, birim hacim ağırlığı ve elastisite modülü gibi özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Boruya etkiyen gerilmelerin üniform olmasını sağlamak için borunun iyice yerleŖtirilmesi ve etrafındaki dolgu zemininin uygun bir Ŗekilde sıkıŖtırılması gerekir. Borunun zemine yerleŖtirme yöntemi ise zemin sınıfına, zeminin birim hacim ağırlığı ve su muhtevasına, gömme derinliğine, borunun özellikleri gibi parametreler göz önünde bulundurularak belirlenir (Moser, 2001).

Gömülü borular amaca yönelik hem beton ve türevleri hem de plastik ve türevleri gibi malzemelerden yapılmaktadır. Boruların yapıldığı malzemeleri rijitlik ve dayanım, korozyona karŖı direnci, hafif veya esnek olması, dŖeme kolaylığı gibi yönlerden kıyasladığımızda birbirlerine göre hem üstün hem de zayıf yönleri vardır. Burada önemli olan projelendirme yapılırken amaca yönelik boru türünü seçmektir (Moser, 2001).

Gömülü boruların tasarımında, borunun mukavemet ve rijitlik özelliklerini dikkate almak gerekmektedir. Mukavemet, borunun maruz kaldığı yüke karŖı performansı olarak tanımlanmaktadır. Zemin yükü, dinamik yükler, farklı oturmalar veya eğilme gibi parametrelerden dolayı burada i basınç oluŖur. Rijitlik ise, borunun eğilmeye karŖı gösterdiği performanstır. Borunun yapıldığı malzemenin elastisite modülü ve borunun atalet momenti, rijitliğin fonksiyonunu oluŖturmaktadır. Borunun dayanıklılığı, borunun zamana bağlı olarak ortam koŖullarına karŖı performansının bir ifadesidir ve korozyon dayanımı, aŖınma direnci gibi özellikler borunun dayanıklılığını etkileyen parametrelerdir (Linsley & Franzini, 1955).

Daha öncede ifade edildiği gibi, gömülü borular yapıldıkları malzemenin Ŗekil deđiŖtirmesine bağlı olarak rijit ve esnek olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Boru malzemesinin yapısı bozulmadan en az %2'lik eğilme yapabilen borular, esnek borular grubuna girer. Bu ifadenin dıŖında kalan borular ise rijit borular grubuna girmektedir. Gömülü boruların

tasarımında borunun rijit ya da esnek olmasına göre ilgili standartlar kullanılır. Genelde betondan üretilen borular rijit plastik malzemeden üretilen borular ise esnek olarak tanımlanır. Şekil 2.3'te hem rijit hem de esnek bir borunun oturma etkisi altındaki davranışı gösterilmektedir (Moser, 2001).

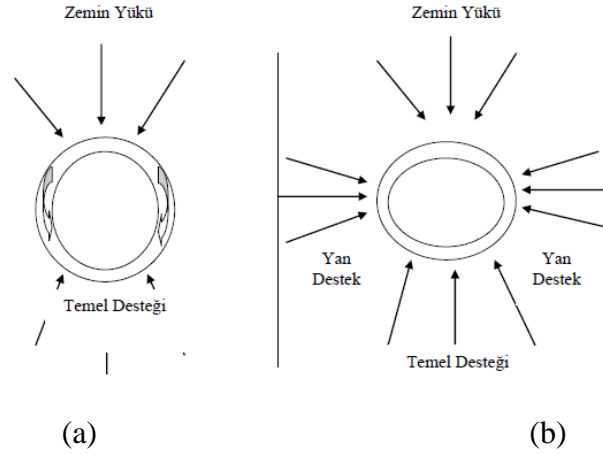


Şekil 2.3. Zemin oturmasının (a) rijit ve (b) esnek borular üstündeki etkisi (S: rijit borunun çevresine yapılmış dolgunun düşey deformasyonu D: zemin yüklerinin etkisi altında esnek borunun düşey deformasyonu)

Kaynak: (Moser, 2001)

Esnek borular, maruz kaldıkları zemin yüklerini kendisini çevreleyen zemine aktarırlar. Borunun maruz kaldığı yükün artmasına bağlı olarak düşey yarıçap azalırken yatay yarıçap artar. Yatay ve düşey doğrultudaki zemin basınçlarının birbirine eşit olması durumunda borunun çevresinde oluşan hidrostatik basınçtan dolayı, boruda oluşan fazladan gerilmeler borunun burkulmasına sebep olur (FEMA, 1999).

Rijit borularda, borunun maruz kaldığı zemin veya trafik yüklerinden dolayı, boruda düşey bir basınç oluşur ancak yatayda herhangi bir tepki kuvvetinin meydana gelmediği veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılır. Esnek borular maruz kaldıkları yükün büyük çoğunluğunu çevresindeki zemine taşıırken rijit borular ise maruz kaldıkları yükün büyük çoğunluğunu kendileri taşırlar. Şekil 2.4'te rijit ve esnek bir borunun yük aktarımı gösterilmektedir (Moser, 2001, C.P. & L.P., 2003).



Şekil 2.4. (a) Rijit ve (b) Esnek boruda yük aktarımının şematik gösterimi

Kaynak: (C.P. & L.P., 2003)

Gömülü rijit boruların projelendirilmesi belli bir emniyet faktörüne göre yapılmaktadır. Maruz kaldığı yükleri güvenle taşıma için uygun mukavemet değerlerine sahip borunun seçilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı önce borunun maruz kalacağı yükler hesaplanır, uygun yataklama türü seçilir ve ona göre de yük faktörü belirlenir. En sonunda ise uygun mukavemete sahip boru seçilir. Esnek boruların projelendirilmesinde ise hem boruyu çevreleyen zeminin rijitliği hem de borunun mukavemeti önem arz etmektedir. Esnek borularda önemli olan borunun esnedikten sonra kırılmamasıdır yani deformasyona uğramamasıdır. Esnek borularda deformasyon sınırları vardır. Borular tasarlanırken buna dikkat edilmelidir. Eğer bu hususa dikkat edilmez ise borular maruz kaldıkları aşırı yükler altında ciddi hasarlara uğrarlar (Moser, 2001).

2.4. Boru Döşeme Yöntemleri ve İlgili Yönetmelikler

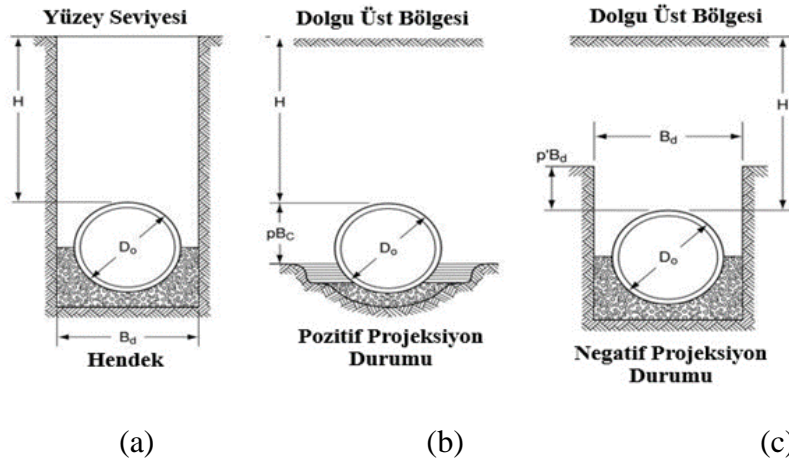
Gömülü boruların döşeme yöntemleri, hendek derinliğine, borunun cinsine, doğal zemin koşullarına ve geri dolgu malzemesine göre belirlenmektedir. Bina gibi üst yapıların tasarımı bölgeden bölgeye değiştiği gibi boru hatlarının tasarımı da bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir. Bu kapsamda zemin özellikleri ve boru malzemesine göre tasarımı belirlemek gerekir. Bu tasarımların nasıl olması gerektiği ise yönetmeliklere göre belirlenir. Bu bölüm kapsamında, gömülü boruların döşeme yöntemleri ve ilgili yönetmeliklerde mevcut olan önemli hususlara değinilmiştir.

2.4.1. Boru Döşeme Yöntemleri

Gömülü boruların maruz kaldıkları yüklerin hesaplanması bakımından boruların döşeme yöntemleri (Şekil 2.5), borunun yerleştirilmesi ve yükü etkileyen ortam koşullarına

bağlı olarak, “hendek tipi” ve “dolgu tipi” olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Dolgu tipi borular da “pozitif ve negatif projeksiyonlu borular” olmak üzere iki gruba ayrılır.

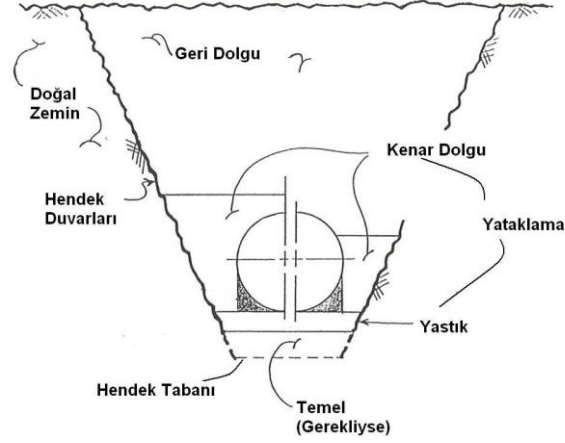
Hendek tipi boru döşeme yönteminde, hendek açıldıktan sonra boru uygun bir şekilde yerleştirilir ve tekrar geri dolgu ile hendek kapatılır. İçme suyu, doğalgaz ve kanalizasyon borularının döşenmesi hendek tipi döşeme yöntemine göre yapılmaktadır. Dolgu tipi boru döşeme yönteminde ise boru yüzeye daha da yakındır. Yani hendek derinliği azdır (Spangler, 1966).



Şekil 2.5. Boru döşeme yöntemleri a) Hendek tipi b) Pozitif Projeksiyon tipi c) Negatif Projeksiyon tipi

Kaynak: (ACPA, 2011)

Şekil 2.6’da gösterilen tipik bir hendek kesitte borunun stabilitesini sağlamak için, borunun temel, yan ve üst dolgularının doğru ve sağlam bir şekilde yapılması gerekmektedir. Gömülü boru terminolojisinde defleksiyon terimi, borunun bulunduğu zemin ortamının deformasyonu olarak tanımlanır. Başlangıç ve uzun dönem defleksiyonları, zemin ortam şartları ve boru döşeme şekli nasıl olursa olsun Tablo 2.1’de gösterilen sınır değerleri aşmamalıdır. Bu sınırlar haricinde yapılan döşemeler, borunun performansını olumsuz etkiler. Gömülü boru hatlarının döşenmesinde, boru hattı boyunca doğal zemin şartlarının farklılık gösterdiği durumlara dikkat etmek gerekir (Süperlit, 2008).



Şekil 2.6. Tipik hendek kesitinin kısımları

Kaynak: (Spangler, 1966)

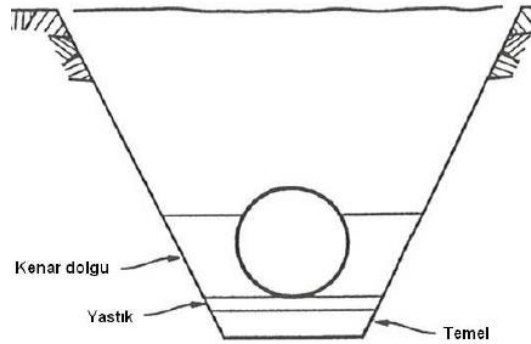
Tablo 2.1. Defleksiyon Limitleri

Maksimum Başlangıç Defleksiyonu (%)	3
Maksimum Uzun Dönem Defleksiyonu (%)	5

Kaynak: (Süperlit, 2008)

Yataklama diğer bir ifade ile gömlekleme boruya yeterli miktarda destek sağlamak için boru çevresinin uygun zemin dolgu malzemesi ile doldurulmasıdır ve Şekil 2.7’de gösterildiği gibi temel, yastık ve kenar dolgu kısımlarından oluşur (Howard, 1996). Gömülü boruların hizmet ömrünün uzun ve performansının iyi olması için boru döşeme aşamalarının borunun malzeme özelliğine ve türüne uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir. Boru ve gömlekleme malzemesi boru-zemin etkileşimi kapsamında borunun maruz kaldığı yükü beraber taşırlar. Yapılan saha uygulamaları sonucunda, genel olarak borular için en uygun yataklama ve geri dolgu malzemesinin yeterli miktarda sıkıştırılmış granüler zemin malzemesi olduğu görülmüştür. Boruların döşenmesi için açılan zemin ortamının, iş güvenliği açısından, kaymasını önlemek gerekir. Bir önemli husus ise hendek ortamını su koşullarından korumak gerekir. Trafik yüklerinin veya yoğun nüfusun az olduğu yerlerde hendek derinliği boru üst seviyesinden minimum 70 cm olmalıdır. Boru ile hendek tabanı arasındaki yastık malzeme kalınlığı minimum 15 cm olması gerekir. Boru hattı boyunca doğal zemin özelliklerinin değişkenlik göstermesi durumunda boru altındaki yastık malzemenin derinliği boruya yeterli destek sağlayacak miktarda olmalıdır. Zemin şartlarına bağlı olarak yastık malzeme altına en

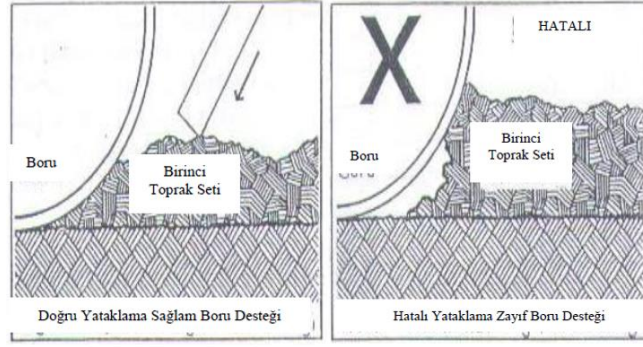
az 15 cm olacak şekilde temel yapılabilir. Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu zemin koşullarında gömülü borunun stabilitesini sağlamak için borunun üstüne yeterli kalınlıkta dolgu yapılması gerekir. Aksi halde boru hattının döşenmesine izin vermemek gerekir. Genel olarak boru üst dolgu yüksekliğinin en azından boru çapına eşit olması yeterlidir. Kazılacak hendek genişliğinin en az boru çapına (D) ek olarak her iki yandan 40 cm olacak şekilde toplamda en az D+80 cm olması gerekir. Ayrıca hendek genişliğinin, borunun kolayca döşenmesine ve dolgu malzemesinin sıkıştırılmasına olanak verecek şekilde olması gerekir. Boru hattı zemin koşullarının kötü olduğu durumlarda hendek genişliği arttırılabilir. Temel, yastık ve yan dolgu kısımlarından oluşan yataklama ya da gömlekleme malzemesinin en az %70 Relatif Sıkılıkta veya %90 Standart Proktor Yoğunlukta sıkıştırılmış uygun bir malzeme olması gerekir (Süperlit, 2008).



Şekil 2.7. Hendek kesitinde yataklama (gömlekleme) elemanları

Kaynak: (Howard , 1996)

Boru yataklaması boruya sürekli ve yeterli bir destek sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Yataklama malzemesinin kum olması durumunda yeterli sıkılıkta olması için optimum su muhtevasında sıkıştırılmasının yapılması gerekir. Ayrıca sıkıştırma uygulaması boruya zarar vermeden yapılmalıdır. Gerekli olması durumunda yataklama yapılmadan önce boru hendek tabanını sağlamlaştırmak için temel yapılmalıdır. Hendek boşluklarının dolgu malzemesi ile boşluk kalmayacak şekilde doldurulmalıdır (Şekil 2.8). Boru hendeği kazılırken çıkan doğal zemin malzemesinin uygun olması durumunda yataklama ya da geri dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Tablo 2.2’de uygun yataklama malzemesi zemin sınıfları verilmiştir (Süperlit, 2008).



Şekil 2.8. Boru çevresinin doğru yataklanması

Kaynak: (Süperlit, 2008)

Tablo 2.2. Kabul edilebilir yataklama zemin sınıfları

Spesifikasyon	Kabul edilebilir	Belki Kabul Edilebilir
Çakıl	GW, GP, GW-GC GW-GM, GP-GC, GP-GM	
Temiz kum	SW, SP, SW-SC SW-SM, SP-SC, SP-SM	
Kum	SW, SP, SW-SC SW-SM, SP-SC, SP-SM	SM, SC GM, GC

Kaynak: (Süperlit, 2008)

Dolgu tipi boru döşeme yöntemi pozitif ve negatif projeksiyonlu olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Pozitif projeksiyonlu boru döşeme yönteminde hendek derinliği sığdır. Boru üst seviyesi doğal zeminin üstündedir. Boru yataklandıktan sonra üzeri dolgu malzemesi ile kaplanır. Ayrıca boru çapının üç katı veya daha fazla genişlikteki hendeklere gömülen borular da dolgu tipi boru döşeme sınıfına girer. Negatif projeksiyonlu boru döşeme yönteminde ise, pozitif projeksiyonlu boru döşeme yönteminde olduğu gibi hendek derinliği sığdır. Ancak aradaki fark ise boru üst seviyesinin doğal zemin üst seviyesinin altında kalmasıdır. Boru yataklandıktan sonra boru üstü geri dolgu malzemesi ile doldurulur (Spangler, 1966).

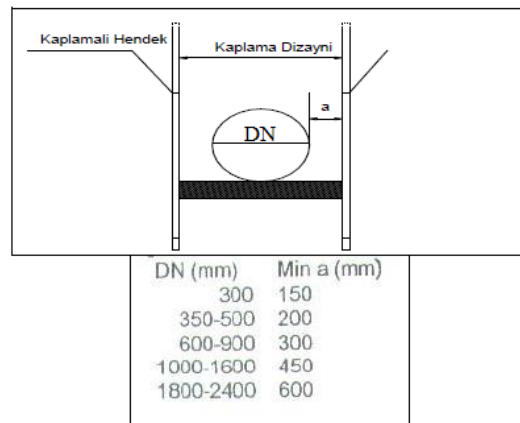
Gömme derinliğinin fazla olması gerektiği durumlarda alternatif döşeme yöntemleri uygulanabilir. Bunlar daha derin hendek olması durumu, beton gibi malzeme ile kalıcı gömme durumu ve çimento ile bağlayıcılık kazandırılmış geri dolgu malzemesi olması durumlarıdır (ASTM D2487, 2009).

2.4.1.1. Özel Boru Döşeme Metotları

Alternatif döşeme yöntemlerinden biri olan boru hendekinin yeterince derin olmasının sağlanması yöntemi, daha derin ve geniş boru döşemesine olanak sağlayacak ve ekstra basınçlara daha fazla mukavemet sağlayacak şekilde doğal zemininin vakumlama işlemi ile borudan uzaklaştırma işlemidir. Özellikle gevşek, zayıf zeminlerde uygulanması tavsiye edilmektedir.

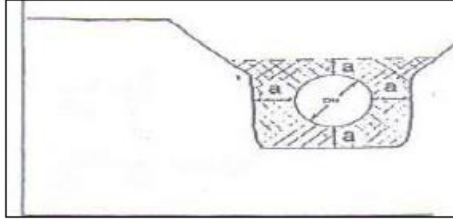
Hendek kaplama yönteminde ise Şekil 2.9’da gösterildiği gibi borunun maruz kaldığı yükü aktardığı yan dolgu mesafelerinin yatayda yeterli uzunlukta ve borunun hizmet ömrünün uzun olmasını sağlayacak şekilde olması gerekir. Geri dolgu ve minimum dolgu yükseklikleri standart döşeme koşulları ile aynı şekilde yapılır. Kalıcı yataklama, standart yataklama olarak da düşünülebilir (ASTM D2487, 2009).

Çimento kullanılarak yapılan boru döşeme yönteminde ise kum zemine yaklaşık olarak %5 oranında eklenerek elde edilen malzemenin geri dolgu malzemesi olarak kullanılmalıdır. Kullanılan kumun %15’inden fazlası 200 nolu elekten geçmemelidir. Kum ve çimento karışımı olan geri dolgu malzemesinin 7 günlük basınç dayanımı yaklaşık olarak 700-1400 kPa aralığında olmalıdır ve kullanılmaya başlamadan önce 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Borunun yastık, yan dolgu ve ilk dolgu kısımları Şekil 2.10’da gösterildiği gibi stabilitesi sağlanmış geri dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır. Boru geri dolgu yüksekliği en fazla 5 m olmalıdır. Geri dolgu malzemesi 15-20 cm tabakalar halinde ve %90 Standart Proktor Yoğunlukta olacak şekilde uygulanmalıdır (ASTM D2487, 2009).



Şekil 2.9. Kaplamalı hendek yöntemi

Kaynak: (ASTM D2487, 2009).

	DN (mm)	Min a (mm)
	300-500	200
	600-800	300
	900-1200	400
	1400-1800	500
2000-2400	600	

Şekil 2.10. Çimento katkılı dolgu malzemesi uygulama şekli (DN: Nominal Çap)

Kaynak: (ASTM D2487, 2009)

2.4.1.2. Atık Su Arıtma Tesislerinde ve Deşarj Boru Hatlarında Döşeme Metotları

Bu döşeme metodu, atık su arıtma tesislerinde deniz suyuna gereksinim duyulduğu, kanalizasyon ve yağmur suyu boru hatlarının denize dökülmesinin gerektiği ve nükleer gibi enerji santrallerinde soğutma suyuna ihtiyacın olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Bu tür durumlardaki boru döşeme uygulamalarında boru bağlantı noktalarının montajı çoğunlukla su altında yapılır. Borunun su yüzeyinde yüzdürülmesi, su tabanından aşağı çekilmesi, batırılması veya gemi ile döşenmesi gibi yöntemler su ortamında boru döşeme yöntemleri kapsamına girmektedir. Betonarme, çelik ve plastik kökenli borular, deniz deşarj boru hatlarının döşenmesinde kullanılan boru tipleridir. Boru hattının maliyetini azaltmak için çoğunlukla çelik veya plastik kökenli boru tipleri kullanılmaktadır (Balkaya & Balkaya, 2005).

Boru hattının su altında döşenmesi için açılacak hendek, normal şartlarda açılan hendek uygulaması gibi olup genişliği daha fazladır. Su altında açılan hendeğin minimum genişliği DN+1 m ve ortalama genişliği ise 2xDN olarak hesaplanır. Boru üzerindeki geri dolgunun kalınlığı boru üstünden deniz tabanına kadar ortalama 1 m olmalıdır. Borunun yastık, yan dolgu ve geri dolgu işlemleri borunun stabilitesini sağlayacak şekilde doğru bir biçimde yapılmalıdır. Deniz tabanına gömülen borunun su akıntılarında etkilenmemesi için boru hattı yüzeyinin beton bloklardan oluşan ya da büyük kaya parçaları ile örtülmesi gerekir (Balkaya & Balkaya, 2005).

2.4.1.3. Kazı Yapılmadan Boru Hattının Döşenmesi

Kazı yapılarak boru hattı döşeme uygulaması kullanılan en genel yöntemdir. Günümüz koşullarının değişmesi, projelerin daha da kısa sürede bitirme gereksinimi ve boru hattı maliyetini en aza indirmek gibi sebepler boru hattını döşemenin farklı yollarını bulmaya itmiştir. 1980'li yıllardan itibaren ABD'de kullanılan horizontal directional drilling technology olarak ifade edilen Yönlendirilebilir Yatay Sondaj (YYŞ) sistemi 1990'lı yıllardan itibaren ise

hemen hemen bütün Avrupa’da uygulanmaya başlanmıştır. Türkiye’de ise o zamanlarda karayolu ve demiryolu alt kısımlarına boruyu döşemek için, boru sürme veya itme ya da basit yatay delgi yöntemleri uygulanıyordu. 2000’li yıllarda ise basit yatay delgi yöntemleri yerini YYS sistemine bırakmıştır. YYS sistemi kazı yapmaya gerek kalmadan boru veya kablo sistemlerinin zemine döşenme işlemidir. Bu yöntemde, döşenecek olan borunun konumunun takip edilebilmesinden dolayı, zeminde mevcut olan yapısal sistemlere zarar vermeden boru hattı döşenebilmektedir. Gelişmiş ve ileri bir yöntem olan YYS sistemi, boru hatlarının hem daha ekonomik olarak döşenmesine hem de trafik yoğunluğu olan yerlerde trafiği aksatmadan döşenmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasının amacı maliyeti azaltmak ile birlikte özellikle çevreye zarar vermeden boru hattının döşenmesidir. YYS sistemi, kazı ile boru döşeme uygulamasını, trafik yoğunluğunu, hava ve gürültüyü en aza indirger. Zemin ve yolların kazılması sonucunda oluşan atık malzemenin azalmasını ve derinliğe bağlı kalmadan borunun en uygun bir şekilde gömülmesini sağlamaktadır (Attogroup, 2022).

2.4.2. Depreme Dayanıklı Boru Hattı Tasarımı

Eski zamanlarda gömülü boru hatları tasarımında deprem yükleri hemen hemen hiç dikkate alınmazdı. Yaşanan büyük depremler sonucunda altyapı sistemlerinde meydana gelen büyük hasarlar, gömülü boru hatlarının tasarımında deprem etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymuştur. Üst yapı tasarımı bölgeden bölgeye değişiklik gösterdiği gibi altyapı sistemlerinin özellikle gömülü boru hatlarının tasarımı da değişiklik göstermektedir. Bu kısmın devamında Türk, Amerikan ve Japon Yönetmeliklerinde gömülü boru hatlarının deprem esaslı tasarımı ile ilgili kısımlara değinilmektedir.

2.4.2.1. Türk Yönetmeliği

Ülkemizde gömülü boru hatlarının üretim ve tasarımı ile ilgili TSE’nin hazırlamış olduğu yönetmelikler vardır. Bunlardan bazıları şu şekildedir;

TS-2170/1989 (Su ve gaz borularının yeraltına yerleştirilmesi kuralları)

TS-8054/1990 (Doğal gaz boru hattı-çelik boru donanımı projelendirme kuralları)

TS-8415/1990 (Doğal gaz boru hattı donanımında kullanılan terimler ve tarifler)

Bahsi geçen yönetmelikler genel olarak boruların ortam koşullarına göre imalatı, statik yüklere göre tasarımı gibi hususlara temas etmektedir. Daha sonra hazırlanan “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik/1959” adlı yönetmelikte gömülü boruların deprem koşullarına göre tasarımı hakkında herhangi bir konuya değinilmemiştir.

2007’de hazırlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik’te ve 2018’de hazırlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde de gömülü boruların deprem koşullarına göre tasarımı hakkında kayda değer bilgi mevcut değildir.

2007’de hazırlanan Altyapılar İçin Afet Yönetmeliği’nde içme suyu ve kanalizasyon boru hatlarını kapsayan altyapı sistemlerinin doğal afetlere karşı dayanıklı bir şekilde tasarlanması ve doğru malzeme seçimi gibi konulara değinilmiştir. Ayrıca gömülü boru hatlarının tasarımı ve planlanmasında afet risk analizi ve acil durumlarda neler yapılması gerektiği gibi konulara değinilmiştir. Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’te deprem gibi doğal afet durumlarında performans hedefleri belirtilmiştir (Afet Yönetmeliği, 2009).

Tablo 2.3. Atık Su Tesislerinde Deprem Sonrası Performans Hedefleri

HİZMET KATEGORİSİ	MUHTEMEL DEPREM	MAKSİMUM DEPREM
Yaşam güvenliği	Minimum risk	Minimum risk
Halk sağlığı	Hidrolik akış ve dezenfeksiyon korunur.	Hidrolik akış ve dezenfeksiyon korunur.
Alıcı ortamın korunması (kurak iklim koşullarında)	Sürekli ön arıtma sağlanır. 2 hafta içerisinde arıtma sağlanır	2 hafta içerisinde ön arıtma sağlanır. 2 ay içerisinde arıtma sağlanır
Alıcı ortamın korunması (yağışlı iklim koşullarında)	2 hafta içerisinde ön arıtma sağlanır	6 ay içerisinde ön arıtma sağlanır

Kaynak: (Afet Yönetmeliği, 2009)

Tablo 2.4. İçme ve Kullanma Suyu Tesislerinde Deprem Sonrası Performans Hedefleri

HİZMET KATEGORİSİ	MUHTEMEL DEPREM	MAKSİMUM DEPREM
Yaşam güvenliği	Minimum risk	Minimum risk
Yangın söndürme	Tüm alanlarda hizmet mevcuttur.	Hasarlı durumdaki sınırlı alanların vana ile kapatılmasından sonra rezervuarların %70’i kullanılabilir durumdadır.
Kritik hizmet İçme suyu ve halk sağlığı	Kış talep oranlarında tüm alanlara sürekli tam hizmet sağlanır.	Servis alanının %70’ine, kış talep miktarının %70’i oranında hizmet verilir. Merkezi yerlerde 72 saat içerisinde içme suyu temin edilir. Kaynama suyu emri istenebilir. Açıkta su temin edilmez.
Evsel, ticari ve endüstriyel kaynak	Su kalitesi korunur.	7 gün içerisinde birkaç alana kış talep oranlarında tam hizmet verilir. 1 ay içerisinde tüm bölgeye kış talep oranlarında tam hizmet verilir.

Kaynak: (Afet Yönetmeliği, 2009)

Yönetmelikte, yapı-zemin etkileşimi kapsamında hem arazi hem de laboratuvar deneyleri yapılarak borunun gömüleceği doğal zeminin fiziksel, mekanik ve sismik geoteknik

parametreleri belirlenerek gömülü boru tasarımında göz önünde bulundurulmak üzere zemin etüt raporunun hazırlanması gerektiği ifade edilmektedir.

Ayrıca aşağıda belirtilen hususlarında zemin etüt raporunda bulunması gerekmektedir (Süperlit, 2008, Afet Yönetmeliği, 2009).

- Gömülü boru hattının uygulanacağı bölgenin deprem gibi doğal afet riski taşınması durumunda, boru hattının güvenliği açısından risk azaltıcı tedbirlerin belirlenmesi
- Gömülü boru hattının uygulanacağı bölgenin afet tehlike ve risk analizinin ilgili kurumlarca yapılmış olması ve bu risklerin ifade edildiği haritaların hazırlanması
- Elde edilen bilgiler doğrultusunda alternatif boru hatlarının belirlenmesi
- Alternatif boru hattı yoksa zemin iyileştirme yöntemleri ile alternatif hatların olabilirliğinin güvenlik ve maliyet açısından karşılaştırılmasının yapılması
- Gömülü boru hattı güzergahı esas olacak şekilde yaklaşık 200 km çaplı bir alan göz önünde bulundurularak bölgenin depremsellik ve sismik risk analizlerinin yapılması suretiyle olası depremin büyüklüğü ve şiddeti gibi parametreler hakkında değerlendirmelerin yapılması

Bunlara ek olarak afet riski taşıyan bölgelerde kullanılacak olan boru hatları ve bağlantı kısımları ile alakalı hususlarında ilgili yönetmelikte yer alması gerekmektedir. Altyapılar İçin Afet Yönetmeliğine bakıldığında, geçmişe kıyasla, gömülü boru hatlarının tasarımında deprem gibi doğal afet parametrelerinin de göz önünde bulundurulduğu görülmektedir.

2.4.2.2. Amerikan Yönetmeliği

ABD’de gömülü borular ile alakalı AWWA (American Water Works Association), API (American Petroleum Institute), ASCE (American Society of Civil Engineers), ASME (American Society of Mechanical Engineers), ANSI (American National Standard Institute) gibi yönetmelikler mevcuttur.

American Lifelines Alliance (ALA) için FEMA (Federal Emergency Management Agency) ve ASCE kuruluşları beraber bir yönetmelik hazırlamışlardır. Bu yönetmelikte gömülü boruların maruz kalabilecekleri farklı yüklere değinilmiş ve bu yüklere karşı gömülü boru hattının tasarımının nasıl olması gerektiğine değinilmiştir. Bu yönetmelikte borunun iç basıncı, zeminden dolayı oluşan düşey yükler, trafik gibi hareketli yüzey yükleri, yer altı su seviyesi (YASS) etkisi, boru ve zeminin göreceli yer değiştirmesi, deprem yükleri, sıvılaşma, boru

hatlarında ya da yakınlarında olabilecek patlamalar gibi durumlar göz önünde bulundurulmuştur. Yönetmeliğin deprem ile ilgili kısmında, meydana gelen deprem kaynaklı oluşan dalga yayılımından dolayı şekil değiştirmelerin olduğu boru hatlarının tasarım ilkelerine değinilmiştir (ALA, 2008).

Depremden sonra meydana gelen kalıcı yer değiştirme (KYD) ve boru hattı şekil değiştirme analizi sonlu elemanlar programlarıyla hesaplanabilmektedir (Şendir, 2005).

2.4.2.3. Japon Yönetmeliği

Japonya'da 1995 yılında meydana gelen Hyokogen-Nanbu depreminden dolayı gömülü boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Bu depremden elde edilen gözlemler sonucunda gömülü boru harlarının depreme dayanıklı bir şekilde tasarlanması gerektiği düşünülmüştür. Bu sebepten dolayı yetkililer ve mühendisler, gömülü boruların depreme dayanıklı tasarımını konu alan yönetmeliklerin hazırlanması gerektiğini ifade etmişlerdir (JSCE, 2001).

Japonlar, deprem hareketlerinin sebep olduğu geçici yer değiştirme ve kalıcı yer değiştirme durumlarına göre çalışmalarını yapmışlardır. Tasarım olarak şekil değiştirmeyi esas almışlar ve depremin sebep olacağı muhtemel şekil değiştirmelerin elastik şekil değiştirme limitini aşmasına izin vermişlerdir. Gömülü boruların, düz bölgelerinde ve bağlantı noktalarında oluşan deformasyonların deprem kaynaklı zemin hareketlerinden dolayı boruda oluşan aşırı kuvvetlerden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Zemin hareketlerinin üniform olması veya olmaması durumları ayrı ayrı ele alınmaktadır. Sonuç olarak, depremden dolayı borularda meydana gelecek olan deformasyonların sınırları aşmaması istenmektedir (Hamada, 2002).

İlgili yönetmelikte, şekil değiştirmeleri ifade eden bir kısım formüllere değinilmiştir.

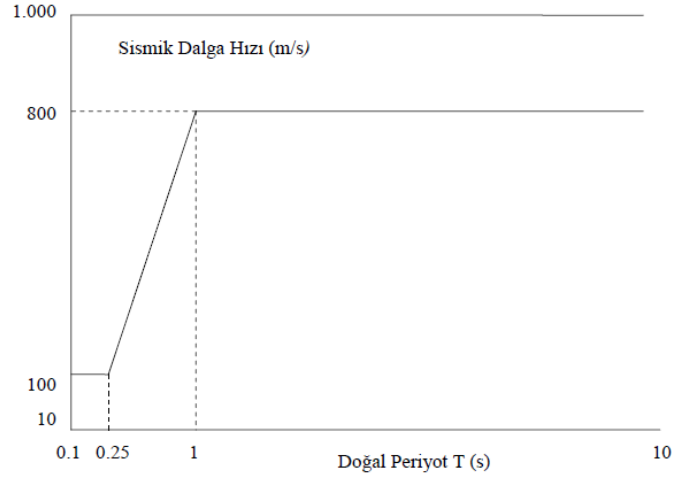
Üniform hareket eden bir zeminin şekil değiştirmesi 2.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{G1} = \frac{2\pi \cdot U_h}{L} \quad (2.1)$$

Bu denklemdeki L dalga boyunu ifade etmektedir ve denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$L = V \cdot T \quad (2.2)$$

Sismik dalga hızı (V) ve zeminin doğal periyodu (T) arasındaki denklem Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Sismik dalga hızı

Kaynak: (JSCE, 2001)

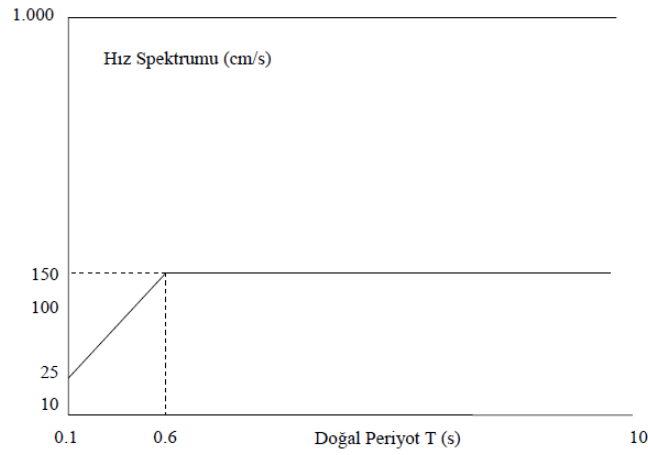
U_h zemin yer değiştirmesini ifade etmektedir ve denklem 2.3 ile hesaplanmaktadır.

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} * T * S_v * K_{oh} * \cos\left(\frac{\pi * z}{2H}\right) \quad (2.3)$$

z: boru gömme derinliği (m)

T: Zeminin doğal periyodu (s)

S_v : Spektral hız (cm/s)



Şekil 2.12. Hız spektrumu

Kaynak: (JSCE, 2001)

$$K_{oh} = 0.15 * v_1 * v_2 \quad (2.4)$$

v_1 : Önem katsayısı (Gömülü borular için şehir içi yollarda 1, diğer yerlerde 0.8)

v_2 : Sismik bölge katsayısı

Tablo 2.5. Sismik bölge katsayısı

Bölge Sınıflandırması	Özel A Bölgesi	A Bölgesi	B veya C Bölgesi
Sismik Bölge Katsayısı (v_2)	1.0	0.8	0.7

Kaynak: (JSCE, 2001)

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (2.5)$$

$$V_s = \frac{\sum V_{s1} * H_1}{H} \quad (2.6)$$

H: Yüzey tabakasının derinliği (m)

V_s : Kayma dalgası hızı (m/s)

Yüzey tabakasının derinliğini ifade eden H değeri, SPT değerinin 50 ve 50'den büyük veya kayma dalgası hızının 300 m/s 'den büyük olduğu andaki derinliktir.

Eğer ana kaya gömülü boru hattının geçtiği bölgede eğimli olursa, zeminin deformasyonu denklem 2.7 ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{G2} = \sqrt{(\varepsilon_{G1})^2 + (\varepsilon_{G3})^2} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{G3} = K * \frac{K_{oh}}{V_s} * \tan\theta * \cos\frac{\pi * z}{2H} \quad (2.8)$$

ε_{G3} : İki farklı noktanın göreceli yer değiştirmesi sonucunda meydana gelen şekil değiştirme

K: Zeminin doğal periyoduna bağlı katsayı

$$T < 0.3 \text{ s ise } K = 405 * T$$

$$T \geq 0.3 \text{ s ise } K = 122$$

θ : Ana kayanın eğim açısı

Zeminin deformasyonu hesaplandıktan sonra, bu deformasyonun gömülü boruda oluşturduğu deformasyon zeminin üniform olması durumunda denklem (2.9) ile eğimli kaya olması durumunda ise denklem (2.10) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Üniform zemin} \quad \varepsilon_{v1} = \alpha * \varepsilon_{G1} \quad (2.9)$$

$$\text{Eğimli ana kaya} \quad \varepsilon_{v3} = \alpha * \varepsilon_{G3} \quad (2.10)$$

Şekil değiştirme transfer katsayısı olan α , denklem (2.11) ile hesaplanır.

$$\alpha = q * \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 * L}\right)^2} = q * \alpha_0 \quad (2.11)$$

q: Boru ile zemin arasında mevcut olan kayma azaltma katsayısı

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \quad (2.12)$$

K_1 :Eksenel yönde zemin yatak katsayısı

Gömülü boruların kaynak olan kısımlarında (2.9) ile (2.10) denklemlerinde verilen ifadelerin iki katı dikkate alınır. İlgili yönetmelikte gömülü borunun düz bölgelerinde izin verilen deformasyon, denklem (2.13) ile (2.14) arasından kk olan değer dikkate alınır. Güvenlik katsayısı 1.25 olarak alınmaktadır.

$$\varepsilon = 0.01 \quad (2.13)$$

$$\varepsilon = \frac{4 * t * n}{3 * (D - t)} \quad (2.14)$$

t: boru et kalınlığı (cm)

D: Boru dış çapı (cm)

n: 0.11

Yönetmelikte ayrıca su ihtiyaçlarının giderilmesi kapsamında, anti-sismik önlemlerin geliştirilmesinden önce şu hususlara dikkat edilmesi gerektiği ifade edilmektedir.

- Deprem olduktan sonra meydana gelebilecek hasar tahminlerinin ve buna bağlı olarak alınması gereken tedbirlerin olması gerektiği
- Deprem olduktan hemen sonra acil nlem planlarının ve afeti önlemek için onarım planlarının olması gerektiği
- Depremden sonra kalıcı hasarların onarılması planlarının olması gerektiği

Yönetmeliğe göre planlama, tasarım ve bunlara bağlı olarak uygulamalarla alakalı; farklı koşullardaki depremlere göre yeteri kadar dikkat edilmelidir. Projelendirme yapılırken çok önem arz eden altyapı tesislerine ayrıca dikkat etmek gerekir. Deprem sonrasında içme suyu gibi hizmetlerin kesintiye uğramaması için alınabilecek önlemlerin mevcut olduğu yönetmeliklerin iyileştirilmesi gerekmektedir (JSCE, 2001).

2.5. Sonuç

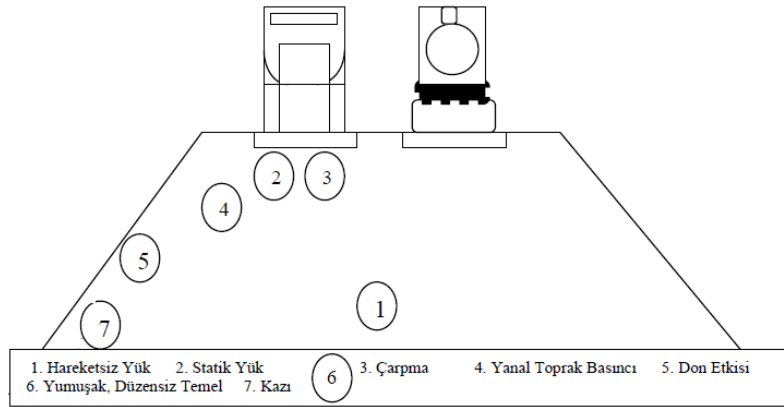
Gömülü boru hatlarını da kapsayan altyapı sistemleri kırsal ve şehir hayatının sürekliliği açısından vazgeçilmez mühendislik yapılarıdır. Gömülü boru hatları içme suyu, atık su ve enerji gibi gereksinimlerin kaynaktan kullanım alanına iletilmesinde kullanılan yapılardır. Boru hatları eski zamanlardan günümüze kadar varlığını sürdürmüştür. Borular ihtiyaca göre hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Beton, çelik ve plastik kökenli borular en çok kullanılan boru tipleridir. Gömülü borular yapıldığı malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirence göre rijit ve esnek borular olmak üzere iki kısma ayrılır. Gömülü boru hatları tasarlanırken zemin koşulları ve borunun rijit ya da esnek olması en önde gelen parametrelerdir. Boruların maruz kaldığı yüklere göre verdiği tepkiler borunun cinsine göre değişiklik göstermektedir. Borunun yapıldığı malzemenin cinsine göre belli deformasyon sınırları vardır. Bu sınırlar aşıldığında çok büyük hasarlar meydana gelir. Gömülü boruların uğrayabilecekleri hasarları en aza indirmek için, borunun uygun bir şekilde yataklanması ve gömülmesi gerekmektedir. Borular döşenirken borunun rijitliği, hendek derinliği, doğal zemin koşulları ve geri dolgu malzemesin özellikleri önemi olan parametrelerdir. Ayrıca boru hatları döşenirken zemin koşullarına göre döşeme yöntemi değişebilmektedir. Depreme dayanıklı boru hatlarının tasarımında Türk, Amerika ve Japon deprem yönetmelikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Bu kapsamda deprem esaslı boru hattı tasarımında performans hedefleri, risk analizleri, hasar oranları, depremsellik durumu, zemin boru etkileşimi gibi parametreler esas alınmaktadır.

3. GÖMÜLÜ BORU HATLARI ÜZERİNE ETKİYEN YÜKLER

3.1. Giriş

Gömülü boruların maruz kaldığı yükler genel olarak sabit ve değişken yükler olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Sabit yükler, borunun üzerindeki geri dolgu malzemesinin ağırlığından kaynaklanan yüklerdir. Değişken yükler ise her zaman olmayan yüklerdir. Yol, trafik veya üst yapıdan kaynaklanan yükler değişken yükler grubuna girmektedir (C.P. & L.P., 2003).

Boru hatlarına hem iç hem de dış basınçlar etki eder. İç basınç, borunun içinde iletilen sıvı ya da gaz maddenin hareketinden dolayı boruya uyguladığı basınçtır. Dış basınç ise borunun gömülü olduğu ortam şartlarından kaynaklanan basınçları kapsar. Bu sebepten dolayı borular tasarlanırken borunun maruz kalacağı basınçlar göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 3.1’de borunun maruz kalabileceği basınçlar gösterilmektedir (Moser, 2001).



Şekil 3.1. Borunun maruz kaldığı yükler ve basınçlar

Kaynak: (Moser, 2001)

Boru hatlarının maruz kaldığı sabit ve değişken yükleri kapsayan dış yüklerin hesaplanması özellikle son zamanlarda çok araştırılmıştır. Borunun maruz kaldığı sabit yüklerden dolayı boru ve zemin etkileşimi sonucu, geri dolgu malzemesinde kemerlenme olduğu görülmüştür. Zeminin, kayma direncinin etkisiyle, borunun maruz kaldığı geri dolgu yükünün bir miktarını hendek kenarlarına ve tabanına aktarması olayına kemerlenme denir. Gömülü boruların maruz kaldığı yüklerin hesaplanması kapsamında ilk çalışmaları olan Marston ve Spangler Yük Kabulleri yapılan analiz ve deneyler neticesinde belirlenmiştir. Yapılan bu kabuller doğrultusunda zemin ve boru etkileşiminin gömülü olan borunun davranışı üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır (Moser, 2001).

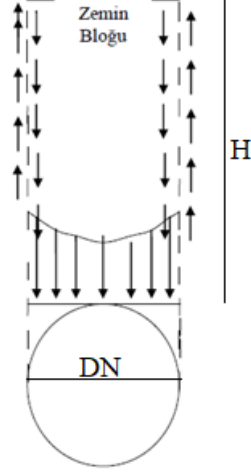
Zemin ve boru etkileşiminin deprem gibi dinamik yüklere karşı davranışını anlamak için farklı farklı analiz yöntemleri ve modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu analiz ve yöntemler ile gömülü borular gibi altyapı sistemlerinin davranışının üstyapı sistemlerinden çok farklı olduğu görülmüştür. Deprem hareketleri zemin ve boruların davranışında, zemin ortamının farklılık göstermesinden dolayı, değişiklik göstermektedir (Moser, 2001).

Kalıcı ve geçici yer değiştirmelerin sebep olabileceği hasarlara bu bölümde değinilecektir.

3.2. Boruların Maruz Kaldığı Yüklerin Tanımlanması

Boruların zemin ve trafik yüklerinden dolayı boruda oluşan basınçlara karşı davranışı, borunun deformasyon potansiyeline ve boruyu çevreleyen geri dolgu malzemesinin rijitlik özelliklerine bağlıdır. Boru maruz kaldığı yükler altında, rijitlik özelliklerine bağlı olarak, kalın bir halka gibi davranış sergiler. Zemin ve boru etkileşimi sonucunda, boru kesitinde, boru alt tabanı ve üst kısımlarında yüksek zemin basınçları oluşur. Borunun orta kısımlarında ise daha düşük basınçlar oluşur. Plastik malzeme kökenli esnek borular yatay doğrultuda, borunun yan dolgularına doğru deformasyon yönelimleri vardır. Bu sebepten dolayı yan dolgulara pasif toprak basınçları meydana gelir. Bu durum borunun maruz kaldığı yüklere karşı performansını olumlu yönde etkiler. Bu durumun bir sonucu olarak, esnek bir boruyu çevreleyen zemin basınçları rijit borulara kıyasla daha üniform dağılım gösterirler (Bull, 1994, Yüzügüllü & Birgören, 2003).

Borunun maruz kaldığı zemin yükü (W_c), yüksekliği boru gömme derinliği (H) ve genişliği boru dış çapı (DN) olan dikdörtgen prizmanın ağırlığına eşittir (Şekil 3.2). Boruya etki eden trafik yükü (W_L) ise gömme derinliği az olan borular için kamyon, tren ve diğer araçların tekerlek yükleri önem arz etmektedir. Taşıt yüklerinden dolayı boruda oluşan basınç taşıt ağırlığı, lastiğin hava basıncı miktarı, lastik boyutları, yüzeyin pürüzlü olma durumu, yol kaplamasının cinsi ve kalınlığı, zemin birim hacim ağırlığı ve gömülü borunun taşıt tekerlek yüküne olan uzaklığı gibi parametrelere bağlıdır (Süperlit, 2008).



Şekil 3.2. Boruya etkiyen geri dolgu yükünün dağılımı

Kaynak: (C.P. & L.P., 2003)

Borunun kesitinde oluşan eğilme veya kırılma, borunun uzunluğu doğrultusunda eğilmelerin meydana gelmesi ve borunun burkulmaya uğraması gibi sıkıntılar borunun maruz kaldığı fazla yükler sonucunda göçme oluşabilir. Ancak dış yüklerden kaynaklı gömülü boru hatlarında kırılmaların oluşması nadiren meydana gelir. Meydana gelen göçme gibi problemlerin birçoğu inşaatın hatalı yapılması, borunun gerçekte maruz kaldığı yüklerin proje yüklerine göre daha çok olması, borunun tabanındaki temel ve yastık malzemesinin oturması gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Bu gibi problemlerin yaşanmaması için gömülü boru hattının ortam koşullarına göre uygun boru cinsi seçmek, zemin yükü ve hareketli yükleri doğru hesaplamak, uygun yataklama malzemesini seçmek, yük faktörünü doğru belirlemek, güvenlik faktörünü hesaba katmak ve uygun boru rijitliğini seçmek gerekmektedir (Moser, 2001).

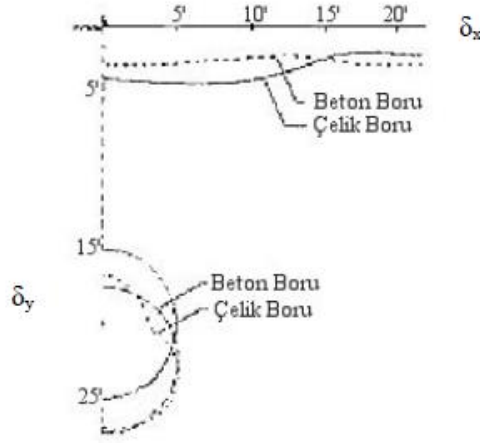
3.3. Boruya Etki Eden Dış Yükler ve Dış Yükleri Etkileyen Durumlar

Gömülü boruların maruz kaldığı dış yükler, gösterildiği gibi borunun üzerindeki geri dolgunun ağırlığı (Şekil 3.2), boru ve aparatlarının kendi ağırlıkları, trafik gibi hareketli yüklerin oluşturduğu yüklerden kaynaklanır. Boruyu çevreleyen zemin özellikleri, geri dolgu yüksekliği, borunun gömüldüğü hendeğin genişliği ve derinliği gibi faktörler boruya etki eden dış yüklerin birer fonksiyonudur. Bu bakımdan, borunun maruz kaldığı dış yüklerin hesaplanmasında boru ve yataklama malzemesi arasındaki etkileşim, geri dolgu yüksekliği, borunun gömülme koşulları, borunun çap, şekil ve yapıldığı malzemenin özellikleri gibi parametreleri göz önünde bulundurmak gerekir (Uslu, 1979, Moser, 2001).

Borunun üzerindeki geri dolgudan dolayı boruya aktarılan yük, zemin ve boru arasındaki etkileşime bağlıdır. Boruya etkileyen yük, boru ve zemin arasındaki etkileşime bağlı olarak dikdörtgen prizmanın ağırlığından daha az olmaktadır. Bunun nedeni ise geri dolgu malzemesinin kendi içindeki kayma direnci etkisiyle yükün bir kısmını yan dolgu ve boru tabanına aktarmasıdır. Bu yük aktarımına kemerlenme denir. Dikdörtgen prizma yükünün gömülü olan boruya düzgün bir şekilde aktarılabilmesi için, teorik olarak boru ve borunun etrafındaki zemin rijitliklerinin aynı olması istenmektedir. Boru ve etrafındaki zeminin rijitliklerinin birbirine eşit olması gerçekte mümkün olmadığı için boruya etki edecek yük boru ve zeminin bağıl rijitliklerine göre değişmektedir. Borunun rijitliği, PVC kökenli esnek borularda olduğu gibi, borunun etrafındaki zemin malzemesinin rijitliğinden daha az olması durumunda yükün yarısında fazlasını yan dolgular taşır. Eğer borunun rijitliği, betonarme veya çelik borularda olduğu gibi, zeminin rijitliğinden fazla olursa yükün yarısından fazlasını boru taşır. Prizma yükü ve boruya etki eden yük arasındaki fark kemerlenme olarak ortaya çıkar. Borunun (rijit) maruz kaldığı yük yan dolgu yüklerinden daha büyük ise negatif kemerlenme, borunun (esnek) maruz kaldığı yük yan dolgu yüklerinden az ise pozitif kemerlenme oluşur (Bulson, 1985).

Farklı boruların maruz kaldıkları yükler altındaki deformasyon davranışları zemin ve boru arasındaki etkileşim durumunu etkiler ve buna bağlı olarak kemerlenme durumunda değişik davranışlar ortaya çıkar (Şekil 3.3) (Bulson, 1985).

Borunun rijitliğinin zeminini rijitliğine oranı, borunun maruz kaldığı basıncın büyüklüğünü ifade eder. Bundan dolayı, gömülü boruların tasarımında, boru ve boruyu çevreleyecek olan zeminin bir arada ele alınması gerekir. Bu zemin-yapı etkileşimi olarak ifade edilmektedir. Eğer boru zemine göre çok fazla rijit ise boru aşırı basınca maruz kalır.



Şekil 3.3. Farklı boruların deformasyon şekilleri

Kaynak: (Sağlamer & Balkaya, 2003)

3.4. Marston ve Spangler Teorilerine Göre Dış Yüklerin Hesaplanması

3.4.1. Marston Yük Teorisi

Marston 1930 senesinde laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçlarına dayanarak gömülü boruların tasarımı ile alakalı kemerlenme durumunu da hesaba katan bir çalışma yayınladı. Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği (ASCE) dergisinde çıkan bu çalışma çok kişi tarafından beğeni gördü. Marston'un çalışmasının temeli boru ve boruyu çevreleyen zeminin rijitlikleri farklılığa dayanmaktadır (Ren-Peng, Yun-Min , & Dao-Shen, 2000).

Marston, boruyu çevreleyen geri dolgu zemininin deformasyona uğramamış hendek duvarı ile sürtünmesi sonucu etkileşim içinde olduğunu ileri sürdü. Marston eşitliğine göre, esnek bir boru hendek genişliği boru çapının iki katından daha küçük olan bir hendeğe döşenirse boruya etki eden yük denklem (3.1) ile hesaplanabilmektedir.

$$W = C_D * \gamma * B_d * B_c \quad (3.1)$$

Burada

C_D : Hendek yük katsayısı (birimsiz)

B_d : Borunun üst kısmındaki hendek genişliği (m)

B_c : Boru dış çapı (m)

γ : Dolgu zeminine ait birim hacim ağırlığı (kN/m^3)

W : Boruya etki eden dolgu yükü (kN/m)

$$C_D = \frac{1 - e^{\left(\frac{-2 * K * u' * H_c}{Bd}\right)}}{2 * K * u'} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2) deki

e: Doğal logaritma tabanı

u': Dolgu zemini ve hendek arasındaki sürtünme katsayısı

K: Rankine aktif yanal toprak basınç katsayısı

$$K = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.3)$$

ϕ : İçsel sürtünme açısı

3.4.2. Spangler Yük Teorisi

Hendek yöntemi ile gömülen esnek borunun, boruyu çevreleyen zemin ile etkileşiminden dolayı oluşan deformasyonu hakkındaki ilk çalışma Spangler tarafından yapılmıştır. Spangler 1941 senesinde, yüke maruz kalan esnek bir borunun deformasyon oranının, boruya etki eden yüke (P), geri dolgu malzemesinden dolayı borunun yan kısımlarına olan pasif basıncına ve borunun elastisite modülüne (E_{boru}) bağlı olduğunu ifade etmiş ve bunu Iowa eşitliği denkleminde ortaya koymuştur. Spangler, Iowa Eşitliğinde bu üç temel parametreyi dikkate almıştır (Masada, 2000).

$$\Delta_x = \Delta_y = \frac{D_L * W_C * K * r^3}{EI + 0.061 * e * r^4} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te

D_L : Deformasyon gecikme faktörü

K: Yataklama katsayısı (birimsiz)

W_C : Birim uzunlukta boruya etki eden yük (kN/m)

r: Ortalama boru yarıçapı (m)

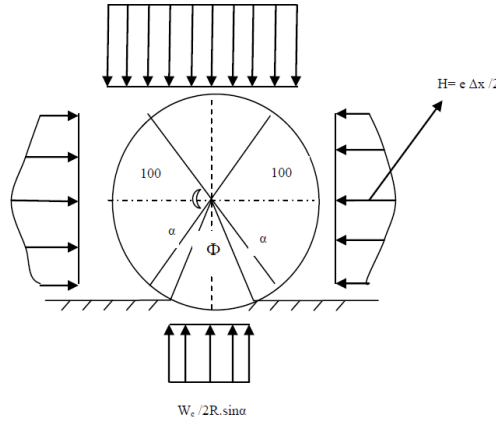
E: Borunun elastisite modülü (kPa)

I: Eylemsizlik momenti (m^4/m)

e: Yan dolgudan kaynaklı pasif direnç ($kN/m^2/m$)

Δ_x : Yatay deformasyon veya çaptaki değişim (m)

Spangler, Iowa eşitliğini hendeğe gömülmüş esnek boruların davranışını esas alarak elde etmiştir. Spanglerin savunduğu teoriye göre boru kesitinin farklı noktalarının yanal deformasyonları bilinirse ve o noktadaki pasif direnç modülü (e) ile çarpılması sonucunda yanal basınç diyagramları elde edilebilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Spangler teorisine göre yük dağılımı

Kaynak (C.P. & L.P., 2003)

Matematiksel olarak doğru ifade edilebilmesi yönünden yanal basınç, borunun orta bölgesinde 100° bir daire kesitini saran parabolik eğri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca düşey yükün üniform olarak dağılım gösterdiği, zemin tepkisinin düşey yönde etki eden yüke eşit olduğu ve üniform olarak boru tabanı boyunca dağılım gösterdiği kabul edilmiştir (C.P. & L.P., 2003).

1955 yılında Spangler ve Dr. R. K. Watkins zemin tepki modülü için E' ifadesinin kullanılmasını tercih etmişlerdir. Bunun sebebini ise pasif direnç modülü olan e değerinin gerçeği yansıtmadığını olarak açıklamışlardır.

$$E' = e \cdot r \quad (3.5)$$

Bu sebepten dolayı Iowa eşitliği, günümüzdeki ifadesiyle, şu şekilde son halini almıştır.

$$\Delta_x = \frac{D_L \cdot W_c \cdot K \cdot r^3}{EI + 0.061 \cdot E' \cdot r^3} \quad (3.6)$$

E' : Zemin tepki modülü (kPa)

$D_L \cdot W_c \cdot K$ yük faktörünü, EI/r^3 halka sıklık faktörünü ve $0.061E'$ ise zemin sıklık faktörünü ifade etmektedir. Bu ifadelerle göre Iowa denklemini tekrar düzenleyecek olursak boru deformasyonunu etkileyen üç ana parametre şeklinde tanımlanmış olur (3.7).

$$\text{Toplam yatay deformasyon} = (\text{Yük faktörü}) / (\text{Halka sıklık faktörü} + \text{Zemin sıklık faktörü}) \quad (3.7)$$

3.5. Boru Zemin Etkileşimi ve Depreme göre Modellenmesi

Gömülü boru hatlarının uzunluklarının fazla olması ve hat uzunluğu boyunca zemin özellikleri yerden yere değişiklik gösterebileceği için boru-zemin etkileşiminin zemin koşullarının farklılık gösterdiği her bölge için ayrı ayrı ele alınması ve buna göre boru tasarımının yapılması gerekmektedir. Bu durum projenin hazırlanmasını ve uygulanabilirliğini hem ekonomik hem de işçilik açısından zor hale getirecektir. Bu sebepten dolayı gömülü boru hatlarının tasarımında en kötü zemin koşulları göz önünde bulundurulmalıdır. Gömülü boruların kendisini çevreleyen zemin ile etkileşimini etkileyen en önemli parametre, zemine gömülen borunun rijitlik parametresidir. Sonuç olarak gömülü borular gibi yer altına gömülen yapısal elemanların kendilerini çevreleyen zemin ile etkileşimi, yapısal elemanın rijitliğine ve boyutuna, zemin ortamının rijitliğine ve statik veya dinamik yükler gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Gömülü borunun zemine yerleştirildikten sonra yapacağı deformasyonda yapı-zemin rijitliğinin önemi büyüktür (Unutmaz , Çetin, & Gökyay, 2008).

Boru-zemin arasındaki etkileşim, gömülü borunun davranışını önemli derece etkilemektedir. Boru-zemin etkileşimi değişen ortam koşullarından dolayı statik olarak süreksizdir. Yani, yataklama malzemesi ile boru arasındaki yük aktarımı ve basınç dağılımını her iki malzemenin rijitlik parametresini göz önünde bulundurmadan statik olarak hesaplamak çok zordur. Dolayısıyla boru ile zemin rijitliği arasındaki bağıntı boruya etki eden basıncı etkileyen en önemli parametredir. Örneğin rijit bir boruya etki eden basınç aynı koşullar altında esnek bir boruya etki eden basınçtan fazladır. Gömülü boru hattının hizmet ömrünün uzun olabilmesi borunun gömüldüğü zemin ortamında stabil olmasına bağlıdır. Bu sebepten dolayı boru yastık malzemesinin boru hattı boyunca farklı oturmaları önleyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca boru yastık, yan dolgu ve geri dolgu malzemesinin sıkılıklarının aynı olması borunun stabilitesi açısından önemlidir. Borunun üniform yerleştirilmesi ve geri dolgu malzemesinin uygun bir şekilde sıkıştırılması, basınçların üniform dağılması açısından oldukça önemlidir. Boru ve zemin özellikleri, hendek ortamı koşullarına göre boru yerleştirme yöntemleri farklılık gösterir (Moser, 2001).

Deprem gibi doğal afetlerin gömülü boru hatlarında sebep olduğu büyük hasarlar içme suyu ve kanalizasyon hatları, ulaşım ve iletişim gibi hizmetlerin kullanımını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı, gömülü boru hatları gibi altyapı sistemlerinin deprem yüklerine göre davranışları bilim insanları tarafından araştırma konusu olmuştur (Datta, 1999).

Boru-zemin etkileşiminin matematik modelinin oluşturulması dışında bazı sayısal yaklaşımlar ile basitleştirmeler, idealleştirmeler ve kabuller yapılmıştır. Gömülü boru hattı boyunca zemin ortamının değişkenlik göstermesinden dolayı bazı kabuller yapılarak çalışmalar yapılmaktadır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Sayısal modeller ve yapılan kabuller

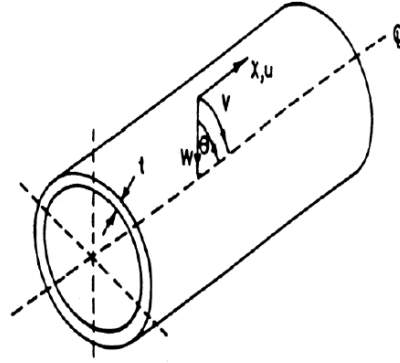
	Yapılan Kabuller
Zemin	Zemin tabakasının idealleştirilmesi (Elastik, viskoelatik vb..) Homojen veya yatay tabaka Sönüm Cinsi Zemin Sabitleri
Ara Yüz	Mükemmel Sınırlar
Sayısal Hesaplamalar	İki Boyutlu veya pseudo-üç eksenli analiz Zemin Tabakası veya arayüzün ayrılması Sonlu Elemanlar modelinde kullanılan yapay sınırlar Non-lineer zemin için eş doğrusallaştırma

Kaynak: (Miura, 2003)

Yapılan bu kabuller, tasarımı yapılacak depreme dayanıklı gömülü boru hatlarının sayısal modeller oluşturarak analiz yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu durum gömülü boru hattının depreme karşı performansı hakkında önceden fikir vermesi açısından oldukça önemlidir. Modellemeler çok basit, iki veya üç boyutlu şekilde oluşturularak analizler yapılabilmektedir. Analiz modellemeleri, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan oluşturulan model analizleri, yapı-zemin etkileşimi düşünülerek oluşturulan statik analizler, elastik giriş teorisi düşünülerek yapılan dinamik analiz modelleri, yapı-zemin etkileşimi kapsamında shell teorisi düşünülerek oluşturulan analiz modelleri, dinamik düzlem-gerilme analiz modelleri, sonlu elemanlar model analizleri, gömülü boru hatlarında fay hareketi ve zemin sıvılaşmasına göre tepki analizleri şeklinde sıralanabilir. Yaklaşık olarak yapılan analiz modelleri ile zemin özellikleri, temel tipi, temel derinliği, hendek derinliği ve genişliği, boru çapı ve cinsi gibi parametrelerin alt veya üst yapıların depreme karşı performansı üzerindeki etkisi hakkında fikir edinmeyi mümkün kılmaktadır (Datta, 1999).

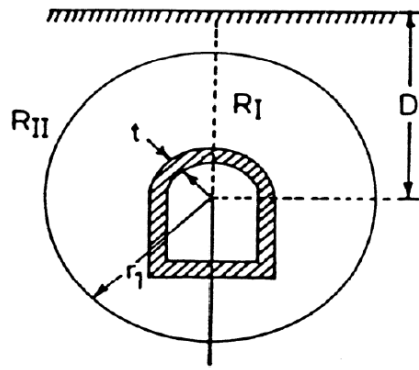
Gömülü borunun ve zeminin rijitliği birbiriyle kıyaslanabildiğinde boru-zemin etkileşimi o zaman önem arz eder. Yani boru ve zemin rijitlikleri arasında aşırı bir fark varsa bu durumun ayrıca göz önünde bulundurulması gerekir. Bu durumda boru-zemin etkileşimi kapsamında dinamik analiz yapmak son derece önemlidir. Gömülü boruların deprem analizi, farklı noktalardaki deprem etkisi ve homojen olmayan non-lineer viskoelastik şartlar altındaki

bulundurularak oluşturulan Shell model yer almaktadır. Ayrıca Şekil 3.8’de yer alan Hybrid model de büyük çaplı gömülü borular için uygulanan modeller arasında yer almaktadır.



Şekil 3.7. Shell modeli

Kaynak: (Datta, 1999)



Şekil 3.8. Hybrid modeli

Kaynak: (Datta, 1999)

Şekil 3.5’teki yay, zeminin rijitliğini simgeler. Zeminin sönüm ve rijitliği, oluşturulan modelde dengeyi ifade eden yaylar ve sönümleyiciler tarafından hesaplanabilir. Şekil 3.7’deki Shell modeli, hem ana eksenin model kesitiyle oluşturduğu açı ile hem de deprem dalgasının etkisiyle borunun boyuna eksenle oluşturduğu açı sayesinde bütün düzlemsel ve boyuna gerilmeleri sağlamış olur. Shell modeli aynı zamanda burkulma probleminin olabileceğini gösterir. Düzlem-gerilme modeli, deprem dalgalarından dolayı dairesel gerilme ve yer değiştirme durumları incelenmek istendiğinde kullanılır. Bu modelde burkulma durumu da incelenebilir. Şekil 3.8’de gösterilen hybrid modeldeki R_I ve R_{II} iç bölgeleri temsil ederken dış bölgeler ise yarı boşluklu sürekli bir ortam olarak sonlu elemanlar ile modellenebilmektedir.

Bu durum düzlem gerilme modelinde ise gerilme ve yer değiştirme açısından sürekli bir ortam oluşturularak modellemeler yapılmaktadır (Datta, 1999).

3.6. Sonuç

Gömülü boru hatlarına sabit ve değişken yükler etki etmektedir. Gömülü borunun maruz kaldığı dış yükler, borunun üstündeki geri dolgu yükü ve trafik yüklerinden dolayı oluşmaktadır. Boruya etki eden yükleri birçok parametre etkilemektedir. Bu parametreler; boru ve yan dolgunun rijitlikleri, dolgunun yüksekliği, yükün türü, boru döşeme koşulları, borunun çapı ve şekli, borunun malzeme özellikleri gibi parametrelerdir ve gömülü boruların tasarımında bu parametreleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Gömülü boruların deformasyon davranışları, maruz kaldıkları yk durumlarına göre değişmektedir. Gömülü boruların maruz kaldıkları yükler daha önceleri Marston ve Spagler'in teorileri göz önünde bulundurularak hesaplanmaktaydı. Bu teriler geliştirilerek günümüzde Iowa eşitliği olarak kabul görmüş ve yükler bu kabule göre hesaplanmaktadır. Gömülü boru hatları gibi yeraltı yapılarındaki yapı-zemin etkileşimi yapının rijitliğine ve boyutlarına, yapıyı çevreleyen dolgu zeminin özelliklerine, statik ve dinamik yük durumlarına göre değişmektedir. Sonuç olarak, gömülü borular gibi yeraltı yapılarının statik ve dinamik yükler altındaki davranışını doğru bir şekilde tahmin etmek için bütün parametreleri göz önünde bulundurarak tasarım yapmak gerekmektedir.

4. DEPREMİN GÖMÜLÜ BORU HATLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE MEYDANA GELEBİLECEK HASARLAR

4.1. Giriş

Geçmişten günümüze kadar yaşanan depremlerden elde edilen bilgi ve gözlemlere dayanarak, özellikle zemin profiline değiştigi bölgelerde, sıvılaşma riskinin yüksek olduğu zayıf zeminlerde, boru hatlarının diğer yapısal elemanlarla bağlantı noktalarında, zeminde büyük yer değıştirmelerinin olduğu fay bölgelerinde, zemin kayma bölgeleri veya geçiş yerlerinde gömülü boru hatlarında hasarların meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte depremden hasar görmeyen ya da az hasar gören gömülü borularda vardır. Örneğin, HDPE borular veya plastik kökenli esnek borular deprem yüklerine karşı eğilme kapasiteleri çok yüksek olduğu için depremden dolayı zeminde meydana gelen yer değıştirmelerine karşı kırılmadan ya da hasar görmeden kalabilmektedirler (Arıman & Muleski , 1981, Sarıkaya & Koyuncu , 1999). Gömülü borular gibi altyapı elemanlarının üstyapı elamanlarına göre depreme karşı daha dayanıklı olduğu düşünülse de, son zamanlarda meydana gelen depremlerde özellikle rijit özelliğe sahip gömülü boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Doğalgaz boru hatlarında oluşabilecek bir hasar, depremde meydana gelebilecek üstyapı hasarlarına ek olarak, yangın oluşturabilmektedir. Bunlara ek olarak, içme suyu borularında oluşabilecek bir hasar neticesinde, doğalgaz borularındaki hasarlardan dolayı meydana gelen yangınları söndürmek mümkün olmayacaktır.

Depremi gömülü boru hatları üzerindeki olumsuz etkilerine 1994 Northridge depremi örnek olarak verilebilir. Bu deprem sonucunda, Los Angeles şehrindeki içme suyu şebekesinde ciddi hasarlar meydana gelmiştir. 1906 San Francisco depreminden sonra, 1994 Northridge depremi Amerika'da su şebekelerinde en büyük hasarlara sebep olmuştur. Depremi Los Angeles'taki gömülü boru hatlarında sebep olduğu hasarlar, bu hasarları sınıflandırmak ve incelemek için oluşturulan veri tabanı, Toprak (1998) ve O'Rourke ve ark. (1998) tarafından yapılan araştırmalarda sunulmuştur (Toprak, 1998, O'Rourke , Toprak, & Jeon, 1998).

Gömülü boru hatlarında meydana gelebilecek hasarlarda, boru tipi, boru boyutları, zemin korozyonu ve boru hizmet ömrü gibi parametreler etkili olmaktadır. Geçmiş zamandaki depremlerde boru hatlarının performansı göz önünde bulundurulduğunda, boru çapları ile boru onarım oranları arasında bir bağıntı olduğu görülmüştür. Bu durum, dağıtım boruları (çap < 600 mm) ve iletim boruları (çap >600 mm) olmak üzere iki sınıfa ayrılarak incelenmiştir (Toprak, 1998). O'Rourke ve ark. boru çapı arttıkça hasar oranının azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca

bu araştırmacılar, hem yatay yer hareketinin hem de boru çapının, onarım oranı ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir (O'Rourke , Toprak, & Jeon, 1998).

4.2. Altyapı Sistemlerinin Üstyapı Sistemlerinden Farklılıkları

Yeraltı yapılarının depreme karşı davranışlarını incelemek için kullanılan yöntemler ile üstyapı sistemlerinin dinamik davranışlarının incelenmesinde kullanılan yöntemler aşağı yukarı birbirine benzemektedir. Ancak, gömülü boru hatlarının deprem yükleri altındaki davranışı diğer üstyapı elemanlarından farklılık göstermektedir. Bu durumun asıl sebebi, boru hatlarının çok uzun hatlar olması ve zemin özelliklerinin yerden yere değişiklik göstermesidir. Sonuç olarak, gömülü boru hatlarının dinamik davranışı birçok yönden üstyapı elemanlarının dinamik davranışından farklıdır (Arıman & Muleski, 1981, Datta & Mashaly, 1986, Datta, 1999).

Bu farklılıklar şu şekilde sıralanabilir;

- Üstyapı elemanlarının projelendirilmesini etkileyen en önemli parametre olan eylemsizlik kuvvetleri, gömülü boru hatlarında boruyu çevreleyen zemin tarafından sınırlandırılır.
- Üstyapı elemanlarının çoğu zemin hareketlerine uygun bir şekilde tasarlanabilirken, hem uzun hem de sürekli elemanlar olan gömülü boru hatlarının, boru hattı boyunca zemin özelliklerinin yerden yere farklılık göstermesinden dolayı zemin hareketlerine uygun tasarlanması zor olmaktadır.
- Herhangi bir üstyapıda oluşan hasar başka bir yapıyı etkilemezken gömülü boru hattının herhangi bir noktasında meydana gelen hasar hattın diğer kısımlarını da etkiler.

4.3. Hasar eşitleri

Depremlerden dolayı gömülü boru hatlarında oluşan hasarlar petrol, doğalgaz, elektrik, su ve kanalizasyon hatları gibi önem arz eden altyapı hizmetlerinin kullanım dışı kalmasına sebep olacağından özellikle şehir hayatını olumsuz etkiler. Arazi alışmaları ve çeşitli incelemeler sonucunda depremlerden dolayı gömülü boru hatlarında oluşan hasarlar ve bu hasarların meydana geldiği alanlar ve bölgeler şu şekilde sıralanabilir (O'Rourke, Toprak, & Jeon, 1998, Toprak, 1998, Datta, 1999).

1. Zemin Ortamı Koşulları
 - Kötü zemin özelliklerine sahip bölgeler
 - Islah edilen bölgeler, deniz-göl alanlarının doldurulduğu alanlar

- Gevşek kumlu zeminler
 - Gömülü boru hatları boyunca zemin özelliklerinde keskin farklılıkların olduğu bölgeler
2. Boru Döşeme Koşulları
- Ana boru ve tali boruların bağlantı noktaları ile ana boru ve baca kısımlarının birleştiği bölgeler
 - Boruların yapılara bağlandığı noktalar
 - Sığ kanalizasyon borularının olduğu bölgeler
3. Hasar Çeşitleri
- Gömülü boru hattının farklı bölgelerindeki dalga yayılması ve faz farkı ile oluşan gerilme ve eğilmeden dolayı meydana gelen şekil değiştirmeler
 - Boru hattının çok önem arz eden bir fay bölgesinden geçmesi durumunda deprem anında fay hareketlerinden dolayı büyük yer değiştirmeler
 - Heyelan
 - Sıvılaşmadan dolayı gömülü boru zemin içerisinde yüzmesi
 - Zemin kabarmasından dolayı borunun aksenal yer değiştirmesi (Şekil 4.1a)
 - Baca bağlantı noktalarındaki çatlak ve kırılmalar (Şekil 4.1b)
 - Boru birleşim noktalarında yer değiştirme, açılma ve kırılmaların olması



(a)

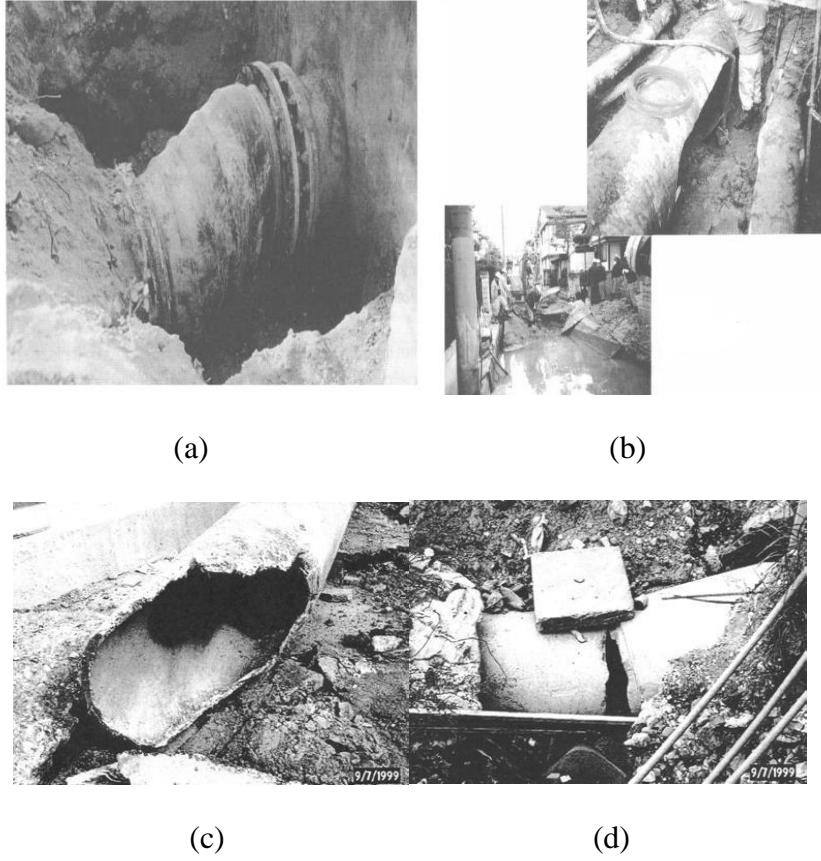
(b)

Şekil 4.1. 1993 Hokkaido – Nansei – Oki depreminde ($M=7.8$) gömülü boru hatlarında meydana gelen hasarlar

Kaynak: (Mohri, 1995)

1999 Kocaeli Depreminde farklı bölgelerde çeşitli hasarlar meydana gelmiştir. Bu hasarlar şu şekilde sıralanabilir (Sağlamer & Balkaya, 2003).

1. İçme suyu ve atık su boru hatlarında hasarlar oluşmuştur. Oluşan bu hasarların en önemli sebebi, boru hatlarının projelendirilmesinde boru içinde iletilen sıvıların boruya uygulayacağı basıncın hesaba katılmamasıdır.
2. Deprem meydana geldiği alanlardaki su ve atık su arıtma tesisleri, deprem etkisi hesaba katılarak yapıldıkları için herhangi bir hasar oluşmamıştır. Ancak bu tesislerin altı tanesinden birinde sadece güç kaynağında problemler olmuştur.
3. Çelik malzemedeki yapılmış gömülü borular genel olarak az hasar görmesine ya da hiç hasar görmemesine rağmen, hasar gören bölgelerdeki çelik boruların fay hatları boyunca döşendiği ve bu bölgelerdeki bazı yerlerde yaklaşık 3 m yatay yer değiştirmelerin olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.2a).
4. Gömülü iletim ve dağıtım boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Ağır hasarların temel sebebi, Adapazarı bölgesinde zeminde oluşan sıvılaşma problemi, Gölcük bölgesindeki fay hattının kırılması, tüm bölgelerde meydana gelen şiddetli yer sarsıntıları ve asbest çimento malzeme kökenli dayanımı düşük boruların kullanılması gibi durumlardan kaynaklanmaktadır (Şekil 4.2b, Şekil 4.2c).
5. Fay hatları boyunca kullanılan, özellikle de beton malzeme kökenli borularda oluşan burkulma probleminden dolayı borularda kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.2d)



Şekil 4.2. 1999 Kocaeli depreminde boru hatlarında oluşan hasarlar

Kaynak: (Sağlamer & Balkaya , 2003:27)

4.4. Gömülü Borularda Hasarlara Sebep Olan Parametreler

Depremlerden sonra meydana gelen, dalga yayılımından kaynaklanan zeminin yer değiştirmesi, fay hareketi, zeminin sıvılaşması ve heyelan gibi parametreler ciddi hasarlara sebep olmaktadır. Fay hareketine karşı direnç, gömülü boru hattı üzerine etki eden sürtünme kuvvetlerinden dolayı artar. Esnek özelliğe sahip boruların fay hareketine karşı performansı, rijit özellikteki borulara göre çok daha iyidir. Fay hareketleri veya zemin sıvılaşması gibi problemlerden dolayı zeminde meydana gelen yer değiştirmeler, gömülü boru hatları gibi yeraltı yapılarında oluşan hasarların asıl sebebini teşkil etmektedir (Arıman & Muleski , 1981).

1. Fay hatları ya da heyelan problemleri dışında gömülü boru hatlarında hasarlara sebep olabilecek iki ana parametre mevcuttur. Bunlardan birincisi deprem dalgalarından dolayı oluşan deformasyonlar, ikincisi ise borunun etrafındaki zemin tabakalarının birbirlerine göre göreceli hareketleridir. Gömülü boru hattında zemin profilinin değiştiği yani zemin özelliklerinin keskin değişiklik gösterdiği bölgelerde deprem kaynaklı hasarlar meydana gelmektedir.

2. Depremde meydana gelen zemin hareketlerine paralel olarak gömülü boru ve tünel gibi altyapı elemanlarında da hareketler olmaktadır.
3. Gömülü boru hatlarının depreme karşı performansında, borunun boyuna doğrultusundaki deformasyonlar enine doğrultusundaki deformasyonlara göre daha fazladır.
4. Boru hattının düz olmayan bölümlerindeki eğilme deformasyonları, düz olan bölümlerindeki eğilme deformasyonları ile benzer davranış göstermektedirler.
5. Boru hattında meydana gelen en büyük deformasyon yüzey dalgaları sonucunda oluşmaktadır. Deprem dalgasının ivmesi maksimum iken maksimum deformasyon meydana gelmez.
6. Boru çeşitlerinin mukavemet yönünden depreme karşı performansları değerlendirildiğinde ortaya çıkan en önemli parametre sünekliktir. Deprem kaynaklı oluşan yer hareketlerinden dolayı boruların hasar görmemesi için özellikle deprem bölgelerinde esnek boruların tercih edilmesi önerilmektedir. Çelik boruların dökme demir borulara göre HDPE boruların ise diğer borulara göre depreme karşı gösterdikleri performans daha iyidir.
7. Fay hatları boyunca gömülü borularda burkulmadan dolayı meydana gelen hasarlar çokça görülen bir durumdur.

4.4.1. Dalga Yayılımı

Deprem dalgaları zemin boyunca ilerlerken zeminde geçici şekil değiştirmelere sebep olmaktadır. Gömülü borularda meydana gelen hasarların en önemli sebebi deprem dalgalarından dolayı zeminde oluşan bu geçici şekil değiştirmelerdir. Deprem dalgaları, yüzey ve cisim dalgaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yüzey dalgalarının hızları cisim dalgalarının hızlarına kıyasla daha yavaştır. Bu sebepten dolayı yüzey dalgaları cisim dalgalarına kıyasla zeminde daha büyük yer değiştirmelere ve bunun da bir sonucu olarak gömülü boru hatlarında ciddi hasarlara sebep olmaktadır (O'Rourke, 1995, O'Rourke, Symans, & Masek, 2008).

Deprem dalgalarından dolayı gömülü borularda oluşan hasar problemi gerçek zemin ortamında üç boyutlu bir problemdir. Bu problem, genel olarak lineer elastik, homojen, izotrop ve yarı sonsuz bir ortamda belli bir derinlikte çapı sabit olan gömülü bir borunun problemi şeklinde ele alınmaktadır. Bu problem birçok araştırmacı tarafından iki veya üç boyutlu modeller oluşturulup analizleri yapılarak incelenmiştir (Miura, 2003).

4.4.2. Fay Hattı Hareketleri

Fay hareketi ve kopma uzunluğunu kapsayan deprem büyüklüğünün bir fonksiyonu olan farklı ampirik formüller vardır. Gömülü boru hatlarında sürekli olan borular ile sürekli olmayan boruların fay hareketine karşı performansları karşılaştırıldığında, sürekli olmayan boruların performanslarının daha kötü olduğu görülmektedir. Sürekli olmayan borulardaki deformasyonlar bağlantı noktalarının esneme, burulma, buruşma ve mukavemet gibi parametrelere bağlıdır (O'rouke, 1995). Şekil 4.3'te fay hareketi sonucunda gömülü boruda oluşan buruşma verilmiştir.



Şekil 4.3. Fay hareketi sonucunda boruda meydana gelen buruşma

Kaynak: (Eidinger, 1998)

4.4.3. Heyelan, Oturma ve Yıpranma

Heyelanın meydana geldiği yerlerde, zemin kütlelerinde kalıcı yer değiştirmeler oluşur. Bunun bir sonucu olarak, heyelan bölgelerinde gömülü olan boru hatlarında ciddi hasarlar meydana gelebilir. Depremler özellikle yağışın bol olduğu dönemlerde meydana gelirse birçok heyelan oluşabilir (Şekil 4.4). Zeminde meydana gelen yer değiştirme kalıcı yer değiştirme miktarına göre belirlenmektedir (G&E Engineering Systems Inc, 2001).



Şekil 4.4. Düzce depreminden sonra yol güzergahında meydana gelen heyelan

Kaynak: (Toprak, 2004)

Dolgu zemin ile doğal zemininin birleştiği bölgelerde ve sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin olduğu bölgelerde farklı oturmanın bir sonucu olarak gömülü borularda kırılmalar meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak gömülü boruların birbirlerine veya bina gibi yapılara bağlandığı yerlerde oluşan farklı oturmalar borularda ciddi hasarlara yol açmaktadır (G&E Engineering Systems Inc, 2001).

Gömülü boru hatlarındaki yıpranmalar borunun kullanım süresine bağlı olarak değişmektedir. Çelik ve dökme demir gibi borularda zamana bağlı olarak korozyon meydana gelir ve bunun bir sonucu olarak borularda yıpranmalar gerçekleşir. Borularda oluşan yıpranma veya göçme gibi durumlar yeni borulara nazaran eski borularda daha çok görülmektedir. 1987 Whittier Depreminin kayıtlarına bakıldığında, gömülü borularda meydana gelen hasarların borunun kullanım süresi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Buna benzer bir durum 1989 Loma Prieta Depreminde çelik borularda da meydana gelmiştir (Davis, 2002).

4.4.4. Sıvılaşma

Sıvılaşma ile ilgili ilk çalışmalar 1964'te meydana gelen Japonya Niigata ile Kuzey Amerika-Alaska depremlerinde, özellikle kumlu zeminlerin sıvılaşmasından dolayı, yapılarda gözlenen hasarlar sonucunda başlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, sıvılaşma ile alakalı yapılan ilk incelemeler laboratuvar ortamında kum numuneler üzerinde yapılmıştır (Seed & Peacock, 1971, Finn, Emery, & Gupta, 1971, Ishihara & Li, 1972). Farklı zeminlerin deprem yükleri altındaki sıvılaşma davranışı, araziden alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde, birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Erken & Ansal, 1994, Tsukamoto, Ishihara, Nakazawa, Yasuda, & Horie, 2001, Erken, Kaya, & Ülker, 2004, Erken vd., 2004). Erken ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar sonucunda, suya doymuş gevşek kohezyonsuz zeminler ile suya doymuş yumuşak kohezyonlu zeminlerin dinamik davranışlarının birbirinden farklı olduğunu ifade etmişlerdir (Erken, Kaya, & Ülker, 2004).

Deprem yüklerinden dolayı, suya doymuş kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması sonucunda gömülü boru hatları zemin yüzeyine çıkarlar ve geminin suda yüzmesine benzer bir şekilde zemin yüzeyinde yüzerler (Şekil 4.5). 1964 Niigata, 1967 Mudurnu Vadisi, 1970 Gediz, 1989 Loma Prieta, 1995 Kobe, 1998 Ceyhan-Misis ve 1999 Marmara depremleri, zeminde sıvılaşma olayının meydana geldiği depremlere örnek olarak verilebilir.



Şekil 4.5. Sıvılaşma sonucu borunun zemine yüzeyine çıkması

Kaynak: (Damgaard, 2004)

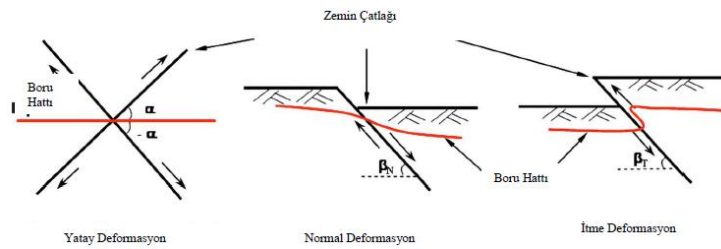
4.5. Zeminde Oluşan Geçici ve Kalıcı Yer Değişiklikler

Depremlerden dolayı zeminde oluşan geçici yer değişiklikler (GYD) ve kalıcı yer değişiklikler (KYD), gömülü boru hatlarında deformasyonlara sebep olmaktadır. GYD deprem dalgalarının zemindeki hareketi sırasında oluşurken, KYD ise Şekil 4.6'da gösterildiği gibi deprem sonunda zeminde meydana gelen ve eski haline dönmeyen nihai yer değişikliğidir. GYD gömülü boru hatlarında bazen küçük hasarlara sebep olabilirken bazen de büyük hasarlara sebep olabilmektedir. Genellikle heyelan (Şekil 4.7), fay hareketi (Şekil 4.8), zemin sıvılaşması ve zeminde oluşan farklı oturmalar sonucunda zeminlerde meydana gelen KYD, gömülü boru hatlarında ciddi problemlere yol açmaktadır (Toprak & Yoshizaki, 2003).



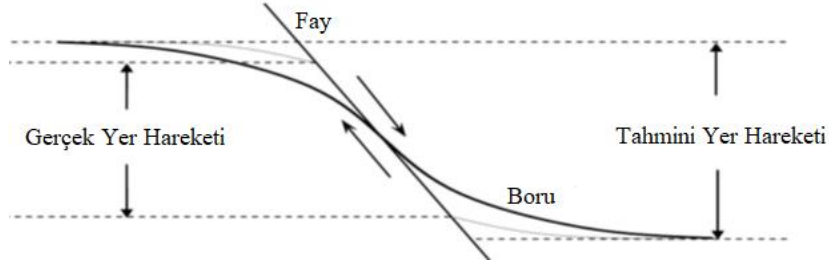
Şekil 4.6. 1999 Marmara depremi sonrasında demiryolu hattında oluşan KYD

Kaynak: (Arpat, 2005)



Şekil 4.7. Heyelan sonucunda borularda oluşabilen KYD

Kaynak: (Toprak & Yoshizaki, 2003)



Şekil 4.8. Fay hareketi sonucunda borularda oluşabilen KYD

Kaynak: (Toprak & Yoshizaki, 2003)

4.6. Gömülü Boru Hatlarının Dinamik Davranışı

Geçmişte meydana gelen depremlerde gömülü boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuş ve buna bağlı olarak gömülü boruların dinamik davranışı ile alakalı çalışmalar artmıştır. Burada dünya genelinde meydana gelen depremler sonucunda gömülü boru hatlarında oluşan hasarlara, literatür çalışması kapsamında değinilmiştir.

4.6.1. San Francisco Depremi

San Francisco depremi 18 Nisan 1906 tarihinde meydana gelmiş olup, depremin büyüklüğü 7.8 olarak ölçülmüştür. Depremden dolayı yumuşak zeminlerde meydana gelen oturmalar sonucunda şehrin ana su hattında ciddi hasarlar oluşmuştur. Ayrıca şehrin güney bölgesinden şehre su ileten büyük çaptaki gömülü boru hattında, boruların hem yumuşak zemin ortamında bulunmalarından hem de fay hatları ile kesişmelerinden dolayı, kırılmalar olmuştur. Şehrin su ihtiyacını temin eden bu hatlarda oluşan hasarlardan dolayı, deprem sonucunda meydana gelen yangınlara müdahale gecikmiştir. Şehir 16 farklı yangın alarmı vermiştir. Meydana gelen bu yangınların asıl sebebi, hem yağ hem de gaz soba ve lambalarının deprem hareketlerinden dolayı devrilmesidir. Şehrin verdiği en büyük kayıplar, deprem etkisinden ziyade, çıkan yangınlardan dolayı olmuştur (Davis, 2002).

4.6.2. Anchorage Depremi

Bu deprem 1964 yılında Alaska'da meydana gelmiş olup, depremin büyüklüğü 8.3 olarak belirlenmiştir. Depremden dolayı meydana gelen heyelan sonucunda gömülü boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Zeminde meydana gelen farklı oturmalar, dağıtım ve iletim hatlarında kırılmalara sebep olurken, doğrudan deprem dalgalarına maruz kalan boru hatlarında ezilmeler ve ayrılmalar meydana gelmiştir (Datta, 1999).

4.6.3. Santa Rosa Depremi

Bu deprem 1 Ekim 1969 tarihinde Amerika'nın California eyaletinde meydana gelmiş ve depremin büyüklüğü 5.7 olarak ölçülmüştür. Deprem sonrasında depolama tankları, pompa istasyonları ve baraj gibi yapılarda az, dağıtım ve iletim boru hatlarında ise ciddi hasarlar oluşmuştur (PAHO, 1998).

4.6.4. San Fernando

6.6 büyüklüğündeki San Fernando depremi, 9 Şubat 1971 tarihinde California eyaletinde meydana gelmiştir. Farklı boru hatlarında yaklaşık olarak 1400 kırılma olmuştur. Şehrin günlük hayatının sürekliliğini sağlayan su, doğalgaz ve kanalizasyon boru hatları geçici bir süreliğine kullanım dışı kalmıştır. Depremin barajlar, su tankları ve gömülü borular gibi şehrin su ihtiyacını temin eden yapılar üzerinde etkisi olmuştur (PAHO, 1998).

Meydana gelen hasarların birçoğu deprem sarsıntılarının etkisi ile oluşmuş ve gömülü boru hatlarındaki bağlantı elemanlarından rijit olanların esnek olanlara göre daha çok hasara maruz kaldığı görülmüştür. Gömülü borulardaki hasarlar daha çok ezilme, eğilme ve sıyrıлма şeklinde olmuştur (Datta, 1999).

4.6.5. Guatemala Depremi

Guatemala depremi 4 Şubat 1976 tarihinde meydana gelmiş olup depremin büyüklüğü 7.5 olarak ölçülmüştür. Bu depremde Motagua fay hattının kırılması sonucunda 250 km boyunca zeminde ortalama 1 m yatay yer değiştirmeler olmuştur. Genel olarak ciddi hasarlar oluşmuş olup gömülü boruların hasarları ile alakalı herhangi bir rapor sunulmamıştır (PAHO, 1998).

4.6.6. San Juan ve Mendoza Depremi

Bu deprem, 23 Kasım 1977'de Arjantin'de ve 7.4 büyüklüğünde meydana gelmiştir. Caucete, San Martin ve 25 de Mayo bölgelerinde oluşan hasarlar diğer bölgelere göre daha fazladır. Özellikle Caucete şehrinin su şebeke borularında yaklaşık 40 km boyunca ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Meydana gelen hasarların en temel nedeni yer altı su seviyesinin yüzeye yakın olması ve bunun bir sonucu olarak sıvılaşmanın oluşmasıdır (PAHO, 1998).

4.6.7. Meksika Depremi

Meksika depremi 19 Eylül 1977 tarihinde Mexico şehrinde meydana gelmiş ve depremin büyüklüğü 8.1 olarak ölçülmüştür. Bu şehirde toplamda 72 bin km uzunlukta boru hatları bulunmakta olup boruların çapları 50 mm ile 3000 mm arasında değişmektedir. Gömülü

boru hatlarında oluşan hasarlar yüzeyde bulunan boru hatlarına göre daha fazladır. Büyük çaplı borularda oluşan hasarların birçoğu T ve çapraz bağlantıların olması, vana ve bağlantı elemanlarının esnek özellikte olmaması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır (PAHO, 1998).

4.6.8. San Salvador Depremi

10 Eylül 1986 tarihinde meydana gelen depremin büyüklüğü 5.4 olarak ölçülmüştür. San Salvador bölgesinin zemin yapısı volkanik kül birikintilerinden oluşmaktadır. Bu durum, bu bölgenin zaman zaman volkanik patlamalara maruz kaldığını göstermektedir. Deprem sonucunda boru hatlarında meydana gelen hasarlar, zeminde oluşan farklı oturmalar ve sismik dalgalardan dolayı oluşmuştur. Esnek özelliğe sahip çelik borular da dahil içme suyu boru hatlarında hasarlar oluşmuştur. Boru hatlarında yaklaşık olarak gözüken 2400 kırığın büyük bir çoğunluğu içme suyu borularında meydana gelmiştir. İçme ve kanalizasyon boru hatlarında meydana gelen hasarlar, gömülü boru hattı toplamının yaklaşık olarak %25'ini teşkil etmektedir (PAHO, 1998).

4.6.9. Napo Proviens Depremi

Bu deprem 5 Mart 1987 tarihinde Ekvator bölgesinde olmuş ve depremin büyüklüğü 6.8 olarak ölçülmüştür. Deprem meydana gelmeden önce yağın yağmurlar sonucunda zemin doygunluğa ulaştığı için depreminde etkisiyle heyelanlar olmuştur. Bunun bir sonucu olarak, heyelan bölgesinde yer alan yaklaşık 40 km uzunluğuna sahip Trans-Ekvator gömülü petrol boru hattının büyük bir kısmı etkilenmiştir (PAHO, 1998).

4.6.10. Whittier Depremi

Amerika'nın California eyaletinde 1 Ekim 1987 tarihinde meydana gelen depremin büyüklüğü 5.9 olarak kayıtlara geçmiştir. Yüksek basınçlı doğalgaz taşıma boruları hariç olmak üzere doğalgaz boru hatlarında hasarlar meydana gelmiştir. Bazı doğalgaz boru hatlarındaki hasarların, boruların korozyona uğraması sonucu oluştuğu belirlenmiştir. Depremden dolayı boru hatlarında 2000 den fazla çatlaklık oluşmuştur. Meydana gelen hasarların %75'inin deprem anında doğalgaz bağlantı elemanlarının zarar görmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir (Davis, 2002).

4.6.11. Loma Prieta Depremi

Bu deprem 17 Ocak 1989 tarihinde olmuş ve depremin büyüklüğü 7.1 olarak ölçülmüştür. Calaveras fay hattına yakın bir bölgede bulunan 1950'lerde inşa edilen dökme demirden yapılmış su borularında hasar oluşmuştur. Yerleşim alanlarındaki boru

bağlantılarında birçok kırılmalar meydana gelmiştir. Gevşek dolgu ve alüvyal zeminlerde bulunan boru hatlarında meydana gelen hasarlar sıkı dolgulu zeminlerde gömülü olan borulara göre daha fazladır (PAHO, 1998).

4.6.12. Limon Depremi

Costa Rica’da 22 Nisan 1991 tarihinde meydana gelen Limon depreminin büyüklüğü 7.4 olarak ölçülmüştür. Deprem sonucunda Banone Nehri havzasında ciddi hasarlar oluşmuş ve bunun bir sonucu olarak bölgede bulunan içme suyu boru hatlarında yer yer hasarlar meydana gelmiştir. Bu hasarların birçoğu iki boruyu birleştiren bağlantı noktalarında ayrılmaların oluşması sonucunda meydana gelmiştir (PAHO, 1998).

4.6.13. Northridge Depremi

17 Ocak 1994 tarihinde California’nın Los Angeles şehrinde meydana gelen depremin büyüklüğü 6.7 olarak ölçülmüştür. Fay hattına yakın olan bölgelerdeki boru hatlarının birçoğu S dalgalarına maruz kalmıştır. Boru hatlarında oluşan hasarların çoğunluğunun bağlantı noktalarında meydana gelen kırılmalardan kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu deprem, çelik boru hatlarının fay hattına yakın olması durumunda daha çok hasarlara maruz kalabileceğini göstermiştir. Çelik borulardaki bağlantı noktalarında oluşan korozyon ise borularda başka hasarların meydana gelmesine sebep olmuştur. Ayrıca büyük çaplı beton boru hatlarında da kırılmalar oluşmuştur (Bardet vd., 1997, Davis, 2002).

4.6.14. Kobe Depremi

17 Ocak 1995 tarihinde Japonya’da meydana gelen depremin büyüklüğü 7.2 olarak ölçülmüştür. Depremden dolayı zeminde meydana gelen sıvılaşma, farklı oturmalar ve yatay yer değiştirmeler gömülü boru hatlarında büyük hasarlara sebep olmuştur. Şehrin su ihtiyacını temin etmek için dağlarda inşa edilen su depolarından çok azı yapısal olarak hasar görmüştür. Ancak boru hatlarında meydana gelen kırılma ve kopma gibi hasarlardan dolayı 1 gün içerisinde depolardaki bütün sular boşalmıştır. Bu sebepten dolayı deprem sonucunda meydana gelen yangınlar söndürülememiş ve bunun bir sonucu olarak Kobe şehrinin yaklaşık 1 km²’lik alanı yangın sonucunda kullanılamaz hale gelmiştir (Bardet vd., 1997).

4.6.15. Cariaco Depremi

Bu deprem 9 Temmuz 1997 tarihinde Venezuela’da meydana gelmiş ve depremin büyüklüğü 6.9 olarak ölçülmüştür. El Pilar fay hattında oluşan 50 km’lik bir kopma sonucu zeminde yaklaşık 50 cm’lik yatay yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Bundan dolayı gömülü

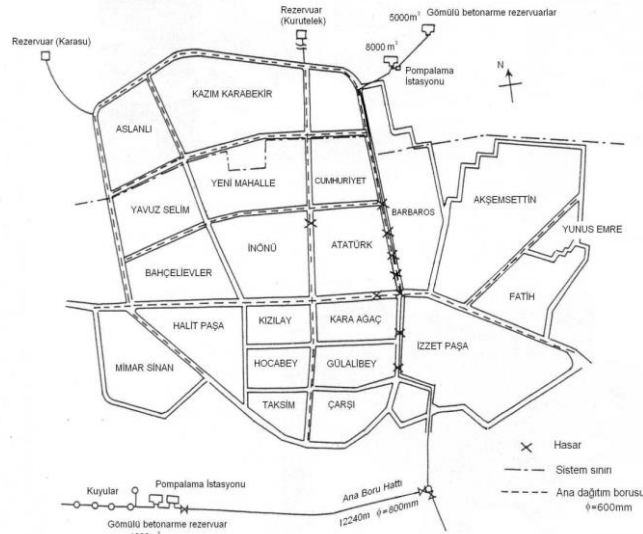
boru hatları ve atık su arıtma tesislerinde hasarlar oluşmuştur. Fay hattını yaklaşık 30^0 kesen bir içme suyu hattı tamamen göçmüştür (PAHO, 1998).

4.6.16. Chi-Chi Depremi

21 Eylül 1999 tarihinde Taiwan’da meydana gelen depremin büyüklüğü 7.3 olarak ölçülmüştür. Bu depremde çok büyük fay kırılmaları meydana gelmiştir. Birçok yerdeki su ve doğalgaz boru hatlarında hasarlar oluşmuştur. Fay hattı üzerindeki gömülü borularda, fay hareketi sonucunda oluşan kesme kuvvetlerinden dolayı, daha çok hasar meydana gelmiştir (Davis, 2002).

4.7. Türkiye’deki Gömülü Boru Hatlarının Dinamik Davranışı

13 Mart 1992 tarihinde merkezi Erzincan olan ve büyüklüğü 6.9 olarak ölçülen deprem sonucunda, Erzincan Deprem Hasar Raporu’na göre, su dağıtım hatlarında ciddi hasarlar meydana gelmiştir (JSCE, 1993).



Şekil 4.9. Erzincan şehrine ait su dağıtım hattı

Kaynak: (JSCE, 1993)

Şekil 4.9’da gösterildiği gibi, Erzincan’ın su ihtiyacı şehrin güney tarafındaki kuyulardan alınıp pompalanmak suretiyle gömülü boruları ile şehre ulaştırılmaktadır. Derin kuyularda ciddi hasarlar oluşmamış ve hafif hasarlar ise hemen onarılmıştır. Depremden dolayı oluşan elektrik kesintileri sonucunda 3-4 gün boyunca şehrin su temininde zorluklar yaşanmıştır. Su dağıtım borularında ise ciddi hasarlar oluşmuştur.

Su dağıtım hattı 600 mm çaplı dökme demir, 80-125 mm çaplı PVC ve 200-250 mm çaplı asbest çimento borularından oluşmaktadır. Dökme demir borularda 4 ve diğer borularda 25 olmak üzere yaklaşık 30 yerde göçmeler meydana gelmiştir. Ayrıca PVC ve asbest-çimento boru hatlarının bağlantı elemanlarında da kırılmalar olmuştur. Depremden yaklaşık 15 gün sonra şehre su ileten boru hatlarının hemen hemen %75'i onarılmıştır. Şehrin su ihtiyacını temin etmek için yaklaşık 60 tane su tankı kullanılmıştır. Yaklaşık 250 km uzunluğuna sahip kanalizasyon boru hattının %10'luk kısmında hasarlar oluşmuştur (JSCE, 1993).

17 Ağustos 1999 tarihinde Adapazarı ve İzmit bölgelerinde meydana gelen depremin büyüklüğü 7.4 olarak ölçülmüştür. 1999 Kocaeli Depremi Hasar Tespit Raporu'na göre gömülü boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Hasarların meydana geldiği yerlerde, zeminde fay hareketi sonucu oluşmuş kalıcı yer değiştirmeler (KYD) görülmüştür. Fay hattını kesen borularda büyük hasarlar meydana gelmiştir. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, Kocaeli iline bağlı Acısu köyünde bulunan yaklaşık 700 mm çaplı çelik içme su borusunda burkulma hasarı görülmüştür. Şekil 4.11'de ise zeminde oluşan 2 m'den fazla düşey yer değiştirmenin sonucunda İzmit'e bağlı Kavaklı bölgesinde bulunan boru hattında meydana gelen kırılma görülmektedir (JSCE, 2001).



Şekil 4.10. Çelik su borusunun deprem sonucunda burkulmuş hali

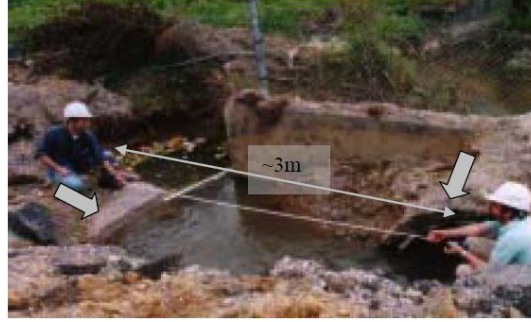
Kaynak: (JSCE, 2001)



Şekil 4.11. Normal fay ile kesişen borunun zeminde oluşan düşey deformasyonlar sonucunda kırılması

Kaynak: (JSCE, 2001)

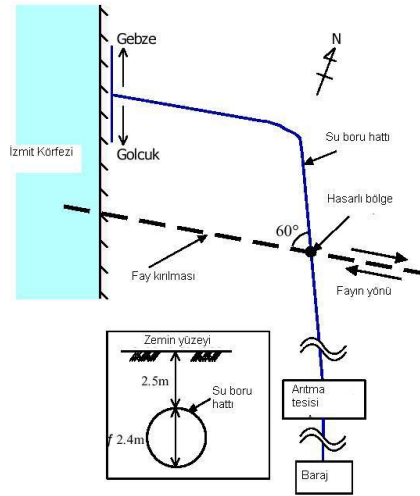
Şekil 4.12’de gösterildiği gibi Sakarya’nın Arifiye ilçesinde bulunan kanalizasyon boru hattında kırılma meydana gelmiştir. Bu boru hattında oluşan hasarın asıl sebebi, borunun ana fayı kesmesi ve ana fayın hareketi sonucunda zeminde KYD meydana gelmiş olmasıdır. Sonuç olarak boruda kırılma gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Ana fay hattını kesen kanalizasyon borusunun kırılması

Kaynak: (JSCE, 2001)

Kullar bölgesinde bulunan 240 cm çapındaki çelik su boru hattında fay kırılması sonucunda büyük hasarlar oluşmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Fay kırılması sonucunda boru hattında görülen hasar

Kaynak: (Yasuda, Sutani, Suzuki, & Isoyama, 2002)

Deprem sonucunda Gölçük, Adapazarı ve İzmit’te çok büyük yapısal hasarlar meydana gelmiş ve su ihtiyacı tankerler aracılığıyla temin edilmiştir. Bu bölgelerde yapısal hasarlar meydana geldiği gibi boru hatları da ciddi hasarlara uğramıştır. Bundan dolayı yeni bir boru hattı inşa edilmiştir. Gömülü borularda oluşan hasarların birçoğu Sapanca gölü ve nehirlerin yakınlarında meydana gelmiştir. Bu hasarların temel sebebi ise deprem esnasında zeminde oluşan sıvılaşma ve fay hareketi olarak rapor edilmiştir. Gölçük ve Adapazarı’nda doğal gaz

hatlarının bulunmaması yangın gibi problemlerin ortaya çıkmasını engellemiştir. Ancak Yalova ve İzmit bölgelerinde ise doğalgaz boru hatlarında ciddi hasarlar meydana gelmiştir (Yasuda, Sutani, Suzuki, & Isoyama, 2002).

4.8. Sonuç

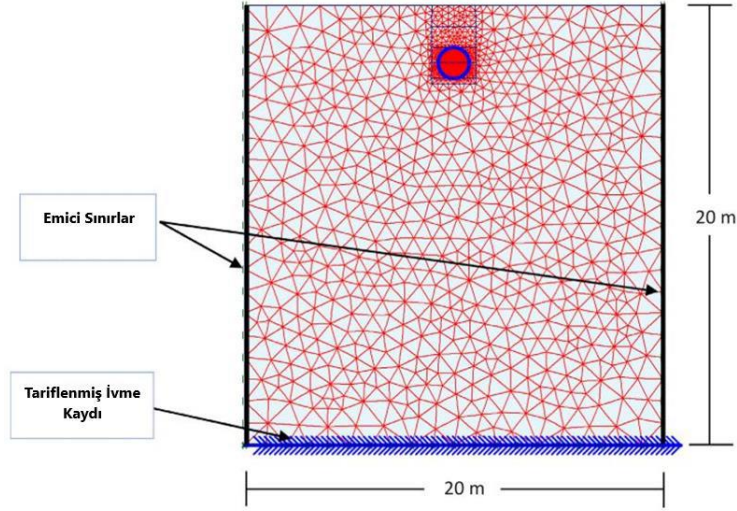
Geçmişte hem dünya genelinde hem de Türkiye’de meydana gelen depremler sonucunda gömülü boru hatlarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Bu hasarların boyutunu, depremin şiddeti, boruların gömüldüğü zemin koşulları, boru cinsi ve boru döşeme yöntemleri gibi parametreler etkilemektedir. Sonuç olarak, geçmiş depremlerde gömülü borularda oluşan hasarları göz önünde bulundurarak, gömülü boru hatlarının dinamik yükler altında hasar görmemesi için bölgenin depremsellik durumu, zemin koşulları, boru cinsi ve boru döşeme metotları gibi hususların dikkate alınarak projelendirmelerin yapılması gerekir.

5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, sonlu elemanlar özellikle de Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak farklı zemin koşullarında gömülü olan boruların dinamik yüklere göre davranışını inceleyen çalışmalara değinilmiştir. Hem MC, HS ve HSSS zemin modellerinin karşılaştırılmasını konu alan Plaxis 2D çalışmalarına da yer verilmiştir. Ayrıca, Plaxis programında borunun programa tanımlanması tünel sekmesi ile yapılmaktadır. Bu sebepten, fikir vermesi açısından tünellerin farklı zemin şartlarında dinamik yükler altındaki davranışı ile ilgili bu tez çalışmasını ilgilendiren çalışmalara da kısmen değinilmiştir. Genel olarak dinamik yükler altında, zemin modelinin ve zemin koşullarının boru veya tünel gibi benzeri altyapı elemanların performansı üzerindeki etkisini konu alan çalışmalar incelenmiştir.

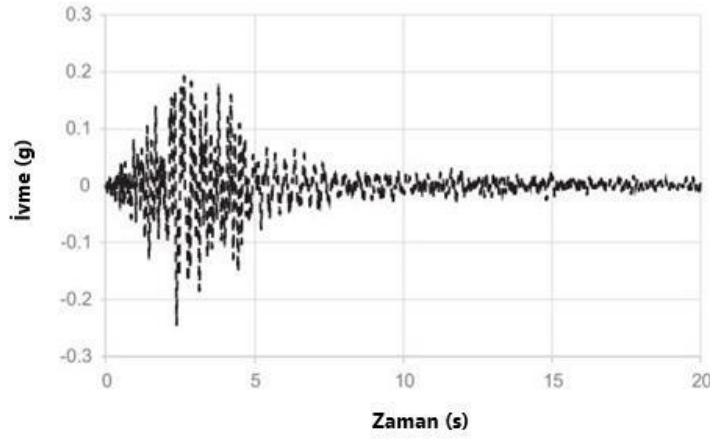
Lee ve ark. farklı zemin koşullarında gömülü olan gaz borusunun dinamik yükler altındaki davranışını, sonlu elemanlar programını kullanarak analiz etmişlerdir. Bu kapsamda, boruyu çevreleyen zemin malzemesini yumuşak kil, gevşek ve sıkı kum olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, boruyu çevreleyen zeminin sıkı kum olması durumunda, borunun dinamik yükler altında performansının kil ve gevşek kum olması durumuna göre daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir (Lee, Kim, Lee, & Kong, 2009:7).

Alzabeebee, farklı zemin şartlarında gömülü olan uPVC borunun deprem yükü altındaki davranışını incelemek için HSSS zemin modelini esas alarak Şekil 5.1’de gösterildiği gibi Plaxis sonlu elemanlar programında model oluşturmuştur. Araştırmacı bu kapsamda, gömülü boruyu çevreleyen kum zeminini %50 ve %80 sıkı olması durumunda programa tanımlayarak Şekil 5.2’de gösterilen deprem kaydı ile analizini yapmıştır. Araştırmacı sonuç olarak, boruyu çevreleyen zeminin sıklığının artmasının, borunun deprem yükü altındaki davranışı üzerinde çok önemli bir etki oluşturmadığını ancak daha iyi davranış sergilediğini ifade etmiştir (Alzabeebee, 2019a:10). Araştırmacı ayrıca, zemin modellerinin karşılaştırmasını da araştırmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda, HSSS zemin modelinde Lineer Elastic (LE) ve MC zemin modellerine göre daha yüksek sonuçlar elde etmiştir (Alzabeebee, 2019a:7).



Şekil 5.1. Modele ait sonlu elemanlar ağı

Kaynak: (Alzabeebee, 2019a:2)

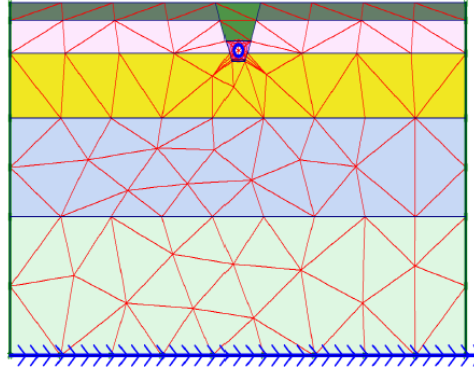


Şekil 5.2. Upland (1990) depreminin ivme-zaman grafiği

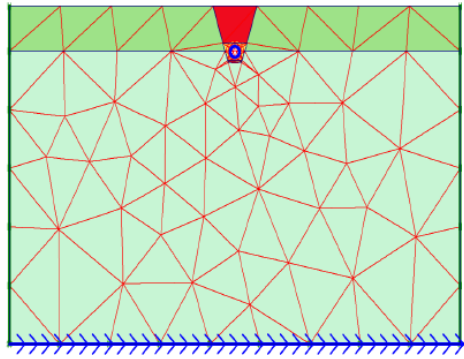
Kaynak: (Alzabeebee, 2019b:4)

Gümüş, farklı zemin koşullarında farklı malzeme özelliklerine sahip olan gömülü boruların deprem yükü altındaki davranışını araştırmıştır. Araştırmacı yaptığı çalışma kapsamında, 1999 Marmara deprem bölgesinden SK-1 (orta zemin), SK-2 (iyi zemin) ve SK-3 (kötü zemin) olmak üzere üç farklı zemin sondajı almıştır. Daha sonra üç farklı zemin sondajını Şekil 5.3'te gösterildiği gibi Plaxis sonlu elemanlar programında MC zemin modelini kullanarak modelleyip her zemin kesitine betonarme, cam takviyeli plastik (CTP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru tanımlamıştır. Araştırmacı daha sonra oluşturduğu modellerin 1999 Marmara depremine karşı dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Gümüş, yaptığı çalışma sonuçlarını Tablo 5.1'de özetlemiştir. Araştırmacı, aynı zemin koşullarında gömülü

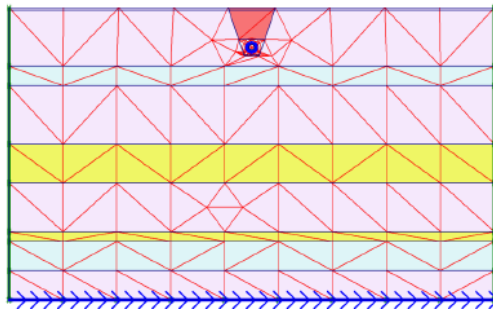
olan farklı malzeme özelliğine sahip boruların aynı miktar yer değiştirme yaptığı, iyi zemin şartlarında gömülü olan borunun kötü zemin şartlarına kıyasen daha az yer değiştirme yaptığı ve depreme karşı esnek malzeme özelliğine sahip olan HDPE borunun daha iyi performans gösterdiğini ifade etmiştir (Gümüş, 2009).



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.3. a) SK-1 b) SK-2 c) SK-3 zemin sondajlarının Plaxis sonlu elemanlar programına tanımlanan modelleri

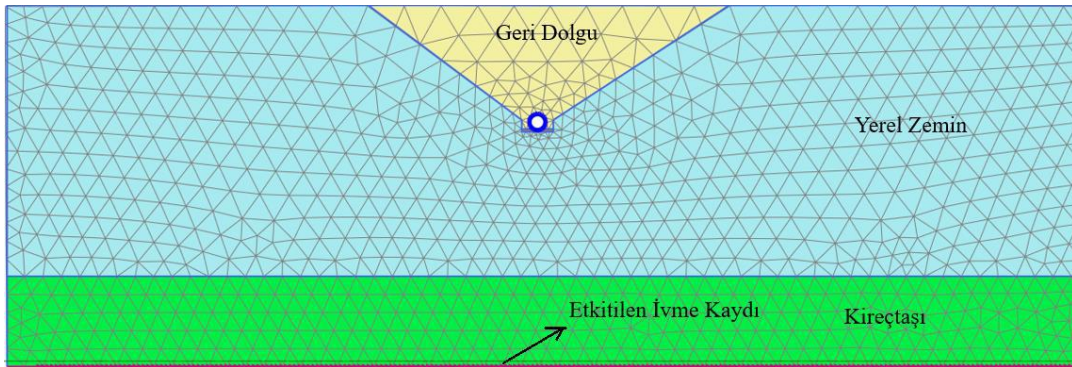
Kaynak: (Gümüş, 2009:87)

Tablo 5.1. Boruların deprem yükü altındaki davranışları

Zemin Tipi	1 No'lu Zemin Profili			2 No'lu Zemin Profili			3 No'lu Zemin Profili		
	Betonarme Boru	CTP Boru	HDPE Boru	Betonarme Boru	CTP Boru	HDPE Boru	Betonarme Boru	CTP Boru	HDPE Boru
Eksenel Kuvvet (kN/m)	30.56	30.45	19.59	41.56	41.41	25.5	24.81	24.74	16.58
Kayma Kuvveti (kN/m)	4.82	4.79	2.34	9.4	9.34	4.08	4.07	4.05	2.14
Eğilme Momenti (kNm/m)	7.92	7.31	4.38	10.30	10.22	5.67	5.98	5.94	3.65
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.23093	0.23093	0.23121	0.11445	0.11445	0.11474	0.34485	0.34485	0.34494
Düsey Yer Değiştirme (m)	0.00254	0.00254	0.00301	0.00005	0.00005	0.00097	0.01692	0.01692	0.01696

Kaynak: (Gümüş, 2009:113).

Demirci, gömülü betonarme boruların tasarımı ve deprem altındaki davranışını incelemiştir. Şekil 5.4'te modeli verilen zemin profilini, Plaxis sonlu elemanlar programında HSSS zemin modelini kullanarak modellemiştir. Araştırmacı, yaptığı çalışmada birçok parametrenin borunun davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu parametrelerden biride, geri dolgu malzemesinin rijitliğinin borunun dinamik yüklere karşı davranışına etkisidir. Araştırmacı, gömülü borunun etrafındaki geri dolgu malzemesinin rijitliğinin artmasına bağlı olarak borunun daha fazla yüklere maruz kaldığını ifade etmiştir (Demirci, 2021:191).

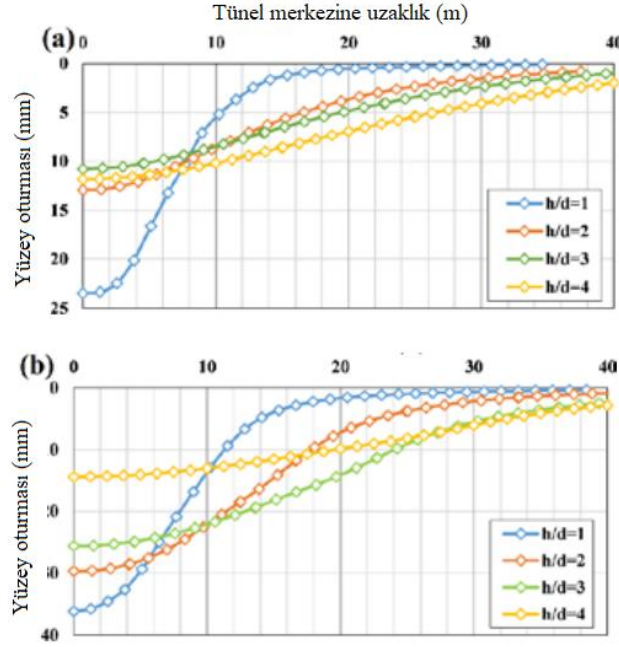


Şekil 5.4. Dinamik analiz modeli Plaxis 2D

Kaynak: (Demirci, 2021:129)

Çelik, Plaxis 2D sonlu elemanlar programını kullanarak, tünel kazısından dolayı zemin yüzeyinde oluşan oturmaların karşılaştırmasını MC ve HS zemin modelleriyle yapmıştır. Araştırmacı, bu kapsamda tünel derinliğinin boru çapına oranını ifade eden h/d oranını artırarak

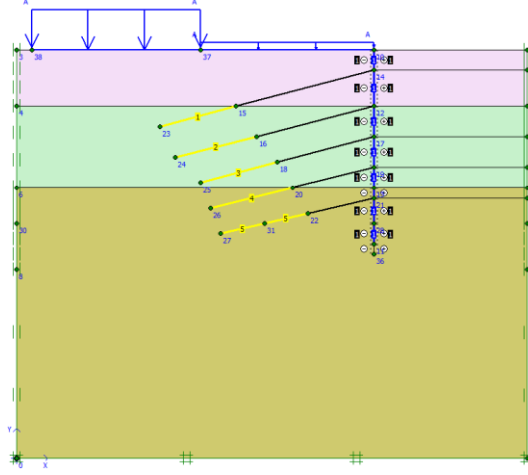
farklı durumlardaki analizleri yapmıştır. Araştırmacı sonuç olarak, h/d oranı arttıkça zemin yüzeyinde meydana gelen oturmaların azaldığını ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi HS zemin modelinde MC zemin modeline göre daha doğru sonuçlar verdiğini ifade etmiştir (Çelik, 2017:7).



Şekil 5.5. Tünelin derinliğine bağlı olarak zemin yüzeyinde meydana gelen oturmaların (a) MC zemin modeli ile (b) HS zemin modeli ile miktarları

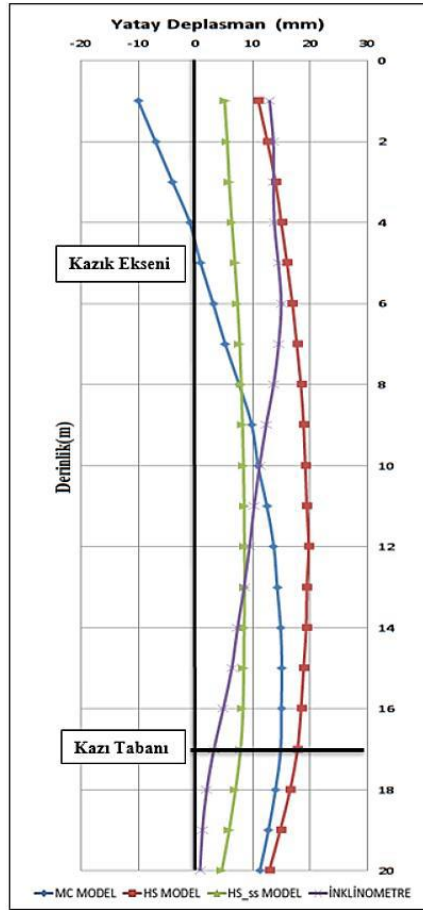
Kaynak: (Çelik, 2017:6)

Bahadır ve Onur, derin kazı destek sistemi tasarımında zemin modelinin sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, Şekil 5.6'da gösterildiği gibi iksa sisteminin kesitini Plaxis 2D sonlu elemanlar programını kullanarak modellemişlerdir. Bu kapsamda, MC, HS ve HSSS zemin modelleri ile analizler yaparak arazi ölçümleri ile sonuçları karşılaştırmışlardır. Araştırmacıların yaptıkları analiz sonuçlarının arazi ölçümlerine göre karşılaştırması Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Araştırmacılar, HS ve HSSS zemin modelleri ile yapılan analiz sonuçlarının arazi ölçümlerine daha yakın olduğunu bulmuşlar ve HS, HSSS zemin modelleri ile yapılan analiz sonuçlarının MC zemin modeline göre gerçeğe daha yakın olduğunu ifade etmişlerdir (Bahadır & Onur , 2017).



Şekil 5.6. İksa sisteminin Plaxis 2D sonlu elemanlar programında modellenmesi

Kaynak: (Bahadır & Onur , 2017:587)

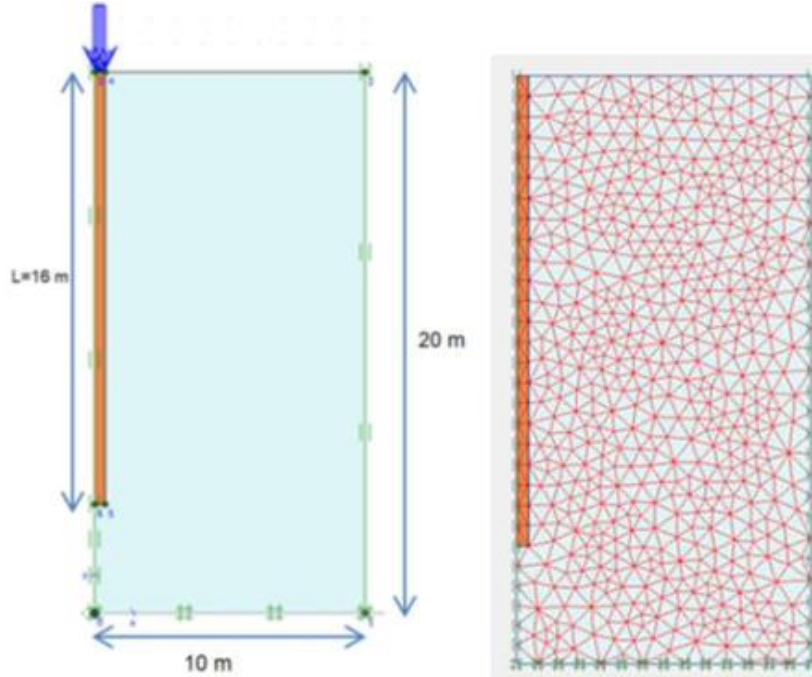


Şekil 5.7. Arazi ölçümü ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kaynak: (Bahadır & Onur , 2017:589)

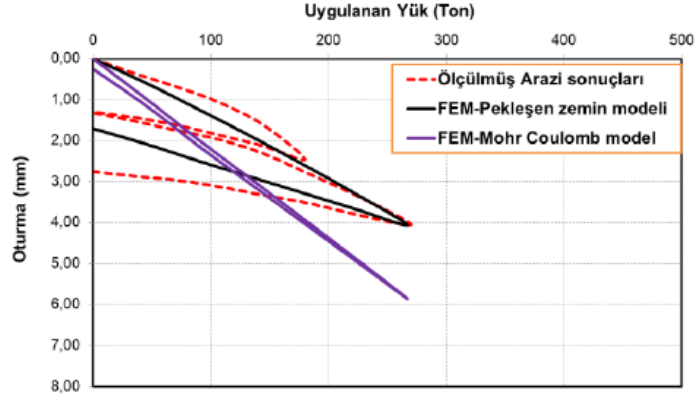
Xuan ve ark. küçük şekil değiştirme modelinin istinat duvarı kazılarında uygulanması kapsamında çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, Plaxis 2D sonlu elemanlar programını kullanarak HSSS, HS ve MC zemin modelleri ile analiz yapmışlardır. Sonuç olarak, HSSS zemin modelinin diğer iki modele göre daha daha doğru duvar deplasmanları ve yüzey oturmaları verdiğini ifade etmişlerdir (Xuan, Xia, & Wang, 2009:418).

elik, statik kazık yükleme deneyinin farklı zemin modellerinde sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve arazi bulgularıyla karşılaştırılması kapsamında çalışma yapmıştır. Araştırmacı, Şekil 5.8’de gösterildiği gibi kazık elemanını Plaxis 2D sonlu elemanlar programını kullanarak HS ve MC zemin modelleri ile modellemiştir. Araştırmacı, Şekil 5.9’da gösterildiği gibi analiz sonuçlarını analiz sonuçları ile karşılaştırmış ve sonuç olarak HS zmin modeli ile yapılan analiz sonuçlarının, MC zemin modeline kıyasla, arazi ölümlerine daha yakın olduğunu ifade etmiştir (elik, 2018).



Şekil 5.8. Model boyutları ve sonlu elemanlar ağı

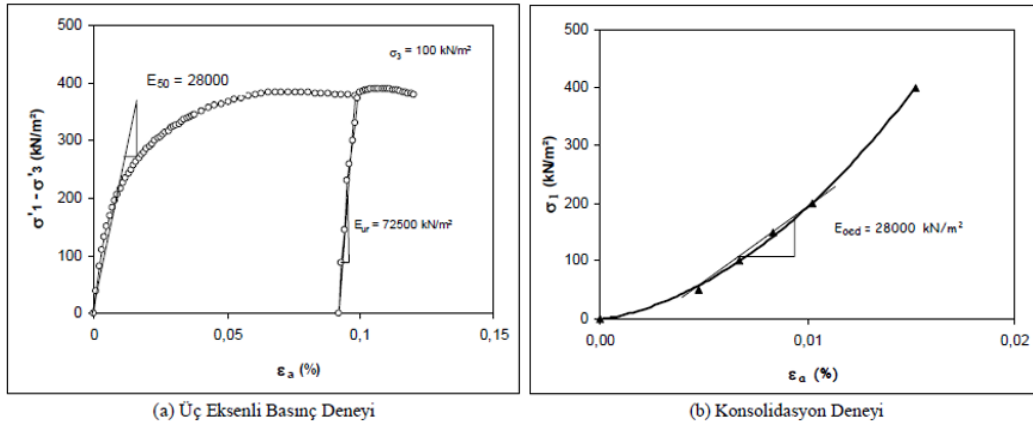
Kaynak: (elik, 2018:186)



Şekil 5.9. Analiz sonuçlarının arazi ölçümleri ile karşılaştırması

Kaynak: (Çelik, 2018:188)

Laman ve ark. kum zeminler üzerine oturan dairesel temellerin taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Araştırmacılar bu kapsamda, laboratuvar ortamında küçük ölçekli model deneyler ve Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile sayısal analizler yapmışlardır. Araştırmacılar, model deneyleri 700 mm*700 mm*700 mm boyutlarında kare kesitli kasa içerisinde yapmışlardır. Model deneylerde 85 mm çapında dairesel temel kullanmışlardır. Araştırmacılar, sayısal analiz kapsamında ise Plaxis 2D sonlu elemanlar programını kullanarak Lineer Elastik (LE), MC ve HS zemin modelleri ile analizler yapmışlardır. Laman ve ark. LE ve MC zemin parametrelerini tayin etmek için laboratuvarında bir takım deneyler yapmışlardır. HS zemin parametrelerini elde etmek için ayrıca üç eksenli (Şekil 5.10a) ve konsolidasyon (Şekil 5.10b) deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Laman, Yıldız , Örnek , & Demir, 2007)

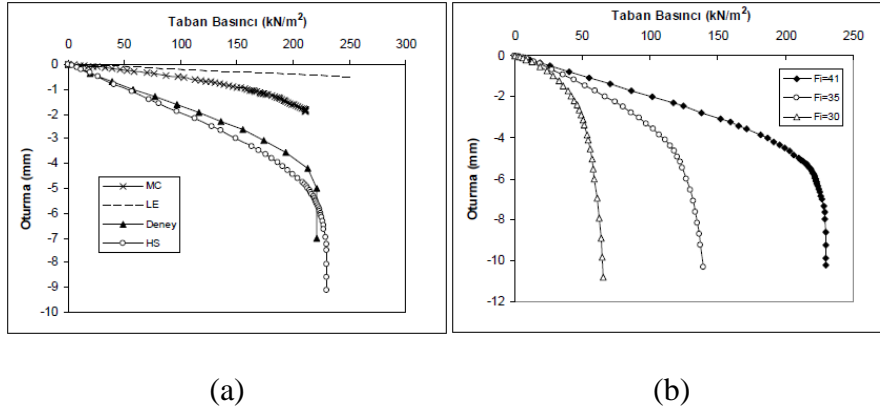


Şekil 5.10. HS zemin parametrelerinin belirlenmesi

Kaynak: (Laman, Yıldız , Örnek , & Demir, 2007:588)

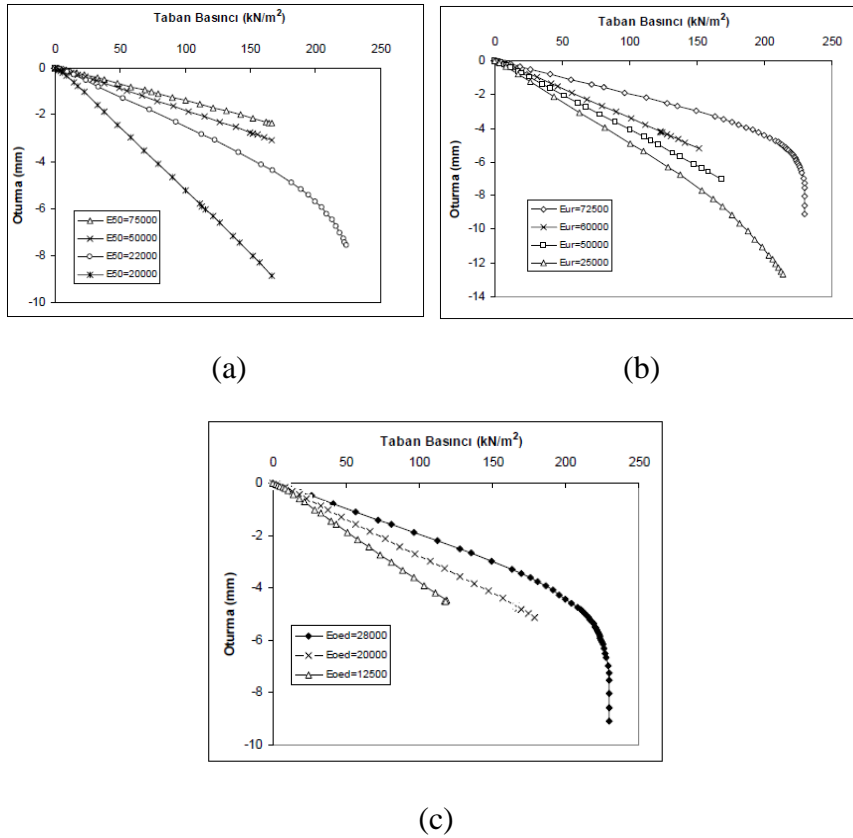
Araştırmacılar, laboratuvar ortamında yaptıkları model deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarını Şekil 5.11a'da gösterildiği gibi karşılaştırmışlar ve HS zemin modeli ile yapılan

sayısal analiz sonuçları ile model deney sonuçlarının birbirine yakın olduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar ayrıca kumun içsel sürtünme açısının (Şekil 5.11b) ve elastisite modülünün (Şekil 5.12a, 12b, 12c), kum zeminlere oturan dairesel temellerin davranışında önemli parametreler olduğunu göstermişlerdir (Laman, Yıldız , Örnek , & Demir, 2007).



Şekil 5.11. a) Model deneyleri ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması b) Kumun içsel sürtünme açısının zemin davranışına etkisi

Kaynak: (Laman, Yıldız , Örnek , & Demir, 2007:590-591)



Şekil 5.12. a) E_{50} b) E_{ur} c) E_{oed} parametresinin zemin davranışına etkisi

Kaynak: (Laman, Yıldız , Örnek , & Demir, 2007:591-592)

6. PLAXİS 2D SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE FARKLI ZEMİN KOŞULLARINDA GÖMÜLÜ OLAN BORULARIN DEPREM YÜKÜ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ ANALİZİ

6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, son zamanlarda karmaşık mühendislik problemlerinin daha kolay ve doğru bir şekilde çözülmesinde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, ilk defa 1956'da uçak gövdelerinin gerilme analizlerini yapmak için kullanılmıştır. Sonrasında ise birçok mühendislik alanında kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, teknolojinin ilerlemesine paralel olarak, daha da geliştirilerek birçok mühendislik probleminin çözülmesinde kolaylık sağlamaktadır (Cansız, 2014).

Bu yöntem, geoteknik mühendisliği uygulamalarında ilk kez 1996'da kullanılmıştır. Reyes ve Deene 1996'da yeraltı kazı uygulamasında, Cloung ve Woodward ise 1967'de yol dolgusu uygulamasında oluşan gerilme ve deformasyonları bulmak için kullanmışlardır (Osmanoğlu, 2007).

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesap yapılan geoteknik mühendisliği uygulamalarında, analizin gerçeğe yakın olması için aşamalı yükleme yapılır. Sonrasında ise boşluk suyu basınçları, gerilmeler ve deformasyonlar belirlenir. Lineer olmayan zemin davranışı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizlerinin yapılması gerekir. Analizlerin doğru sonuç verebilmesi için başlangıç gerilme koşulları, zeminin lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet parametrelerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir (Osmanoğlu, 2007).

Sonlu elemanlar yöntemi, gömülü borular ve tünel gibi altyapı sistemlerinin modellenmesini kolaylaştırmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde taşıyıcı elemanlar, belli sayıdaki elemanın belli sayıdaki düğüm noktalarından birbirine ağ yapısı ile bağlanmasıyla oluşmaktadır. Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlarda meydana gelen kuvvet-deformasyon özelliği kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır (Osmanoğlu, 2007).

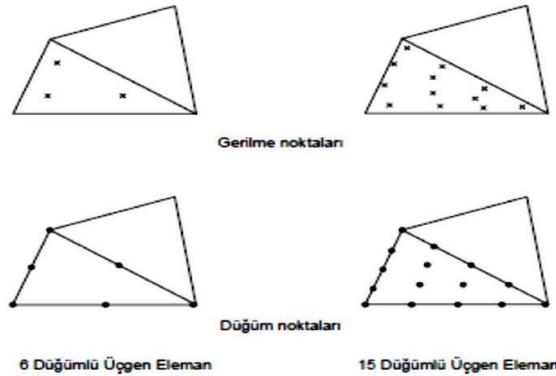
Zemin ortamının tabakalardan oluşması, elastik ve lineer yöntemlerle yapılan hesapların gerçekçi olmaması gibi durumlar, sonlu elemanlar yöntemini, geoteknik uygulamaların analizinde en çok tercih edilen sayısal analiz yöntemi haline getirmiştir. Günümüzde geoteknik mühendisliği problemlerinin çözülmesinde kullanılan birçok sonlu elemanlar programı mevcuttur. Bu programlara, PLAXİS 2D/3D, FLAC 2D/3D, ABAQUS, DİANA, MİDAS GTS

gibi programlar örnek olarak verilebilir. Bu çalışma kapsamında PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

6.2. Plaxis 2D Sonlu Elemanlar Programı

Plaxis 2D sonlu elemanlar programı, geoteknik mühendisliği uygulamalarının analizlerinin yapılması için geliştirilmiş bir programdır. Plaxis 2D, geoteknik projelerinin tasarımında deformasyon ve stabilite analizleri, gerilme-şekil değiştirme, yapı-zemin etkileşimi, konsolidasyon, akım ağı, şev analizi, dinamik analiz gibi durumlarda kullanılmaktadır (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli olan bir zemin ortamının sınır şartları tanımlanarak belli bir alanda analiz yapılmasına olanak sağlar. Bu şekilde sürekli olan bir zemin ortamı belli bir alanda birçok elemana ayrılır. Bu elemanlar düğüm noktaları ile birbirine bağlanır ve bu düğüm noktalarının her biri bir serbestlik derecesine sahiptir. Plaxis 2D sonlu elemanlar ağı oluşturulurken, ağ yapısı 6 veya 15 düğüm noktasından oluşan kümelere ayrılırlar (Şekil 6.1). Sonlu elemanlar ağı oluştururken, 15 düğüm noktasından oluşan elemanların seçilmesi daha hassas analiz yapılmasını sağlar. Plaxis 2D sonlu elemanlar programında hesaplanan deformasyonlar, gerilme ve düğüm noktalarında oluşan gerilme ve deformasyonlar üzerinden hesaplanır (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

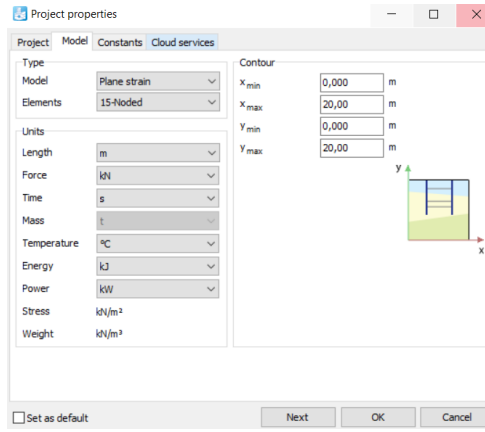


Şekil 6.1. Sonlu elemanlar ağı yapısını oluşturan gerilme ve düğüm noktaları

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)

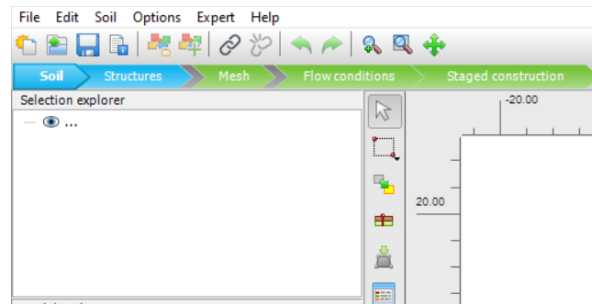
Plaxis 2D sonlu elemanlar ile yeni bir program açıldığında Şekil 6.2’de gösterilen project properties penceresinden model sınırları ve genel bilgiler girilir. Plaxis 2D, Şekil 6.3’te gösterildiği gibi Soil, Structures, Mesh, Flow Condition ve Staged Construction olmak üzere 5 ana kısımdan oluşmaktadır. Programın Soil sekmesinde yer alan Create borehole butonu ile zemin profili ve yer altı su seviyesi (YASS) koşulları tanımlanır (Şekil 6.4). Ayrıca soil

sekmesinden material sets butonundan zemin ve yapısal eleman özellikleri programa tanımlanır (Şekil 6.5). Structures sekmesinde yer alan Create tunnel butonundan boru malzeme özellikleri ve geometri bilgileri girilerek tanımlanır (Şekil 6.6). Soil ve Structures sekmelerinden zemin profili, zemin ve yapısal elemanların malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra Mesh sekmesinden uygun sonlu elemanlar ağı belirlenir (Şekil 6.7). Flow condition sekmesinden daha önceden tanımlanan YASS görüntülenir. YASS koşullarında yapılacak herhangi bir değişiklik bu sekmeden yapılır (Şekil 6.8). Son kısım olan Staged construction sekmesinden ise, hesaplama adımları tanımlanır ve analiz sonunda istenilen noktaların grafiklerinin elde edilebilmesi için, select points for curves butonundan noktalar atanır (Şekil 6.9). Analiz bittikten sonra, view calculation results butonundan analiz sonuçlarına bakılarak atanan noktaların istenilen grafik türleri elde edilebilir.



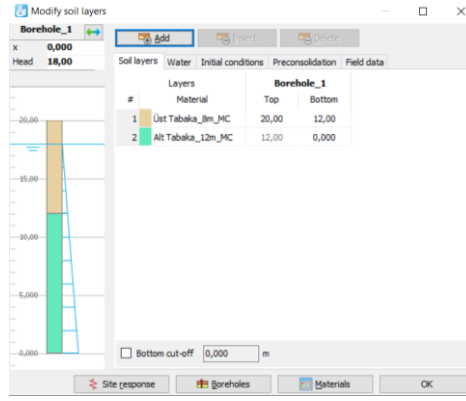
Şekil 6.2. Model sınırlarının ve özelliklerinin girildiği pencere

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)



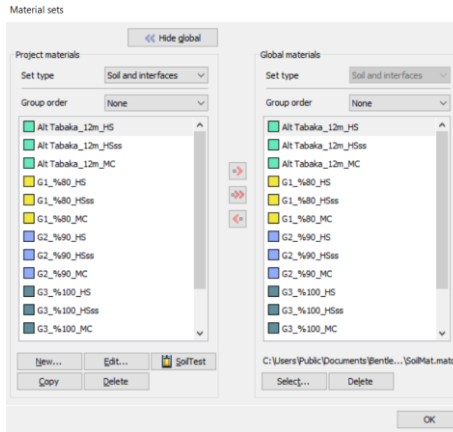
Şekil 6.3. Plaxis 2D sonlu elemanlar programının ana kısımları

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)



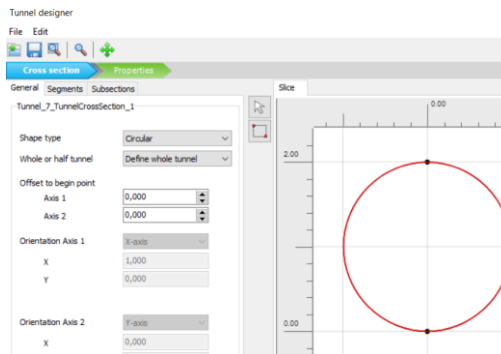
Şekil 6.4. Zemin profilinin tanımlandığı pencere

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)



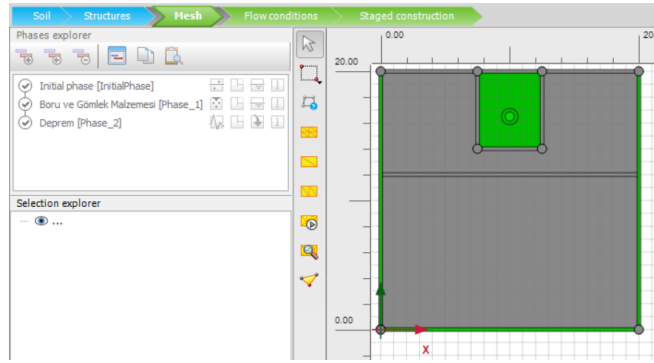
Şekil 6.5. Zemin ve yapısal eleman özelliklerinin tanımlandığı pencere

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)



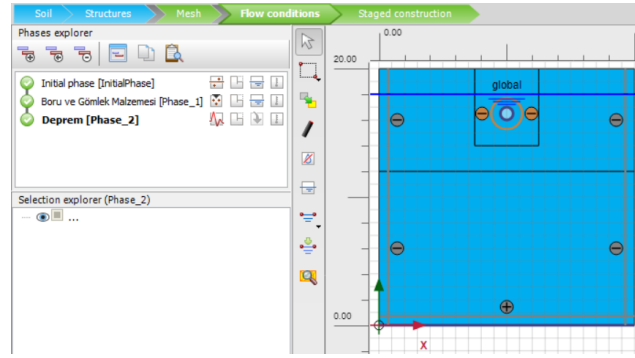
Şekil 6.6. Tünel penceresinden boru malzeme özelliklerinin ve geometri bilgilerinin tanımlanması

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)



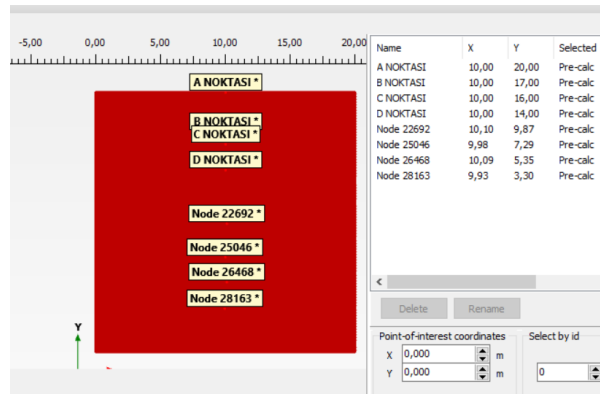
Şekil 6.7. Mesh sekmesinden sonlu elemanlar ağıının tanımlanması

Kaynak: (Plaxis 2D Referance Manuel, 2020)



Şekil 6.8. Programa tanımlanan YASS'ın görüntülenmesi

Kaynak: (Plaxis 2D Referance Manuel, 2020)



Şekil 6.9. Grafik çizimi için kritik bölgelere noktaların tanımlanması

Kaynak: (Plaxis 2D Referance Manuel, 2020)

6.3. Zemin Malzeme Modeli

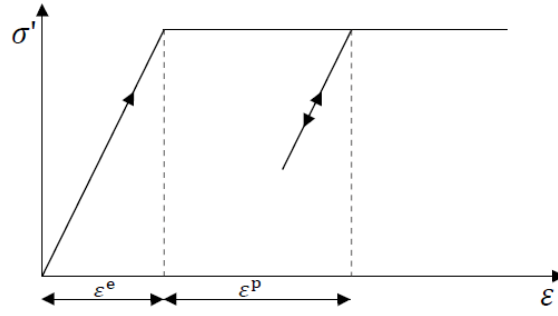
Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile analiz yaparken doğru sonuçlar elde etmek için, gerçeğe en yakın zemin modeli ile analiz yapmak gerekir. Bu kapsamda Plaxis 2D sonlu elemanlar programı, zemin davranışının doğru bir şekilde modellenmesinde çeşitli zemin modelini tanımlamamıza olanak sağlamaktadır. Bu modeller aşağıda sıralanmıştır (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020).

- Lineer Elastik (LE) Zemin Modeli
- Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli
- Hardening Soil (HS) Zemin Modeli
- Hardening Soil Small Strain (HSSS) Zemin Modeli
- Soft Soil (SS) Zemin Modeli
- Soft Soil Creep (SSC) Zemin Modeli
- Jointed Rock (JR) Zemin Modeli
- Modified Cam Clay (MCC) Zemin Modeli

Bu çalışma kapsamında Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HSSS) zemin modelleri kullanılarak analizler yapılmıştır.

6.3.1. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli

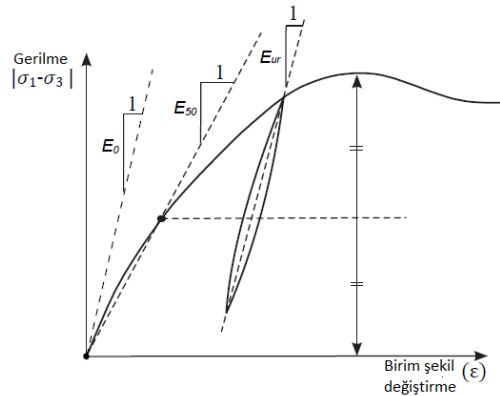
MC zemin modeli, zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin birinci bölgesinde elastik davranış, ikinci bölgesinde ise plastik davranışı esas alan lineer elastik mükemmel plastik davranış gösteren zemin modelidir (Şekil 6.10). Bu modelde zemine ait Elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) olmak üzere beş parametre kullanılarak analiz yapılmaktadır. MC zemin modelinde zeminin derinliği boyunca ortalama bir rijitlik değeri esas alınarak analiz yapılmaktadır. Yani derinlik boyunca rijitliğin değişmediği kabul edilir. Bu sebepten, MC zemin modeli gerçek zemin ortamını yansıtmadığı için çıkan analiz sonuçları doğru sonuçları tam yansıtmayabilir. Ancak, MC zemin modelinde analizlerin hızlı olması ve zemin hakkında genel bir fikir edinmek için kullanılması tavsiye edilmektedir. (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020).



Şekil 6.10. MC zemin modeli gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Kaynak: (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020)

MC zemin modeli için rijitliğin belirlenmesinde E_0 , E_{50} ve E_{ur} olmak üzere üç farklı rijitlik değeri rol oynamaktadır. Zemine ait drenajlı üç eksenli basınç deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiğinin tanjant modülü E_0 , sekant modülü E_{50} , ve boşaltma-tekrar yükleme modülü E_{ur} ile ifade edilmektedir (Şekil 6.11). Zemin yükleme durumu için, derinlikle değişmeyen sekant modülü olan E_{50} değeri esas alınmaktadır. Bu değer derinlik boyunca sabit kabul edilip analiz yapıldığı için, hacimsel değişiklik gösteren gevşek kumlar ve aşırı konsolide killerin zemin davranışının MC zemin modelinde modellenmesi tavsiye edilmemektedir. Ayrıca kazı problemlerinde bu model önerilmemektedir. Bu model ile dolgu ve şevlerin güvenlik analizi, yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi hesaplamaları yapılabilir (Plaxis 2D General Information Manuel, 2020); (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020).



Şekil 6.11. Drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen zemin modüllerinin tanımı

Kaynak: (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020)

6.3.2. Hardening Soil (HS) Zemin Modeli

Hardening Soil (Pekleşen Zemin) modeli, plastik teoriyi esas alarak analiz yapan bir zemin modelidir. Bu model, gerilmeye bağlı rijitlik değerlerini esas alır ve buna bağlı olarak derinlik boyunca zeminin rijitliğinin değiştiğini göz önünde bulundurur. Bundan dolayı, zemin

gerçek davranışına yakın modellenebilmektedir. HS modeli, E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} ve E_{ur}^{ref} rijitlik değerlerini esas alır. Bu değerler, MC zemin modeline ait olan E_{50} ve E_{ur} rijitlik modüllerinden elde edilmektedir ve denklem 6.1, 6.2 ve 6.3'teki gibi hesaplanmaktadır (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020).

$$E_{50} = E_{50}^{ref} * \left(\frac{c * \cos(\varphi) - \sigma'_3 * \sin(\varphi)}{c * \cos(\varphi) - p^{ref} * \sin(\varphi)} \right)^m \quad (6.1)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} * \left(\frac{\sigma}{p^{ref}} \right)^m \quad (6.2)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} * \left(\frac{c * \cos(\varphi) - \sigma'_3 * \sin(\varphi)}{c * \cos(\varphi) - p^{ref} * \sin(\varphi)} \right)^m \quad (6.3)$$

Denklemlerdeki m değeri gerilme oranını (yükleme seviyesi), p^{ref} referans gerilmeyi, σ'_3 hücre basıncını ve σ normal gerilmeyi ifade etmektedir (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020).

HS modelini kullanarak, hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde uygun sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak, HS modeli ile aşırı konsolide olmuş kil ve buna benzer davranış gösteren zeminleri modellerken dikkat etmek gerekir. Bunun sebebi ise, bu tür zeminlerin davranışlarının karmaşık olmasıdır (Brinkgreve, 2002).

6.3.3. Hardening Soil Small Strain (HSSS) Zemin Modeli

Hardening Soil Small Strain modeli, Hardening Soil modeline ek olarak küçük birim deformasyonları da dikkate alarak hesaplama yapan zemin modelidir. Bu model de, HS zemin parametrelerinin yanında G_0^{ref} (küçük birim deformasyon kayma modülü) ve $\gamma_{0.7}$ (birim deformasyon seviyesi) değerleri de göz önünde bulundurulmaktadır ve sırasıyla denklem 6.4 ve 6.5'teki gibi hesaplanmaktadır. HSSS modeli küçük deformasyonları da göz önünde bulundurduğu için, dolgularda kullanılan granüler zeminlerde ve aşırı konsolide olmuş kil zeminlerde kullanılması daha uygundur (Brinkgreve, 2002); (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020).

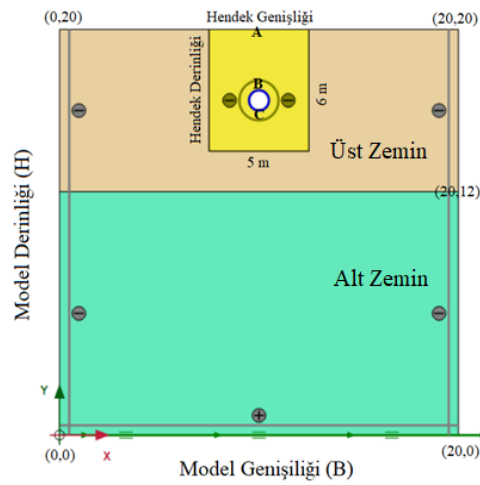
$$G_0 = G_0^{ref} * \left(\frac{c * \cos(\varphi) - \sigma'_3 * \sin(\varphi)}{c * \cos(\varphi) + p^{ref} * \sin(\varphi)} \right)^m \quad (6.4)$$

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9 * G_0} * [2c' * (1 + \cos(2\varphi')) - (\sigma'_1 * (1 + K_0) * \sin(2\varphi'))] \quad (6.5)$$

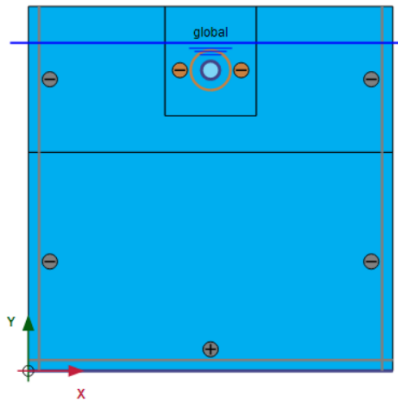
6.4. Analiz Çalışması

Bu tez çalışmasında, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak farklı zemin koşullarında farklı malzeme özelliğine sahip gömülü boruların deprem yükü altındaki dinamik davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda, MC, HS ve HSSS olmak üzere üç farklı zemin modeli,

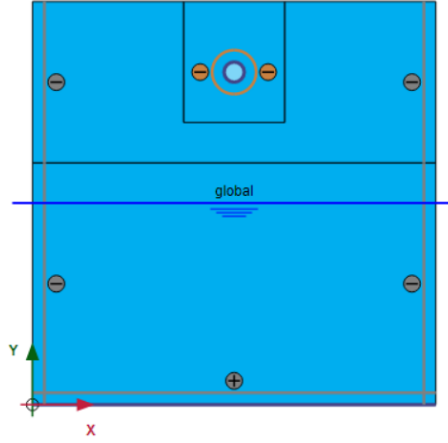
beton (rijit) ve PVC (esnek) olmak üzere iki farklı boru malzemesi (B1 ve B2), %80, %90 ve %100 relatif sıklıkta olmak üzere üç farklı boru gömlek malzemesi (G1, G2 ve G3) ve zemin yüzeyinden 2 m (Şekil 6.13) ve 10 m (Şekil 6.14) aşağıda olacak şekilde iki farklı yer altı su seviyesi (Y1 ve Y2) olmak üzere toplamda 36 farklı model analiz edilmiştir. Ayrıca Şekil 6.12’de verilen ana modelde A(10,20) noktası, borunun en üst noktası olan B(10,17) noktası ve borunun en alt noktası olan C(10,16) noktası olmak üzere üç farklı nokta dikkate alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Analizlerde, 5.4 büyüklüğündeki 1990 Upland deprem verileri kullanılmıştır. Bu depreme ait ivme-zaman grafiği Şekil 6.15’te verilmiş olup deprem modelin en alt kısmına etki ettirilmiştir.



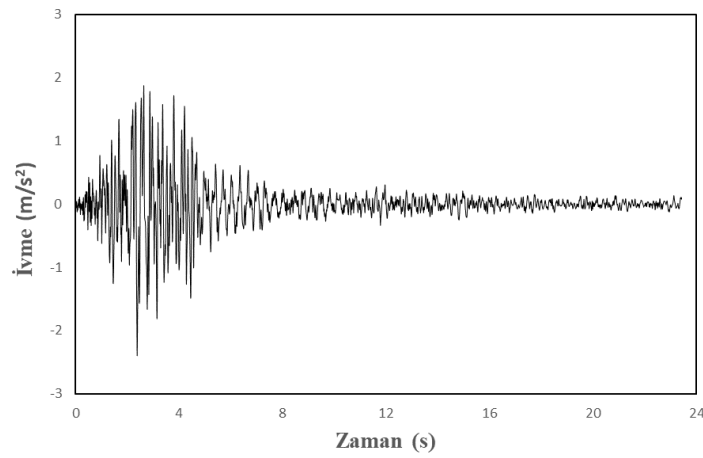
Şekil 6.12. Analizlerde kullanılan ana model



Şekil 6.13. Yer altı su seviyesinin yüzeyden 2m aşağıda olması durumu (Y1)



Şekil 6.14. Yer altı su seviyesinin yüzeyden 10 m aşağıda olması durumu (Y2)



Şekil 6.15. 1990 Upland depremine ait ivme-zaman grafiği

Analizlerde kullanılan boru malzeme özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir (Chin, 2012:567). Burada E , borunun elastisite modülü, ν , poisson oranı, t , et kalınlığı, EA , normal rijitlik, EI , eğilme rijitliğidir.

Tablo 6.1. Analizlerde kullanılan boru malzeme özellikleri

	Beton Boru (B1)	PVC Boru (B2)	Birimi
E	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^6$	kN/m ²
ν	0.15	0.45	-
Boru iç çapı	1000	1000	mm
Boru dış çapı	1200	1050	mm
t	100	25	mm
EA	$10.37 \cdot 10^6$	$241.5 \cdot 10^3$	kN/m
EI	$1.581 \cdot 10^6$	$31.74 \cdot 10^3$	kNm ² /m

Ayrıca analizlerde kullanılan üst ve alt zemin parametreleri Tablo 6.2, Tablo 6.3 ve Tablo 6.4'te verilmiştir (Plaxis 2D Tutorials Manuel , 2020:207). Tablo 6.4'te bulunan, MC zemin modeline ait E_{50} değerleri denklem 6.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden yer alan yanal basınç değerleri, σ'_3 , zeminlerin orta noktalarındaki değerlerdir.

Tablo 6.2. HSSS zemin modeline ait zemin özellikleri

	Üst Zemin	Alt Zemin	G1 (%80)	G2 (%90)	G3 (%100)	Birimi
Drenaj Tipi	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	-
γ_n	16	20	18,2	18,6	19,0	kN/m ³
$\gamma_{doğ}$	20	20	20,3	20,44	20,6	kN/m ³
E_{50}^{ref}	20000	30000	48000	54000	60000	kN/m ²
E_{oed}^{ref}	26000	36000	48000	54000	60000	kN/m ²
E_{ur}^{ref}	95000	110000	144000	162000	180000	kN/m ²
m	0,500	0,500	0,450	0,419	0,388	-
v_{ur}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	-
c	10	5	0	0	0	kN/m ²
φ	31	28	38	39,25	40,5	0
ψ	1	0	8	9,25	10,5	0
$\gamma_{0.7}$	1,5*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁴	1,2*10 ⁻⁴	1,1*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁴	-
G_0^{ref}	270000	100000	114000	121200	128000	kN/m ²
R_{int}	1	1	1	1	1	-
R_f	0,900	0,900	0,900	0,888	0,875	-
p^{ref}	100	100	100	100	100	kN/m ²
K_0	Oto.	Oto.	Oto.	Oto.	Oto.	-

Tablo 6.3. HS zemin modeline ait zemin özellikleri

	Üst Zemin	Alt Zemin	G1 (%80)	G2 (%90)	G3 (%100)	Birimi
Drenaj Tipi	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	-
γ_n	16	20	18,2	18,6	19,0	kN/m ³
$\gamma_{doğ}$	20	20	20,3	20,44	20,6	kN/m ³
E_{50}^{ref}	20000	30000	48000	54000	60000	kN/m ²
E_{oed}^{ref}	26000	36000	48000	54000	60000	kN/m ²
E_{ur}^{ref}	95000	110000	144000	162000	180000	kN/m ²
m	0,500	0,500	0,450	0,419	0,388	-
v_{ur}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	-
c	10	5	0	0	0	kN/m ²
φ	31	28	38	39,25	40,5	0
ψ	1	0	8	9,25	10,5	0
R_{int}	1	1	1	1	1	-
R_f	0,900	0,900	0,900	0,888	0,875	-
p^{ref}	100	100	100	100	100	kN/m ²
K_0	Oto.	Oto.	Oto.	Oto.	Oto.	-

Tablo 6.4. MC zemin modeline ait zemin özellikleri

	Üst Zemin	Alt Zemin	G1 (%80)	G2 (%90)	G3 (%100)	Birimi
Drenaj Tipi	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	-
γ_n	16	20	18,2	18,6	19,0	kN/m ³
γ_{doy}	20	20	20,3	20,44	20,6	kN/m ³
E_{50}	6500	26500	22500	26000	30500	kN/m ²
v_{ur}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	-
c	10	5	0	0	0	kN/m ²
φ	31	28	38	39,25	40,5	0
ψ	1	0	8	9,25	10,5	0
R_{int}	1	1	1	1	1	-
K_0	Oto.	Oto.	Oto.	Oto.	Oto.	-

Boruyu çevreleyen gömlek malzemesinin zemin özellikleri ise, kum zeminlere ait HSSS zemin modeli için geçerli olan, 6.6 - 6.16 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır ve Tablo 6.2, 6.3 ve 6.4'te verilmiştir. Boru gömlek malzemesinin zemin özellikleri, denklemlerde yer alan RD (Relative Density), yani relatif sıklık esas alınarak hesaplanmıştır (Brinkgreve, Engin, & Engin, 2010).

$$\gamma_{unsat} = 15 + \frac{4*RD}{100} \quad (6.6)$$

$$\gamma_{sat} = 19 + \frac{1.6*RD}{100} \quad (6.7)$$

$$E_{50}^{ref} = \frac{60000*RD}{100} \quad (6.8)$$

$$E_{oed}^{ref} = \frac{60000*RD}{100} \quad (6.9)$$

$$E_{ur}^{ref} = \frac{180000*RD}{100} \quad (6.10)$$

$$G_0^{ref} = 60000 + \frac{68000*RD}{100} \quad (6.11)$$

$$m = 0.7 - \frac{RD}{320} \quad (6.12)$$

$$\gamma_{0.7} = (2 - \frac{RD}{100}) * 10^{-4} \quad (6.13)$$

$$\varphi' = 28 + \frac{12.5*RD}{100} \quad (6.14)$$

$$\Psi = -2 + \frac{12,5*RD}{100} \quad (6.15)$$

$$R_f = 1 - \frac{RD}{800} \quad (6.16)$$

Denklemlerde yer alan

γ_{unsat} : Doygun olmayan birim hacim ağırlık (kN/m³)

γ_{sat} : Doygun birim hacim ağırlık (kN/m³)

φ : İçsel sürtünme açısı (°)

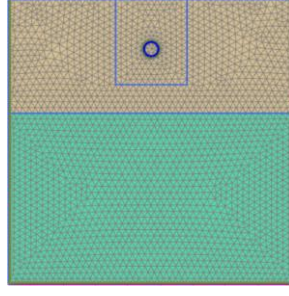
Ψ : Dilatasyon açısı (°)

R_f : Nihai gerilme oranı değerini ifade etmektedir.

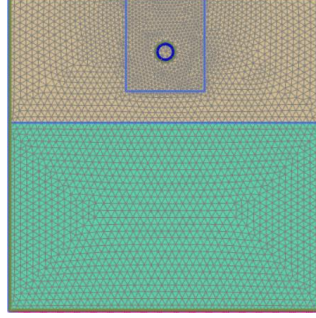
6.4.1. Analizlerde Kullanılan Model Boyutlarının ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısının Belirlenmesi

Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile dinamik analiz yaparken, model boyutlarını ve sonlu elemanlar ağını doğru seçmek gerekir. Literatüre bakıldığında, model derinliği ana kaya tabakasının derinliği göz önünde bulundurularak seçilmektedir (Alzabeebee, 2019a, Alzabeebee, 2019b). Bazı araştırmacılar model genişliğini seçerken, model genişliğinin boru, tünel veya menfez gibi alt yapı elemanlarının genişliğinin minimum 12 katı seçilmesi gerektiğini, yaptıkları çalışmalar sonucunda ifade etmişlerdir (Zhang & Liu, 2018a, Zhang & Liu, 2018b, Alzabeebee, 2019a, Alzabeebee, 2019b). Bazı araştırmacılar ise model genişliğinin model derinliğinin 10 katı kadar seçilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir (Veletsos & Younan, 1994, Psarropoulos, Klonaris, & Gazetas, 2005, Salem, Ezzeldine, & Amer, 2020). Ayrıca, sonlu elemanlar ağının eleman boyutlarını seçerken minimum deprem dalgasını veya maksimum deprem frekansını göz önünde bulundurmak gerekmektedir (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973, Lysmer, Udaka, Tsai, & Seed, 1975, Tsinidis, Pitilakis, & Madabhushi, 2016, Bakr & Ahmad, 2018, Salem, Ezzeldine, & Amer, 2020).

Bu tez çalışması kapsamında, ana kayanın 20 m derinlikte olduğu varsayılarak model derinliği (D) 20 m alınmıştır. Model genişliği (B) ise, literatürdeki çalışmalar ışığında 20 m (Şekil 6.16) ve 200 m (Şekil 6.17) alınarak uygun sonlu elemanlar ağ boyutunda analizler yapılmıştır. Ayrıca, model sınırlarının ve sonlu elemanlar ağ yapısının belirlenmesi kapsamındaki analizler G1B1Y1_MC modeli ve C(10,16) noktasındaki yer değiştirmeler esas alınarak yapılmıştır. Burada G1, %80 sıklıktaki boru gömlek malzemesini, B1, beton boruyu, Y1, yer altı su seviyesinin zemin yüzeyinden 2 m aşağıda olması durumunu ve MC ise Mohr-Coulomb zemin modelini ifade etmektedir. Analiz sonuçları Tablo 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.18. Boyutları $B = 20$ m ve $D = 20$ m olan sıkı sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.19. Boyutları $B = 20$ m ve $D = 20$ m olan daha sıkı sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar ağının belirlenmesi kapsamında yapılan analiz sonuçları Tablo 6.6'da verilmiştir. Tablo 6.6'daki analiz sonuçlarına göre daha sıkı sonlu elemanlar ağı kullanılması durumunda sonuçların değişmediği görülmüştür.

Tablo 6.6. Sonlu elemanlar ağ yapısına göre analiz sonuçları

	Yatay yer değiştirme (U_x , mm)	Düşey yer değiştirme (U_y , mm)	Toplam yer değiştirme (U , mm)
Şekil 6.18 (Sıkı ağ)	166,23	-0,23	166,23
Şekil 6.19 (Daha sıkı ağ)	166,22	-0,23	166,22

Analizlerde kullanılan modelin hem boyut hem de sonlu elemanlar ağının belirlenmesi kapsamında yapılan analiz sonuçlarından yola çıkarak model boyutları, $B = 20$ m ve $D = 20$ m olarak seçilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar ağı eleman boyutları analiz sonuçlarını etkilemeyecek şekilde seçilmiştir.

6.4.2. Analiz Sonuçları

Analizlerde, ilk olarak 36 farklı modelin A(10,20), B(10,17) ve C(10,16) noktalarındaki (Şekil 6.12) yer değiştirme ve boruya gelen normal (N), kesme (Q) ve moment (M) kuvvet

Tablo 6.7. MC zemin modeline ait A noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)
1) G1B1Y1	0,084	-1,793	1,793
2) G1B2Y1	0,081	-1,806	1,806
3) G2B1Y1	0,128	-2,247	2,247
4) G2B2Y1	0,132	-2,260	2,260
5) G3B1Y1	0,201	-2,693	2,693
6) G3B2Y1	0,209	-2,707	2,707
7) G1B1Y2	0,199	-3,989	3,989
8) G1B2Y2	0,211	-4,004	4,004
9) G2B1Y2	0,190	-4,749	4,749
10) G2B2Y2	0,202	-4,765	4,765
11) G3B1Y2	0,000	-5,466	5,466
12) G3B2Y2	0,000	-5,481	5,481

Tablo 6.8. MC zemin modeline ait A noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)
1) G1B1Y1	166,768	-0,737	166,769
2) G1B2Y1	166,763	-0,726	166,764
3) G2B1Y1	166,705	-0,613	166,707
4) G2B2Y1	166,704	-0,603	166,705
5) G3B1Y1	166,654	-0,492	166,655
6) G3B2Y1	166,652	-0,485	166,653
7) G1B1Y2	166,462	-0,345	166,463
8) G1B2Y2	166,466	-0,336	166,467
9) G2B1Y2	166,443	-0,291	166,443
10) G2B2Y2	166,445	-0,283	166,445
11) G3B1Y2	166,421	-0,235	166,421
12) G3B2Y2	166,423	-0,228	166,423

Tablo 6.9. MC zemin modeline ait B noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	0,609	-1,321	1,321	-11,580	-0,005	-3,919
2) G1B2Y1	0,613	-1,357	1,357	-11,403	-0,005	-3,103
3) G2B1Y1	0,589	-1,781	1,781	-11,723	-0,005	-3,950
4) G2B2Y1	0,592	-1,817	1,817	-11,514	-0,005	-3,117
5) G3B1Y1	0,580	-2,246	2,246	-11,879	-0,005	-3,984
6) G3B2Y1	0,584	-2,283	2,283	-11,631	-0,005	-3,133
7) G1B1Y2	0,023	-3,482	3,482	-13,957	-0,007	-4,765
8) G1B2Y2	0,023	-3,524	3,524	-13,744	-0,007	-3,781
9) G2B1Y2	0,027	-4,259	4,259	-14,170	-0,008	-4,815
10) G2B2Y2	0,028	-4,302	4,302	-13,920	-0,007	-3,809
11) G3B1Y2	0,018	-5,003	5,003	-14,397	-0,008	-4,869
12) G3B2Y2	0,015	-5,047	5,047	-14,099	-0,008	-3,840

Tablo 6.10. MC zemin modeline ait B noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	166,199	-0,228	166,199	-12,454	-1,268	-4,176
2) G1B2Y1	166,204	-0,234	166,204	-12,425	-1,273	-3,340
3) G2B1Y1	166,229	-0,232	166,229	-12,941	-1,318	-4,287
4) G2B2Y1	166,234	-0,237	166,234	-12,901	-1,312	-3,436
5) G3B1Y1	166,259	-0,218	166,259	-13,311	-1,389	-4,368
6) G3B2Y1	166,262	-0,222	166,262	-13,264	-1,356	-3,507
7) G1B1Y2	166,241	-0,115	166,241	-13,766	-1,704	-4,707
8) G1B2Y2	166,240	-0,122	166,240	-13,697	-1,657	-3,741
9) G2B1Y2	166,247	-0,125	166,247	-14,217	-1,713	-4,820
10) G2B2Y2	166,246	-0,131	166,246	-14,117	-1,640	-3,831
11) G3B1Y2	166,257	-0,123	166,257	-14,660	-1,647	-4,931
12) G3B2Y2	166,256	-0,127	166,256	-14,518	-1,531	-3,917

Tablo 6.11. MC zemin modeline ait C noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	0,675	-1,320	1,320	-12,067	0,012	-3,884
2) G1B2Y1	0,672	-1,292	1,292	-11,877	0,012	-3,069
3) G2B1Y1	0,636	-1,779	1,779	-12,189	0,013	-3,919
4) G2B2Y1	0,633	-1,751	1,751	-11,967	0,012	-3,087
5) G3B1Y1	0,608	-2,245	2,245	-12,324	0,013	-3,959
6) G3B2Y1	0,605	-2,216	2,216	-12,061	0,012	-3,108
7) G1B1Y2	0,008	-3,481	3,481	-14,744	0,009	-4,694
8) G1B2Y2	0,008	-3,447	3,447	-14,511	0,009	-3,711
9) G2B1Y2	0,016	-4,257	4,257	-14,929	0,010	-4,749
10) G2B2Y2	0,018	-4,223	4,223	-14,657	0,009	-3,744
11) G3B1Y2	0,011	-5,002	5,002	-15,127	0,010	-4,810
12) G3B2Y2	0,010	-4,966	4,966	-14,805	0,009	-3,782

Tablo 6.12. MC zemin modeline ait C noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	166,218	-0,228	166,219	-12,704	-0,298	-4,099
2) G1B2Y1	166,225	-0,229	166,225	-12,649	-0,326	-3,267
3) G2B1Y1	166,238	-0,232	166,238	-12,888	-0,347	-4,187
4) G2B2Y1	166,244	-0,232	166,245	-12,843	-0,375	-3,342
5) G3B1Y1	166,258	-0,218	166,258	-13,035	-0,424	-4,249
6) G3B2Y1	166,264	-0,217	166,264	-12,985	-0,441	-3,395
7) G1B1Y2	166,292	-0,115	166,292	-14,811	-0,924	-4,683
8) G1B2Y2	166,295	-0,119	166,295	-14,654	-0,889	-3,714
9) G2B1Y2	166,290	-0,125	166,290	-15,092	-0,946	-4,781
10) G2B2Y2	166,219	-0,128	166,293	-14,894	-0,897	-3,787
11) G3B1Y2	166,293	-0,123	166,293	-15,351	-0,929	-4,875
12) G3B2Y2	166,296	-0,125	166,296	-15,098	-0,863	-3,855

Tablo 6.13. HS zemin modeline ait A noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)
1) G1B1Y1	0,696	-0,775	0,775
2) G1B2Y1	0,687	-0,787	0,787
3) G2B1Y1	0,771	-0,944	0,944
4) G2B2Y1	0,764	-0,956	0,956
5) G3B1Y1	0,843	-1,125	1,125
6) G3B2Y1	0,831	-1,137	1,137
7) G1B1Y2	0,051	-1,545	1,545
8) G1B2Y2	0,043	-1,561	1,561
9) G2B1Y2	0,036	-1,810	1,810
10) G2B2Y2	0,040	-1,822	1,822
11) G3B1Y2	0,042	-2,070	2,070
12) G3B2Y2	0,042	-2,083	2,083

Tablo 6.14. HS zemin modeline ait A noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)
1) G1B1Y1	169,719	-18	170,649
2) G1B2Y1	169,649	-18	170,580
3) G2B1Y1	170,382	-17	171,258
4) G2B2Y1	170,339	-17	171,212
5) G3B1Y1	170,827	-17	171,661
6) G3B2Y1	170,833	-17	171,668
7) G1B1Y2	169,773	-17	170,626
8) G1B2Y2	169,754	-17	170,606
9) G2B1Y2	169,522	-17	170,339
10) G2B2Y2	169,532	-17	170,351
11) G3B1Y2	169,336	-16	170,125
12) G3B2Y2	169,335	-16	170,125

Tablo 6.15. HS zemin modeline ait B noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	0,868	-0,543	0,543	-11,931	-0,013	-3,973
2) G1B2Y1	0,860	-0,578	0,578	-11,469	-0,012	-3,101
3) G2B1Y1	0,882	-0,736	0,736	-12,180	-0,014	-4,030
4) G2B2Y1	0,873	-0,771	0,771	-11,601	-0,013	-3,125
5) G3B1Y1	0,895	-0,934	0,934	-12,432	-0,015	-4,088
6) G3B2Y1	0,888	-0,969	0,969	-11,730	-0,013	-3,148
7) G1B1Y2	0,006	-1,292	1,292	-14,818	-0,015	-4,946
8) G1B2Y2	0,004	-1,336	1,336	-14,180	-0,013	-3,862
9) G2B1Y2	0,077	-1,582	1,582	-15,263	-0,016	-5,059
10) G2B2Y2	0,002	-1,621	1,621	-14,465	-0,014	-3,924
11) G3B1Y2	0,001	-1,862	1,862	-15,680	-0,017	-5,164
12) G3B2Y2	0,002	-1,902	1,902	-14,718	-0,014	-3,979

Tablo 6.16. HS zemin modeline ait B noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	170,366	-15,654	171,083	-10,894	0,240	-4,004
2) G1B2Y1	170,344	-15,621	171,059	-11,219	0,054	-3,349
3) G2B1Y1	170,512	-15,767	171,240	-10,823	0,280	-4,000
4) G2B2Y1	170,510	-15,731	171,234	-11,177	0,080	-3,357
5) G3B1Y1	170,660	-15,861	171,395	-11,346	0,120	-4,058
6) G3B2Y1	170,663	-15,859	171,398	-11,669	0,088	-3,388
7) G1B1Y2	168,824	-15,577	169,541	-13,471	0,381	-5,026
8) G1B2Y2	168,806	-15,547	169,520	-13,528	0,347	-4,136
9) G2B1Y2	168,686	-15,658	169,411	-13,984	0,612	-5,012
10) G2B2Y2	168,679	-15,656	169,404	-13,909	0,652	-4,095
11) G3B1Y2	168,583	-15,713	169,313	-14,509	0,176	-4,919
12) G3B2Y2	168,566	-15,712	169,297	-14,546	0,203	-4,058

Tablo 6.17. HS zemin modeline ait C noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	0,830	-0,542	0,542	-12,076	0,023	-3,937
2) G1B2Y1	0,820	-0,517	0,517	-11,563	0,021	-3,077
3) G2B1Y1	0,833	-0,734	0,734	-12,266	0,023	-3,995
4) G2B2Y1	0,823	-0,709	0,709	-11,648	0,021	-3,104
5) G3B1Y1	0,840	-0,933	0,933	-12,464	0,024	-4,055
6) G3B2Y1	0,831	-0,906	0,906	-11,737	0,021	-3,132
7) G1B1Y2	0,005	-1,290	1,290	-15,037	0,018	-4,882
8) G1B2Y2	0,003	-1,263	1,263	-14,326	0,016	-3,814
9) G2B1Y2	0,001	-1,580	1,580	-15,393	0,019	-5,000
10) G2B2Y2	0,001	-1,548	1,548	-14,528	0,015	-3,884
11) G3B1Y2	0,001	-1,860	1,860	-15,733	0,019	-5,111
12) G3B2Y2	0,001	-1,828	1,828	-14,715	0,015	-3,947

Tablo 6.18. HS zemin modeline ait C noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	170,291	-15,654	171,008	-13,844	0,285	-4,031
2) G1B2Y1	170,293	-15,620	171,008	-14,079	0,026	-3,353
3) G2B1Y1	170,432	-15,767	171,159	-13,799	0,278	-4,015
4) G2B2Y1	170,447	-15,728	171,171	-14,141	0,071	-3,373
5) G3B1Y1	170,576	-15,861	171,311	-13,755	0,037	-4,085
6) G3B2Y1	170,602	-15,854	171,337	-14,100	0,038	-3,411
7) G1B1Y2	168,755	-15,577	169,472	-17,324	0,115	-4,958
8) G1B2Y2	168,753	-15,544	169,468	-17,553	0,188	-4,090
9) G2B1Y2	168,574	-15,658	169,300	-16,889	0,267	-4,866
10) G2B2Y2	168,580	-15,651	169,305	-17,061	0,418	-3,947
11) G3B1Y2	168,455	-15,713	169,187	-16,384	0,170	-4,724
12) G3B2Y2	168,455	-15,704	169,186	-16,804	0,341	-3,914

Tablo 6.19. HSSS zemin modeline ait A noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)
1) G1B1Y1	0,100	-0,217	0,217
2) G1B2Y1	0,107	-0,227	0,227
3) G2B1Y1	0,106	-0,262	0,262
4) G2B2Y1	0,110	-0,272	0,272
5) G3B1Y1	0,115	-0,309	0,309
6) G3B2Y1	0,119	-0,319	0,319
7) G1B1Y2	0,030	-0,394	0,394
8) G1B2Y2	0,023	-0,406	0,406
9) G2B1Y2	0,014	-0,467	0,467
10) G2B2Y2	0,006	-0,479	0,479
11) G3B1Y2	0,006	-0,542	0,542
12) G3B2Y2	0,005	-0,555	0,555

Tablo 6.20. HSSS zemin modeline ait A noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)
1) G1B1Y1	172,676	-12	173,074
2) G1B2Y1	172,726	-12	173,124
3) G2B1Y1	172,564	-12	172,954
4) G2B2Y1	172,606	-12	172,995
5) G3B1Y1	172,457	-11	172,838
6) G3B2Y1	172,461	-11	172,839
7) G1B1Y2	171,918	-11	172,287
8) G1B2Y2	171,861	-11	172,228
9) G2B1Y2	171,806	-11	172,161
10) G2B2Y2	171,905	-11	172,260
11) G3B1Y2	171,797	-11	172,145
12) G3B2Y2	171,631	-11	171,979

Tablo 6.21. HSSS zemin modeline ait B noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	0,067	-0,108	0,108	-11,773	-0,015	-3,886
2) G1B2Y1	0,067	-0,142	0,142	-11,067	-0,013	-2,993
3) G2B1Y1	0,070	-0,154	0,154	-11,927	-0,015	-3,921
4) G2B2Y1	0,070	-0,189	0,188	-11,110	-0,013	-2,997
5) G3B1Y1	0,072	-0,203	0,203	-12,081	-0,016	-3,955
6) G3B2Y1	0,071	-0,237	0,237	-11,153	-0,014	-3,002
7) G1B1Y2	0,002	-0,276	0,276	-14,349	-0,015	-4,745
8) G1B2Y2	0,002	-0,317	0,317	-13,430	-0,013	-3,647
9) G2B1Y2	0,002	-0,351	0,351	-14,616	-0,016	-4,814
10) G2B2Y2	0,002	-0,392	0,392	-13,555	-0,014	-3,673
11) G3B1Y2	0,002	-0,428	0,428	-14,886	-0,017	-4,885
12) G3B2Y2	0,002	-0,469	0,469	-13,680	-0,014	-3,700

Tablo 6.22. HSSS zemin modeline ait B noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	172,652	-11,299	173,021	-8,723	1,008	-3,150
2) G1B2Y1	172,719	-11,285	173,087	-8,352	1,061	-2,347
3) G2B1Y1	172,569	-11,275	172,937	-8,461	1,116	-3,046
4) G2B2Y1	172,604	-11,264	172,971	-8,171	1,249	-2,278
5) G3B1Y1	172,528	-11,246	172,894	-8,725	0,671	-2,984
6) G3B2Y1	172,527	-11,232	172,892	-8,692	0,561	-2,285
7) G1B1Y2	171,739	-11,203	172,104	-10,462	1,247	-3,631
8) G1B2Y2	171,698	-11,158	172,061	-10,256	1,038	-2,758
9) G2B1Y2	171,676	-11,067	172,032	-10,872	1,120	-3,619
10) G2B2Y2	171,742	-11,088	172,100	-10,320	0,931	-2,707
11) G3B1Y2	171,626	-10,989	171,977	-10,364	1,442	-3,387
12) G3B2Y2	171,467	-10,978	171,818	-9,849	1,035	-2,567

Tablo 6.23. HSSS zemin modeline ait C noktasının statik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm*10 ⁻³)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	0,042	-0,107	0,107	-11,662	0,023	-3,843
2) G1B2Y1	0,042	-0,084	0,084	-10,916	0,019	-2,970
3) G2B1Y1	0,044	-0,153	0,153	-11,808	0,024	-3,877
4) G2B2Y1	0,044	-0,130	0,130	-10,957	0,019	-2,977
5) G3B1Y1	0,044	-0,201	0,201	-11,955	0,024	-3,911
6) G3B2Y1	0,044	-0,178	0,178	-11,000	0,019	-2,984
7) G1B1Y2	0,002	-0,275	0,275	-14,184	0,020	-4,665
8) G1B2Y2	0,002	-0,248	0,248	-13,214	0,015	-3,597
9) G2B1Y2	0,002	-0,350	0,350	-14,437	0,020	-4,731
10) G2B2Y2	0,001	-0,323	0,323	-13,329	0,015	-3,626
11) G3B1Y2	0,002	-0,426	0,426	-14,695	0,021	-4,800
12) G3B2Y2	0,002	-0,399	0,399	-13,448	0,015	-3,656

Tablo 6.24. HSSS zemin modeline ait C noktasının dinamik koşullardaki analiz sonuçları

	Ux (mm)	Uy (mm)	U (mm)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
1) G1B1Y1	172,695	-11,299	173,064	-9,970	0,565	-3,226
2) G1B2Y1	172,773	-11,273	173,141	-9,573	0,369	-2,365
3) G2B1Y1	172,602	-11,275	172,970	-10,147	0,641	-3,214
4) G2B2Y1	172,648	-11,249	173,014	-9,870	0,449	-2,360
5) G3B1Y1	172,565	-11,246	172,931	-9,844	0,325	-3,205
6) G3B2Y1	172,570	-11,215	172,934	-9,834	0,423	-2,430
7) G1B1Y2	171,687	-11,203	172,052	-11,267	0,306	-3,795
8) G1B2Y2	171,653	-11,147	172,014	-10,993	0,550	-2,816
9) G2B1Y2	171,616	-11,066	171,973	-11,337	0,247	-3,748
10) G2B2Y2	171,683	-11,075	172,040	-10,777	0,229	-2,694
11) G3B1Y2	171,571	-10,988	171,922	-11,064	0,698	-3,615
12) G3B2Y2	171,415	-10,966	171,776	-10,405	0,39	-2,602

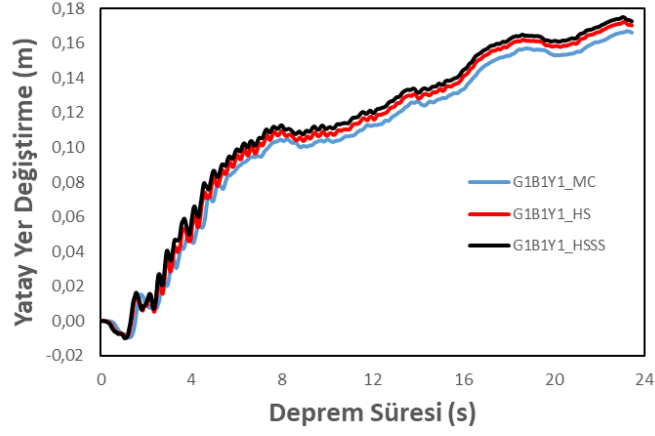
6.4.2.1. Analiz Sonuçlarının Zemin Modeline Göre Karşılaştırması

Analiz sonuçlarının zemin modellerine göre karşılaştırması kapsamında, G1B1Y1, G2B1Y1, G3B1Y1, G1B1Y2, G2B1Y2 ve G3B1Y2 olmak üzere 6 farklı modelin analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Bu sonuçlar, C noktasına göre (Şekil 6.12), yatay yer değiştirme, düşey yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı açısından, Şekil 6.23-40'ta verilmiştir.

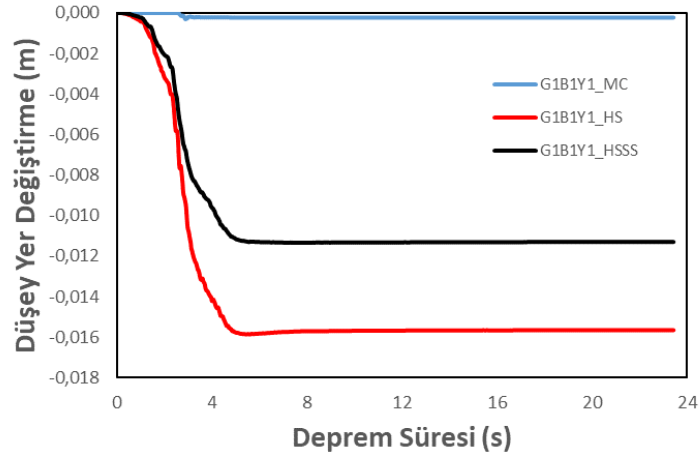
6 farklı modelin analiz sonuçlarına yatay yer değiştirme açısından bakıldığında, HSSS zemin modelinde daha fazla yer değiştirmelerin meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni, HSSS zemin modelinin küçük birim deformasyonları da göz önünde bulundurarak analiz yapmasından kaynaklanmaktadır (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020:83). Ayrıca, analiz sonuçlarının HS ve HSSS zemin modellerinde, MC zemin modeline göre, birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, HS ve HSSS zemin modelleri analizlerinde derinlik boyunca üç farklı rijitlik parametresinin hesaba katılmasıdır (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020:67). MC zemin modelinde ise derinlik boyunca rijitlik parametresi sabit kabul edilip analiz yapıldığı için (Plaxis 2D Materials Manuel, 2020:32) yer değiştirmelerin daha az olduğu görülmektedir.

6 farklı modelin analiz sonuçlarına boşluk suyu basıncı (P_{act}) açısından bakıldığında, HSSS zemin modelinde boşluk suyu basınçlarının MC ve HS zemin modellerine göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, HSSS zemin modelinin, drenajsız koşullardaki analizlerde, kümülatif boşluk suyu basınçlarını oluşturmamasıdır (Brinkgreve, Kappert , & Bonnier, 2007:742, Plaxis 2D Materials Manuel, 2020:93). MC ve HS zemin modeli analiz sonuçlarına bakıldığında ise, HS zemin modelinde daha yüksek boşluk suyu basınçlarının olduğu görülmektedir.

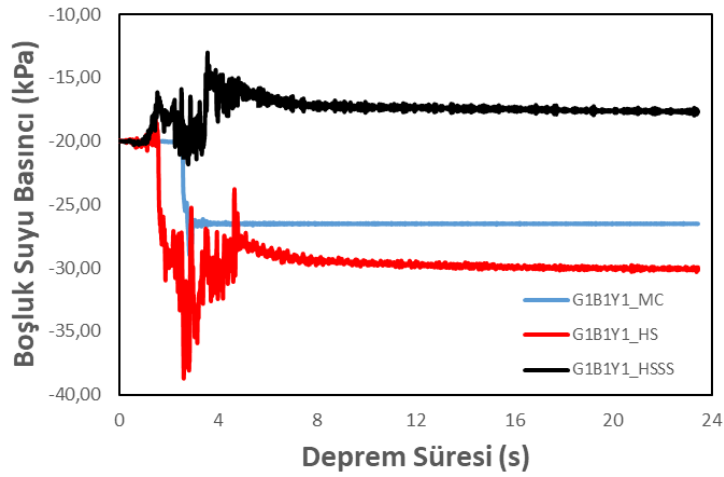
6 farklı modelin analiz sonuçlarına düşey yer değiştirme açısından bakıldığında, MC zemin modelindeki düşey yer değiştirmelerin çok az olduğu görülmektedir. Ayrıca, HS ve HSSS zemin modellerindeki düşey yer değiştirmelerin birbirine yakın olduğu ancak HSSS zemin modelindeki düşey yer değiştirmelerin HS zemin modeline göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yukarıda da ifade edildiği gibi, HSSS zemin modelinin kümülatif boşluk suyu basınçlarını oluşturmamasıdır.



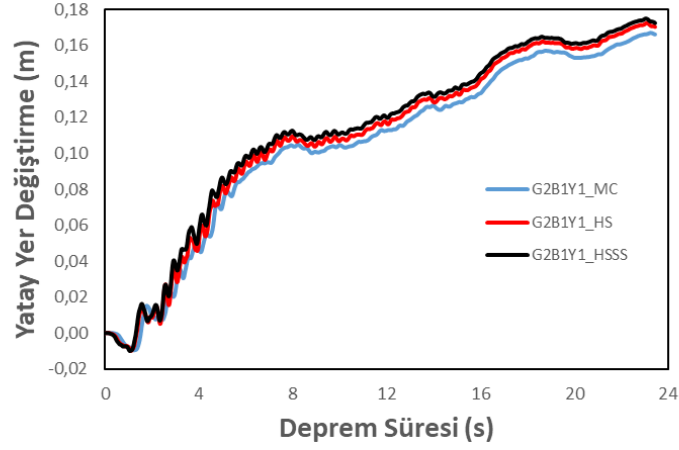
Şekil 6.23. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği



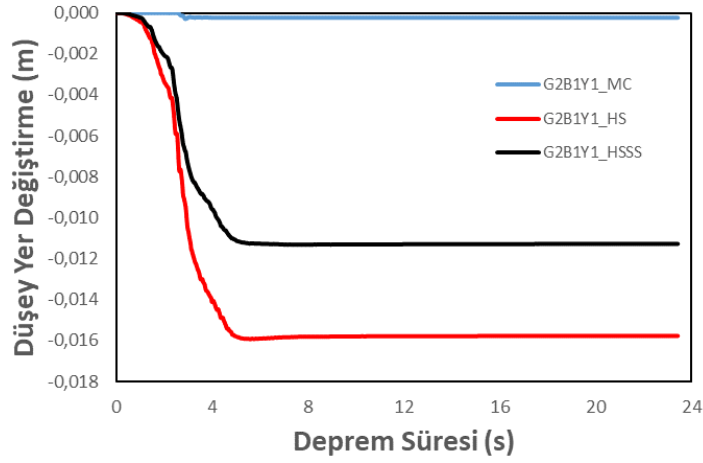
Şekil 6.24. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği



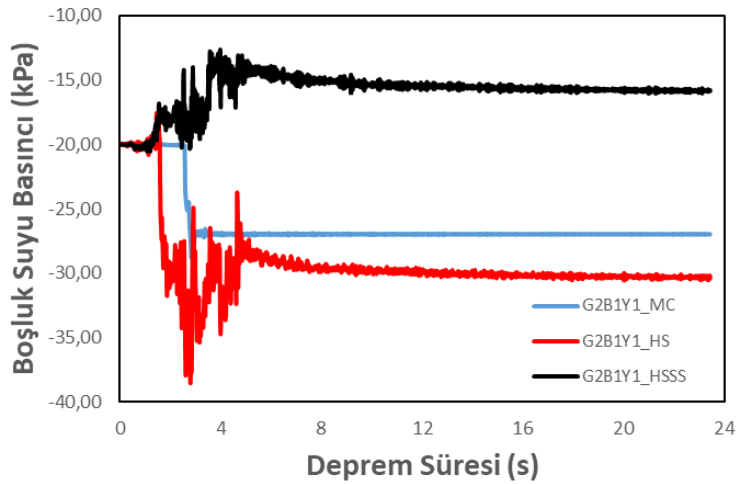
Şekil 6.25. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği



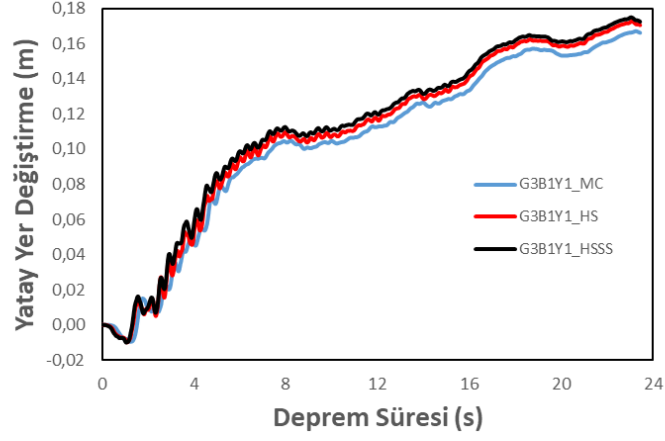
Şekil 6.26. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği



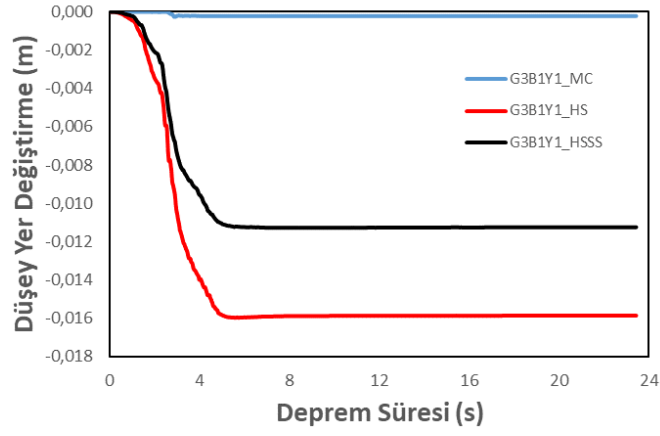
Şekil 6.27. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği



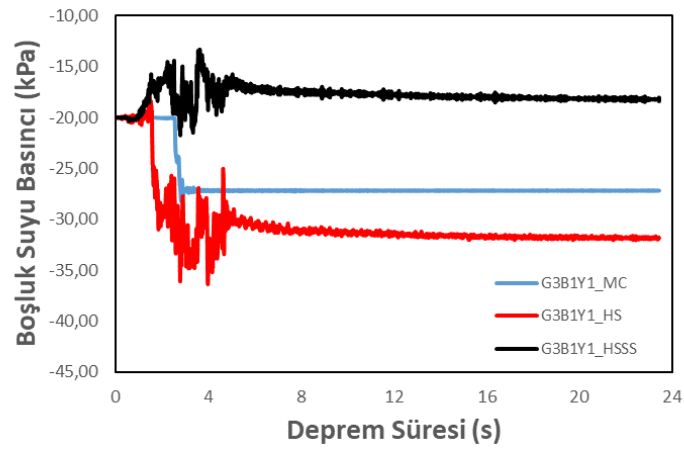
Şekil 6.28. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği



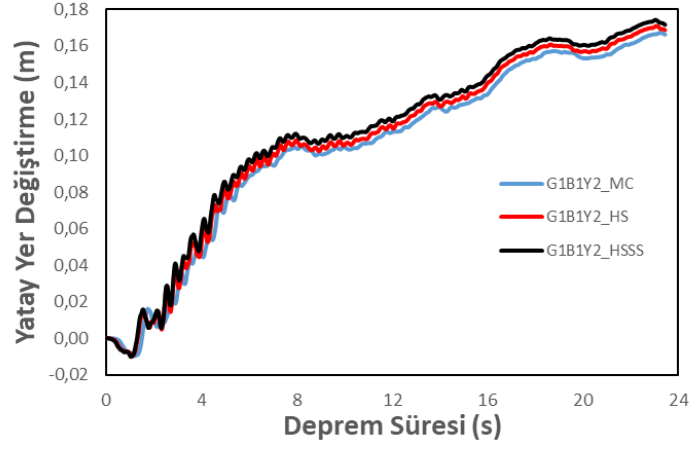
Şekil 6.29. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği



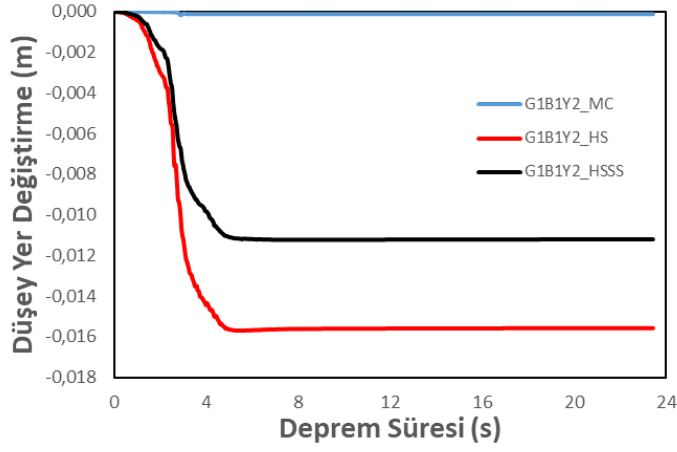
Şekil 6.30. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması dűşey yer değiştirme grafiği



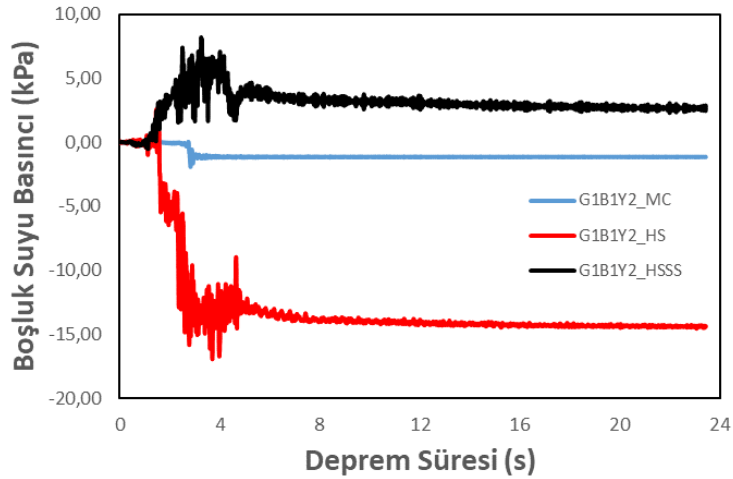
Şekil 6.31. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği



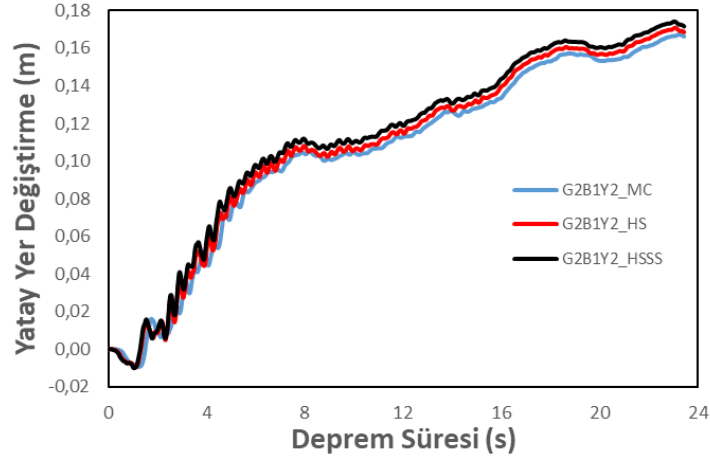
Şekil 6.32. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği



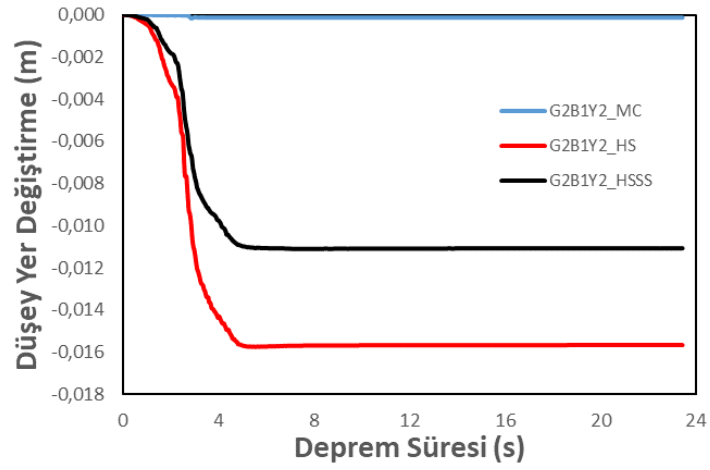
Şekil 6.33. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği



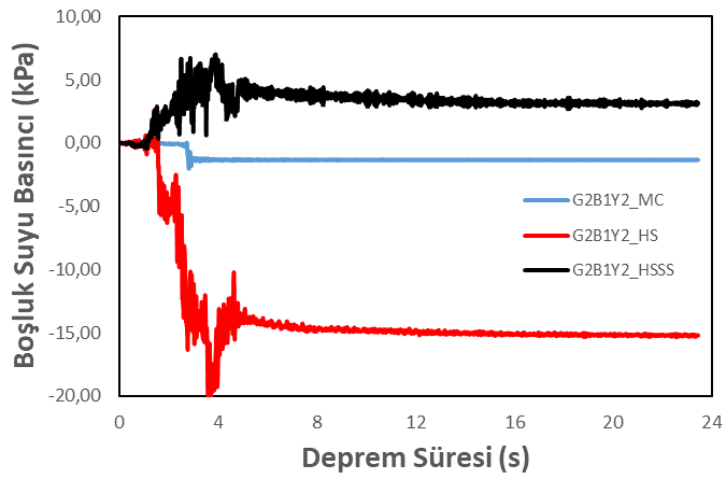
Şekil 6.34. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği



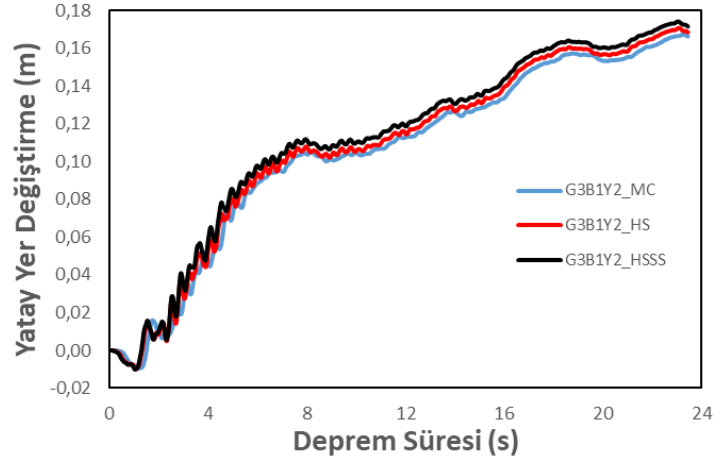
Şekil 6.35. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği



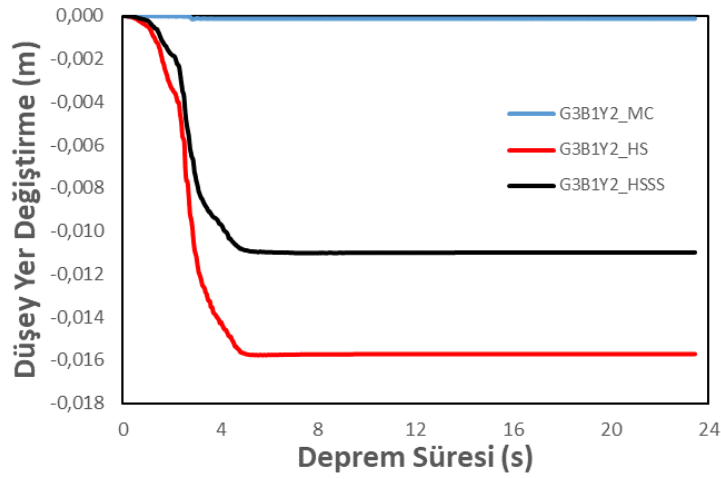
Şekil 6.36. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması dũřey yer değiştirme grafiği



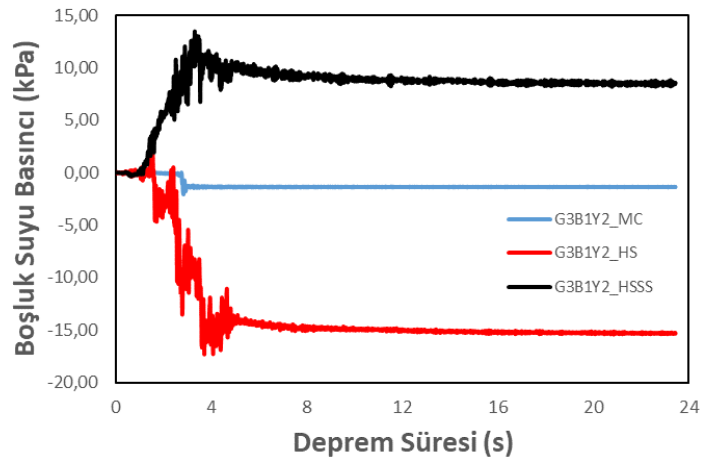
Şekil 6.37. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği



Şekil 6.38. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması yatay yer değiştirme grafiği



Şekil 6.39. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması düşey yer değiştirme grafiği



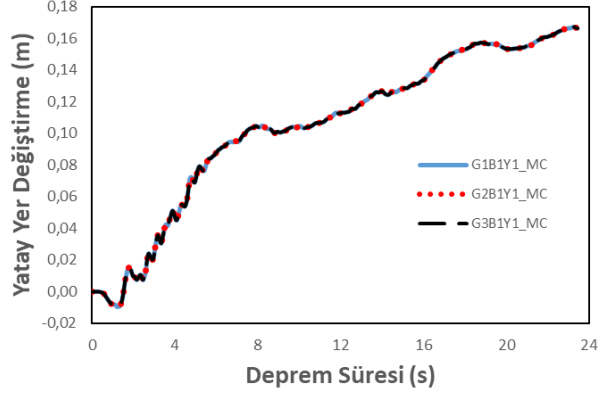
Şekil 6.40. C noktasına göre zemin modeli karşılaştırması boşluk suyu basıncı grafiği

6.4.2.2. Analiz Sonuçlarının Boru Gömlek Malzemesine Göre Karşılaştırması

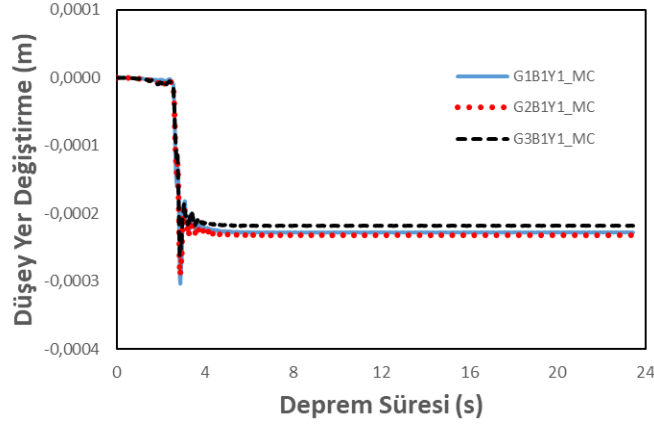
Analiz sonuçlarının boru gömlek malzemesine göre karşılaştırması kapsamında, G1B1Y1, G2B1Y1, G3B1Y1, G1B1Y2, G2B1Y2 ve G3B1Y2 olmak üzere 6 farklı modelin, MC, HS ve HSSS zemin modellerindeki analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Bu sonuçlar, C noktasına göre (Şekil 6.12), yatay yer değiştirme, düşey yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı açısından, Şekil 6.41-58'de verilmiştir.

MC, HS ve HSSS zemin modellerindeki analiz sonuçlarına hem yatay hem de düşey yer değiştirme açısından bakıldığında, boru gömlek malzemesinin sıklığının artmasının üç farklı zemin modelinde de etkisi tam olarak görülmemiştir. Bunun nedeni, boru gömlek malzemesinin rijitliğinin artmasıyla birlikte kütesinin de artmasıdır. Rijitlik ve kütle parametreleri borunun dinamik yükler altındaki davranışında beraber rol oynamaktadır (Plaxis 2D Scientific Manuel, 2020:22). Bunun bir başka sebebi ise, özellikle MC ve HS zemin modellerinde boru gömlek malzemesinin sıklığının artmasıyla birlikte boşluk suyu basınçlarının da artmasıdır.

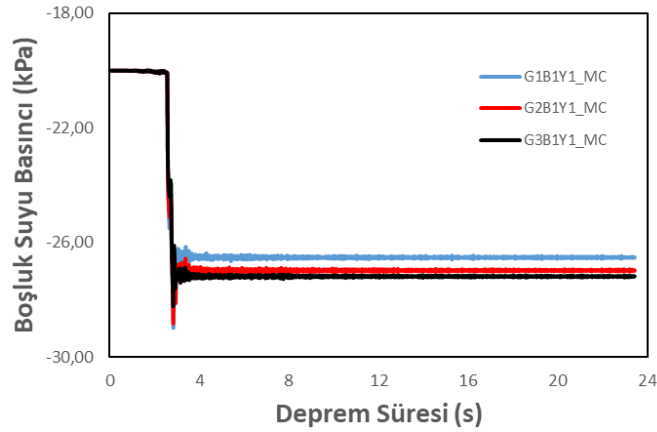
MC, HS ve HSSS zemin modellerindeki analiz sonuçlarına boşluk suyu basıncı açısından bakıldığında, MC ve HS zemin modellerinde boru gömlek malzemesinin sıklığının artmasıyla birlikte boşluk suyu basınçlarının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, sıklığın artmasıyla birlikte aşırı boşluk suyu basınçlarının da (P_{excess}) artmasıdır. HSSS zemin modelinde ise, boru gömlek malzemesinin sıklığının artmasıyla birlikte boşluk suyu basınçlarında düşüş görülmektedir. Bunun nedeni ise, HSSS zemin modelinin kümülatif boşluk suyu basınçlarını oluşturmamasıdır.



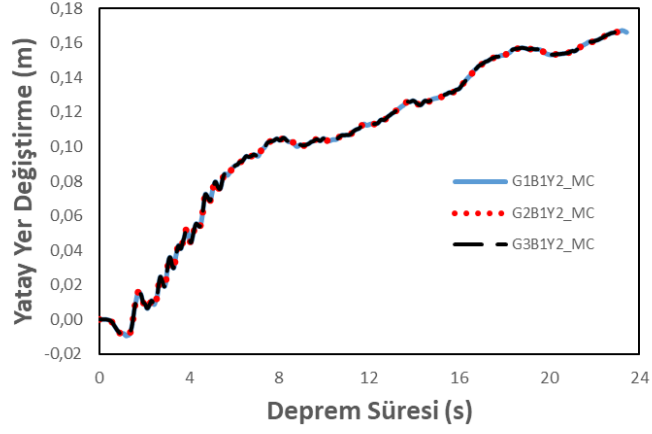
Şekil 6.41. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği



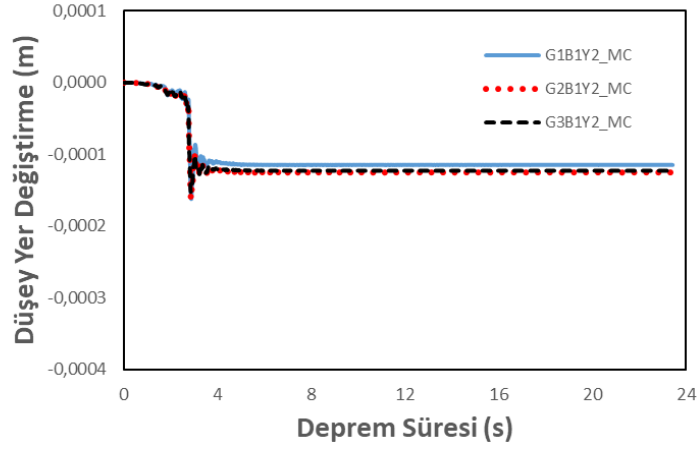
Şekil 6.42. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği



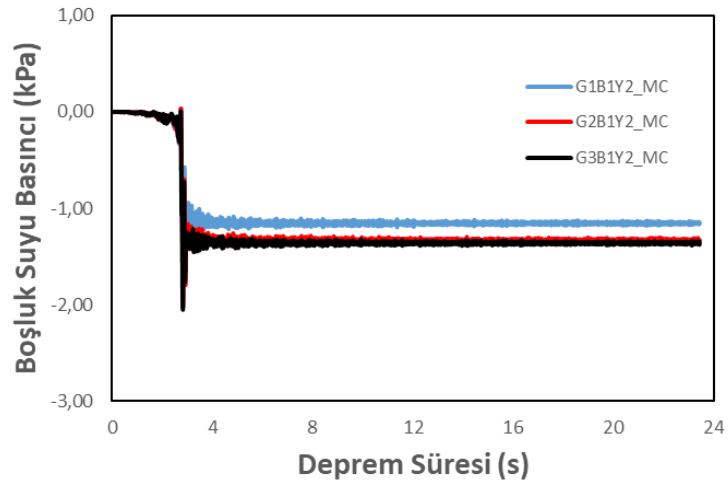
Şekil 6.43. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği



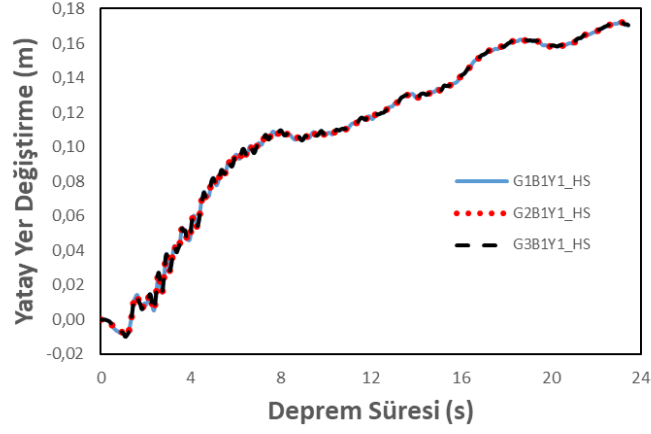
Şekil 6.44. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği



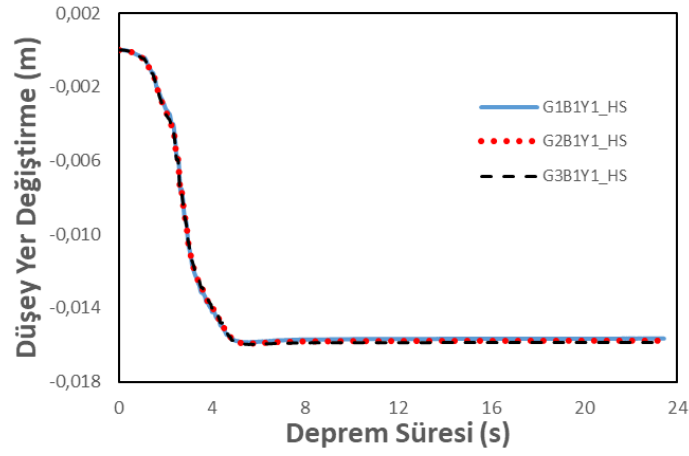
Şekil 6.45. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği



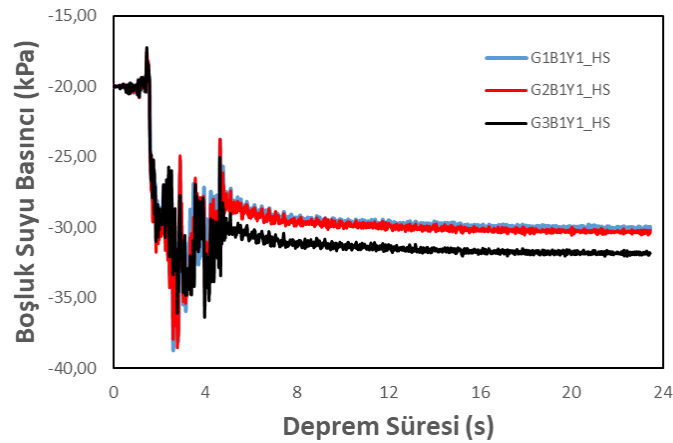
Şekil 6.46. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin MC zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği



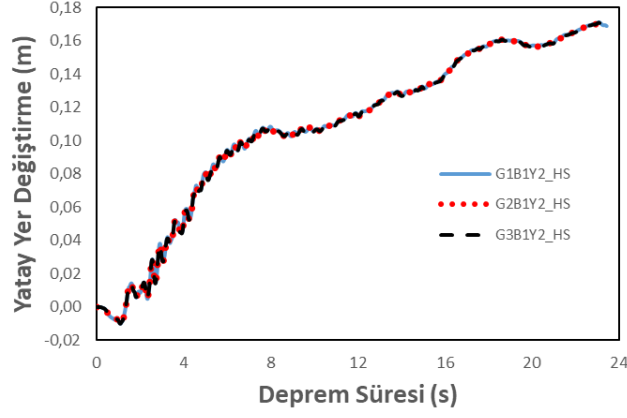
Şekil 6.47. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği



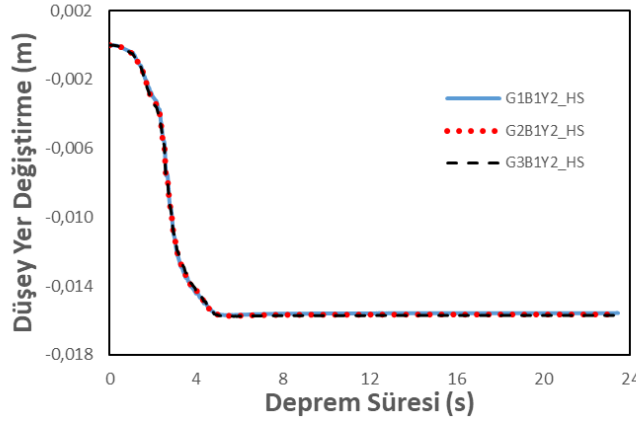
Şekil 6.48. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği



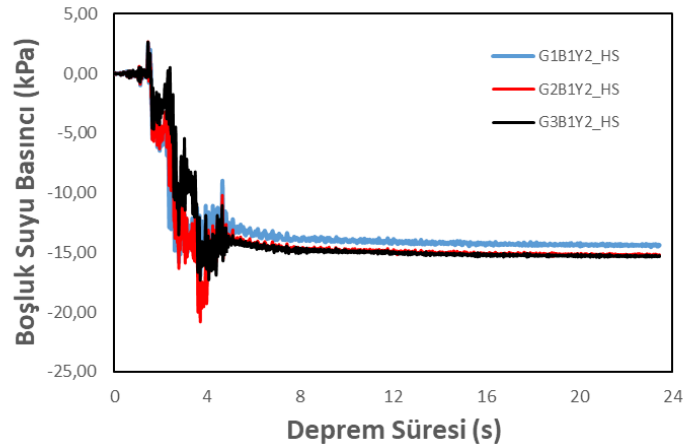
Şekil 6.49. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği



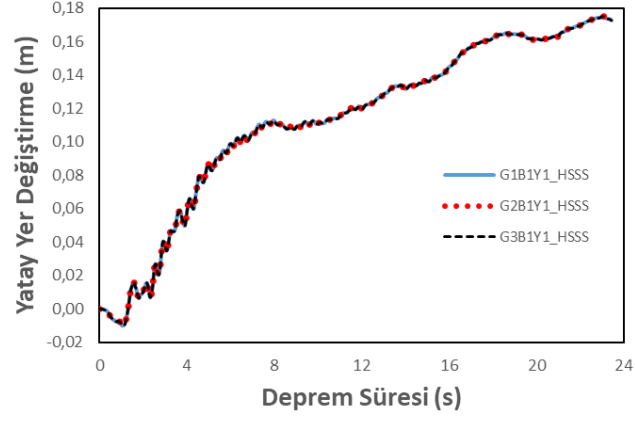
Şekil 6.50. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği



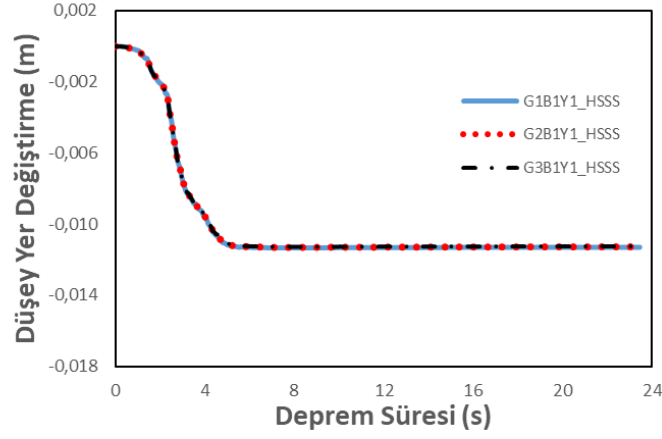
Şekil 6.51. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği



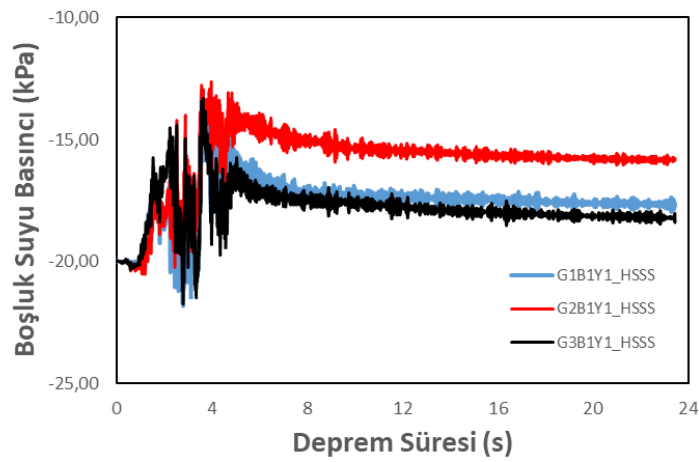
Şekil 6.52. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği



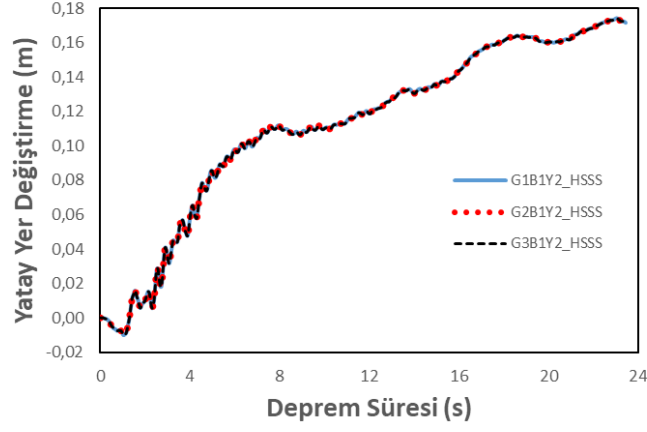
Şekil 6.53. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği



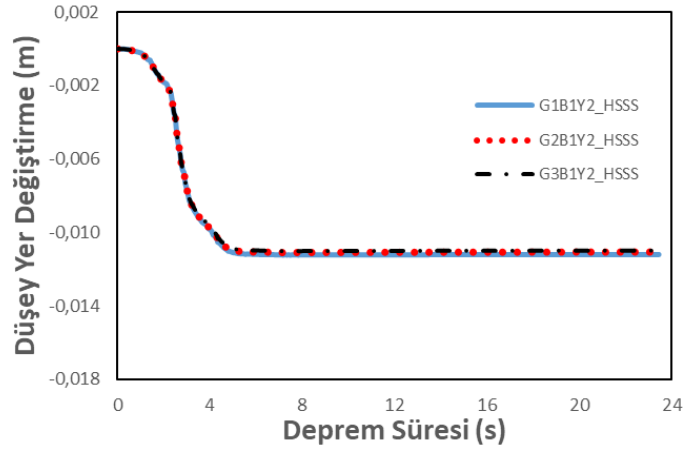
Şekil 6.54. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği



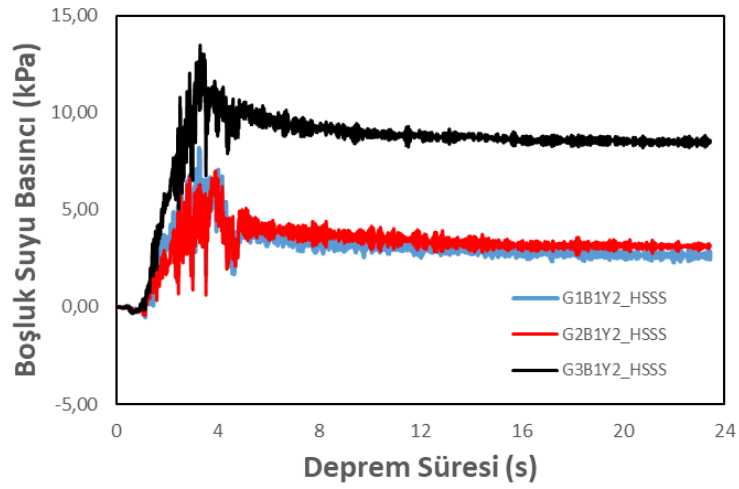
Şekil 6.55. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği



Şekil 6.56. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde yatay yer değiştirme grafiği



Şekil 6.57. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde düşey yer değiştirme grafiği



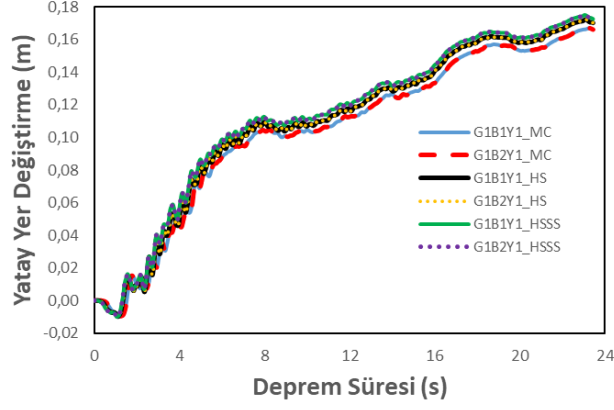
Şekil 6.58. C noktasına göre boru gömlek malzemesinin HSSS zemin modelinde boşluk suyu basıncı grafiği

6.4.2.3. Analiz Sonuçlarının Boru Türüne Göre Karşılaştırması

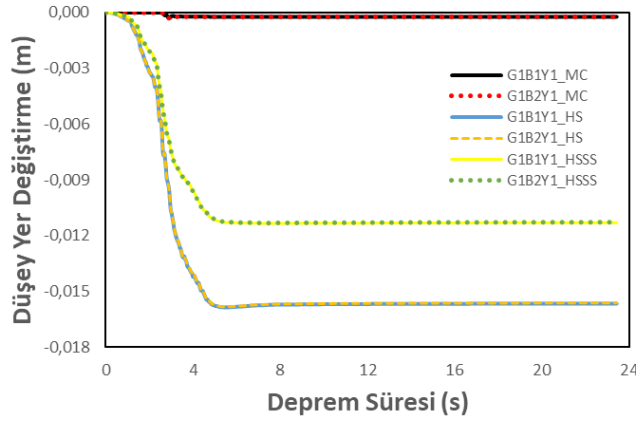
Analiz sonuçlarının boru türüne göre karşılaştırması kapsamında, G1B1Y1, G1B2Y1, G1B1Y2 ve G1B2Y2 olmak üzere 4 farklı modelin, MC, HS ve HSSS zemin modellerindeki analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Bu sonuçlar, C noktasına göre (Şekil 6.12) yatay yer değiştirme, düşey yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı açısından, Şekil 6.59-64'te verilmiştir.

4 farklı modelin analiz sonuçlarına hem yatay hem de düşey yer değiştirme açısından bakıldığında, üç farklı zemin modelinde de boru türünün yatay ve düşey yer değiştirmelere bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

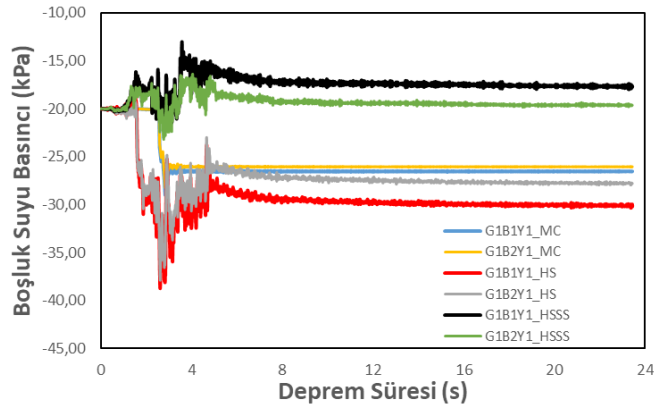
4 farklı modelin analiz sonuçlarına boşluk suyu basıncı açısından bakıldığında, MC ve HS zemin modellerinde borunun rijitliğinin artması daha fazla boşluk suyu basınçlarına neden olmuştur. Bunun nedeni, tezin ikinci bölümünde detaylı bir şekilde ifade edildiği gibi, borunun rijitliğinin artmasıyla birlikte maruz kaldığı yüklerin artmasıdır. HSSS zemin modelinde ise, borunun rijitliğinin artması durumunda daha az boşluk suyu basınçları oluşmuştur. HSSS zemin modelinin kümülatif boşluk suyu basınçlarını oluşturmamasından dolayı MC ve HS zemin modelindeki gibi sonuçlar elde edilememiştir.



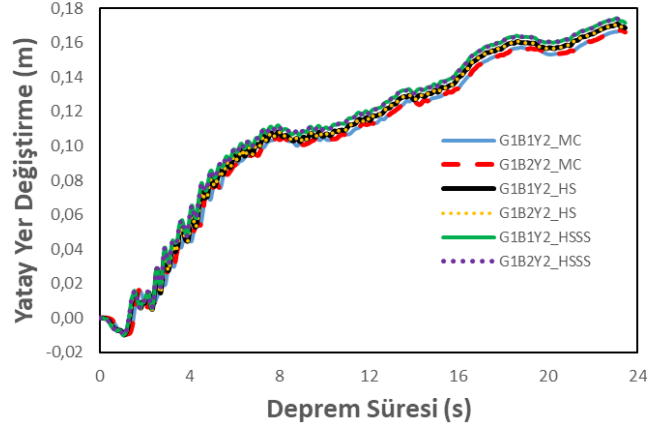
Şekil 6.59. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde yatay yer değiştirme grafiği



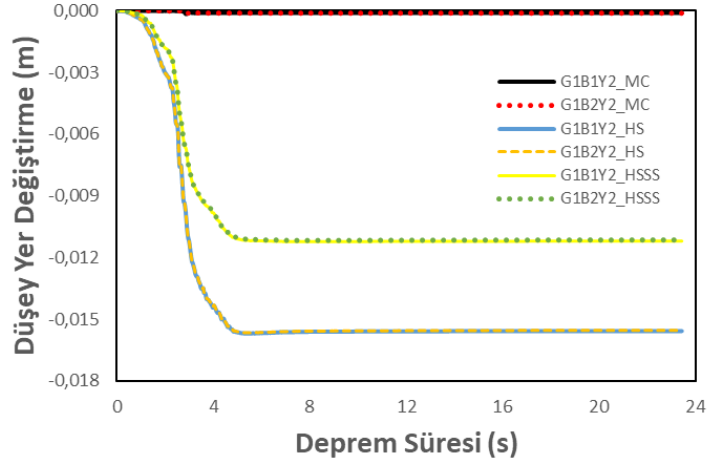
Şekil 6.60. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde düşey yer değiştirme grafiği



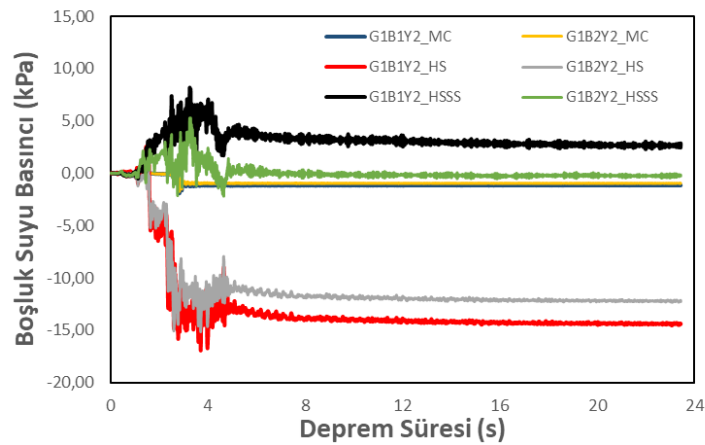
Şekil 6.61. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde boşluk suyu basıncı grafiği



Şekil 6.62. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde yatay yer değiştirme grafiği



Şekil 6.63. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde düşey yer değiştirme grafiği



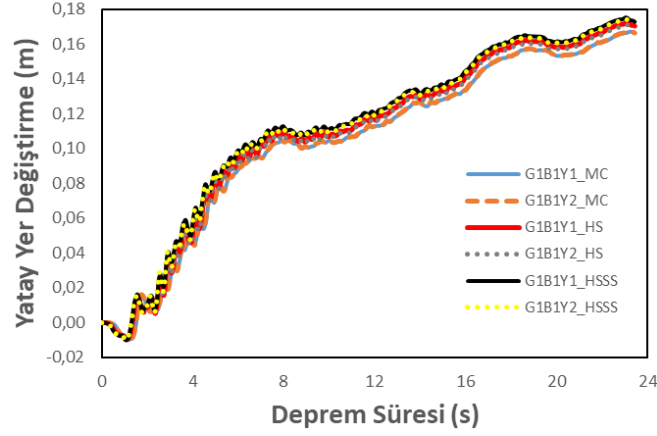
Şekil 6.64. C noktasına göre boru türünün MC, HS ve HSSS zemin modellerinde boşluk suyu basıncı grafiği

6.4.2.4. Analiz Sonuçlarının Yer Altı Su Seviyesine Göre Karşılaştırması

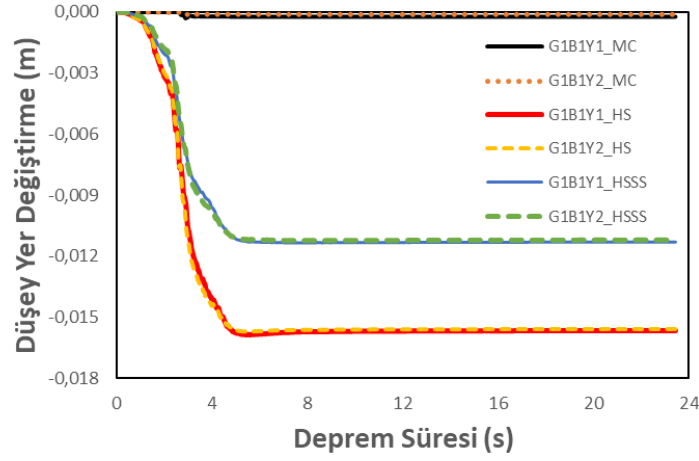
Analiz sonuçlarının yer altı su seviyesine göre karşılaştırması kapsamında, G1B1Y1 ve G1B1Y2 üzere 2 farklı modelin, MC, HS ve HSSS zemin modellerindeki analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Bu sonuçlar, C noktasına göre (Şekil 6.12) yatay yer değiştirme, düşey yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı açısından, Şekil 6.65-67’de verilmiştir.

Analiz sonuçlarına hem yatay hem de düşey yer değiştirme açısından bakıldığında, yer altı su seviyesinin Y1’den (Şekil 6.13) Y2’ye (Şekil 6.14) inmesi durumunda, üç farklı zemin modelinde de yer değiştirmelerin çok az azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, yer altı su seviyesinin ikinci durumda, ilk duruma göre, 8 m daha da aşağıda olmasına rağmen her iki durumdaki boşluk suyu basınçlarının arasındaki farkın çok olmamasından kaynaklanmaktadır (Şekil 6.67).

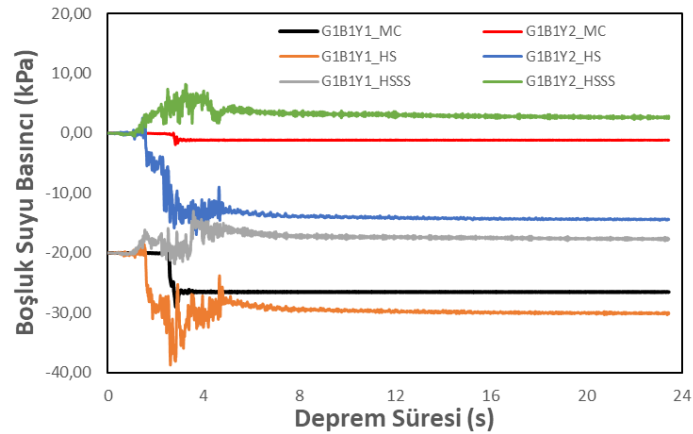
Analiz sonuçlarına boşluk suyu basınçları açısından bakıldığında, yer altı su seviyesinin 8 m daha da aşağıda olması durumunda (Şekil 6.14), üç farklı zemin modelinde de boşluk suyu basınçlarının azaldığı görülmektedir (Şekil 6.67). Ancak, bu azalmanın çok fazla olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, ikinci durumda yer altı su seviyesinin 8 m daha da aşağıda olmasına rağmen, aşırı boşluk suyu basınçlarının (P_{excess}) her iki durumda da birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.65. C noktası için yer altı su seviyesine göre MC, HS ve HSSS zemin modellerinde yatay yer değiştirme grafiği



Şekil 6.66. C noktası için yer altı su seviyesine göre MC, HS ve HSSS zemin modellerinde düşey yer değiştirme grafiği



Şekil 6.67. C noktası için yer altı su seviyesine göre MC, HS ve HSSS zemin modellerinde boşluk suyu basıncı grafiği

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Gömülü borular, günümüzde kırsal alanlarda özellikle şehir bölgelerinde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sebepten, insanoğlu hayatının sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez mühendislik yapılarıdır. Özellikle insan nüfusunun yoğun olduğu şehir bölgelerinde, meydana gelen bir deprem sonrasında gömülü boru hatlarında oluşabilecek hasarlar ve bundan sonra meydana gelebilecek yangın gibi felaketler ciddi kayıplara sebep olabilmektedir. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, gömülü boru hatlarının projelendirilmesi ve tasarımı önem arz etmektedir. Son yıllarda meydana gelen depremlerin üst yapılarda oluşturduğu hasarlardan dolayı, üst yapıların dinamik yükler altındaki davranışı ve tasarımı hakkındaki araştırmalar artmıştır. Ancak literatüre bakıldığında, dinamik yükler altındaki alt yapı sistemleri hakkındaki çalışmalar üst yapı elemanları hakkındaki çalışmalara kıyasla eksik kalmaktadır. Bu bakımdan, inşaat mühendisliği açısından dinamik yükler altında, üst yapıların tasarımı kadar alt yapı sistemlerinin de tasarımı önem arz etmektedir. Kırsal ve özellikle şehir hayatının sürekliliği bakımından, gömülü boru hatları vazgeçilmez mühendislik yapılarıdır. Gömülü boru hatlarının ilk örneklerini eski zamanlarda içme suyu ve kanalizasyon hatları oluştururken, günümüzde bunlara ek olarak petrol, doğalgaz, elektrik, telefon ve drenaj gibi hatlar oluşturmaktadır. Günümüzde gömülü boru hatlarının kullanımının yaygın olmasına bağlı olarak, deprem gibi doğal afetlerde özellikle de şehir hayatının sürdürülebilirliği açısından gömülü boruların tasarımı ve imalatı çok önemlidir. Eğer farklı malzeme özelliklerine sahip gömülü boruların, deprem yüklerine göre farklı zemin koşullarındaki davranışı bilinirse, gömülü boru hatlarının projelendirilmesi ve uygulanabilirliği o derece kolay olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HSSS) olmak üzere üç farklı zemin modeli, beton (rijit) ve PVC (esnek) olmak üzere iki farklı boru cinsi, %80, %90 ve %100 relatif sıkılıkta olmak üzere üç farklı boru gömlek malzemesi ve iki farklı yeraltı su seviyesi tek zemin profilinde modellenerek deprem yükü altındaki analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, zemin modelinin, boru cinsinin, boru gömlek malzemesinin ve yeraltı su seviyesinin gömülü boruların dinamik yük altındaki davranışına etkisini görmek için analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1) Gömülü boruların statik ve dinamik koşullardaki analiz sonuçlarına bakıldığında, dinamik koşullarda gömülü boruların çok daha fazla yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Ayrıca, dinamik koşullarda gömülü boruların daha fazla yüklere maruz kaldığı

görülmüştür. Bundan dolayı, deprem bölgelerinde gömülü boru hatları projelendirilirken hassas çalışmalar yapmak gerekmektedir.

- 2) MC, HS ve HSSS zemin modelleri ile yapılan dinamik analiz sonuçları, yatay yer değiştirme, düşey yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı yönünden değerlendirildiğinde, HS zemin modeli ile yapılan analiz sonuçlarının daha doğru olduğu görülmüştür.
- 3) Boru gömlek malzemesinin sıklığının artması, boruyu çevreleyen gömlek malzemesinin rijitliğini arttırmaktadır. Ancak aynı zamanda, boru gömlek malzemesinin kütlesi ve boşluk suyu basınç değerleri de artmaktadır. Bundan dolayı, boru gömlek malzemesinin sıklığının artmasının borunun dinamik davranışının sonuçlarını değiştirmediği görülmüştür.
- 4) Borunun yapıldığı malzemenin (rijit ya da esnek), borunun yer değiştirmesi üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak, borunun rijitliğinin artmasıyla birlikte boruya etki eden normal, kesme ve moment kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Bu sebepten, deprem bölgelerinde yapılacak olan gömülü boru hatlarında esnek boruların kullanılması daha uygun olacaktır.
- 5) Yer altı su seviyesinin, zemin yüzeyinden 2 m aşağıdaki durumuna göre, 8 m daha da aşağıda olması durumunda boşluk suyu basınçlarında azalma görülmüştür. Ancak, boşluk suyu basınçlarındaki bu azalma çok fazla olmadığı için yatay ve düşey yer değiştirmeler çok az azalmıştır.

KAYNAKÇA

- ACPA.** (2011). *Concrete Pipe Design Manual*. American Concrete Pipe Association .
- Afet Yönetmeliği.** (2009). Alt Yapılar İçin Afet Yönetmeliği .
- ALA.** (2008). American Lifelines Alliance. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipes, by partnership FEMA&ASCE.
- Alzabeebe, S.** (2019a). Response of buried uPVC pipes subjected to earthquake shake. *Innovative Infrastructure Solutions (2019) 4:52, 52-66.*
- Alzabeebe, S.** (2019b). Seismic response and design of buried concrete pipes subjected to soil loads. *Tunnelling and Underground Space Technology.*
- Arıman, T., & Muleski, G.** (1981). A review of the response of buried pipelines under seismic excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 133-152.
- Arpat, E.** (2005). 1999 Kocaeli Depreminde Ana Fay Kırığının Dışında Meydana Gelmiş Olan Deformasyonların Nedenleri. *Deprem Sempozyumu*, (s. 23-25). Kocaeli.
- ASTM D2487.** (2009). ASTM D-2487. *American Society for Testing and Materials*. ABD.
- Attogroup.** (2022). <http://www.attogroup.com/alkat-1-YYN-Nedir.html>
- Babbitt, H., & Baumann, E.** (1958). *Sewerage and Sewage Treatment*. New York: John Willy & Sons Inc.
- Babbitt, H., Donald, J., & Cleasby, J.** (1962). *Water Supply Engineering*. New York: McGraw-Hill Book Comp. Inc.
- Bahadır, A., & Onur, M.** (2017). Derin Kazı Destek Sistemi Tasarımında Zemin Modeli Seçimi. *7. Geoteknik Sempozyumu Kasım 2017*, (s. 583-590). İstanbul.
- Bakr, J., & Ahmad, S.** (2018). A finite element performance-based approach to correlate movement of a rigid retaining wall with seismic earth pressure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 460-479.
- Balkaya, M.** (2001). Çevre Mühendisleri için Yapı Teknolojisi. Samsun.
- Balkaya, N., & Balkaya, M.** (2005). *Atık Su Arıtma Tesislerinde Yapı Malzemeleri ve Ekipmanlar*. İstanbul: Kadıköy Atık Su Arıtma ve Deniz Deşarjı Tesisi Örneği.
- Bardet, J., Idriss, I., O'Rourke, T., Adachi, N., Hamada, M., & Ishihara, K.** (1997). *North America-Japan workshop on the geotechnical aspects of the Kobe, Loma Prieta, and*

- Northridge earthquakes*. Osaka, Japan: A report to National Science Foundation, Air Force Office of Scientific Research, and Japanese Geotechnical Society.
- Brinkgreve, R.** (2002). *Plaxis 2D Finite Element Code for Soil and Rock Analysis Version 8*. Rotterdam.
- Brinkgreve, R., Engin, E., & Engin, H.** (2010). Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands. *7th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, (s. 137-174). Trondheim.
- Brinkgreve, R., Kappert, M., & Bonnier, P.** (2007). Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. *Proc. of Num. Mod. in Geomech., NUMOG X, Rhodes*, 737-742.
- Bull, J.** (1994). *Soil Structure Interaction Numerical Analyses and Modelling*. London: Chapman and Hall.
- Bulson, P.** (1985). *Buried Structures: Static and Dynamic Strength*. London: Chapman and Hall.
- C.P., & L.P.** (2003). *The Performance Pipe Engineering Manual*. Chemical Company .
- Cansız, B.** (2014). İksa Sistemlerinde Köşe Etkisinin İki Boyutlu Sonlu Eleman Analiz Yöntemi İle İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chin, D.** (2012). *Water quality engineering in natural system*. John Wiles and Sons.
- Çelik, F.** (2018). Statik Kazık Yükleme Deneyinin Farklı Zemin Modellerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi ve Arazi Bulgularıyla Karşılaştırılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 182-192.
- Çelik, S.** (2017). Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models' Numerical Estimation of Ground Surface Settlement Caused by Tunneling. *Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.* 7(4), 95-102.
- Damgaard, J.** (2004). *Soil liquefaction around and its implications for pipelines*. Pau, France: In LIMAS, End-User Workshop to Present State-of-the-Art Knowledge.
- Datta, T.** (1999). Seismic response of buried pipeline: a state-of-the-art review. *Nuclear Engineering and Design Elsevier*, 271-284.
- Datta, T., & Mashaly, E.** (1986). Pipeline response to random ground motion by discrete model. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 559-572.

- Davis, G.** (2002). *Improving Natural Gas Safety in Earthquakes*. California: ASCE-25 Task Committee on Earthquake Safety Issues for Gas Systems.
- Demirci, O.** (2021). Gömülü Betonarme Boruların Tasarımı ve Deprem Etkisi Altındaki Davranışları. *İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Eidinger, J.** (1998). Lifelines Water Distribution System in the Loma Prieta Earthquake Performance of the Built Environment-lifelines. *US Geological Survey Professional Paper*, 63-83.
- Erken, A., & Ansal, A.** (1994). Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands, Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes. *In Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (s. 165-170).
- Erken, A., Gülerce, Ü., Balkaya, M., Hatipoğlu, M., Dündar, S., & Kaya, Z.** (2004). An Example for the Effect of Local Soil Condition on Structural Behaviour in Adapazarı. *6th International Congress on Advances in Civil Engineering* (s. 1514-1523). İstanbul : Boğaziçi Üniversitesi .
- Erken, A., Kaya, Z., & Ülker, M.** (2004). Liquefaction in Adapazarı during 1999 Kocaeli earthquake., İstanbul, Türkiye. *In 6th International Congress on Advances in Civil Engineering* (s. 1525-1534). İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi.
- FEMA.** (1999). *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS 99 Technical Manual*. Washington, D.C., ABD: National Institute of Building Science .
- Finn, W., Emery, J., & Gupta, Y.** (1971). Liquefaction of large samples of saturated sand on a shaking table. *In Proceedings of the 1st Canadian Conference on Earthquake Engineering*, (s. 97-110).
- Fırat Pen.** (2008). *Korige Boru Teknik Şartnamesi*.
- G&E Engineering Systems Inc.** (2001). *Seismic fragility formulations for water systems*. American Lifelines Alliance.
- Gümüş, M.** (2009). Farklı Zeminlerdeki Boruların Dinamik Yükler Altında Davranışları. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Hamada, M.** (2002). Revision of Seismic Design Guidelines after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. *Journal of the Society of Civil Engineers*, 2-4.
- Howard, A.** (1996). *Pipeline Installation* . Colorado: Relativity Publishing.

- Ishihara, K., & Li, S.** (1972). Liquefaction of saturated sand in triaxial torsion shear test. *Soils and Foundations*, 19-39.
- Jamieson, G., & Milheizler, J.** (1997). The use of GIS in loss estimation and risk assessment. *In Proc. 29th Joint Meeting of the US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR.*
- Japan Gas Association.** (2000). Recommended Practice for Earthquake-Resistant Design of High Pressure Gas Pipeline.
- JSCE.** (1993). *Japan Society of Civil Engineering.*
- JSCE.** (2001). Japan Society of Civil Engineering . *Earthquake Resistant Design Codes in Japan.*
- Kuhlemeyer, R., & Lysmer, J.** (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 421-427.
- Laman, M., Yıldız , A., Örnek , M., & Demir, A.** (2007). Zeminlerin Mekanik Davranışının Modellenmesi. *XV. Ulusal Mekanik Kongresi*, (s. 583-594). Isparta.
- Lee, D. H., Kim, B. H., Lee, H., & Kong, J. S.** (2009). Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations. *Engineering Structures*, 1011-1023.
- Linsley, R., & Franzini, J.** (1955). *Element of Hydraulic Engineering.* New York: Mc-Graw Hill Book Comp. Inc.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., & Seed, H.** (1975). FLUSH-A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems. *Earthquake Engineering Research Center.*
- Masada, T.** (2000). Modified Iowa Formula for Vertical Deflection of Buried Flexible Pipe. *Journal of Transportation Engineering*, 440-446.
- Miura, K.** (2003). *Dynamic Soil-Structure Interaction.* International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.
- Mohri , Y.** (1995). Damage to buried pipeline due to liquefaction induced performance at the ground by the Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake in 1993. *In Proceedings of First International Conference on earthquake Geotechnical Engineering*, (s. 31-36). Tokyo.
- Moser, A. P.** (2001). *Buried Pipe Design.* Utah, ABD: The McGraw-Hill Companies.
- Muslu, Y.** (1998). *Çözümlü Problemlerle Su Temini ve Çevre Sağlığı .* İstanbul : Su Vakfı.

- O'Rourke, M.** (1995). Seismic Behavior of Buried Pipeline Components: A State-of-the-Art Review. *10th European Conference on Earthquake Engineering*, (s. 2153-2162). Vienna.
- O'Rourke , T., Toprak, S., & Jeon, S.** (1998). Factors Affecting Water Supply Damage Caused by Northridge Earthquake. *Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, (s. 1-12). Seattle, WA.
- O'Rourke, M., Symans, M., & Masek, J.** (2008). Wave Propagation Effects on Buried Pipe at Treatment Plants. *Earthquake Spectra*, 725-749.
- Osmanoğlu, D.** (2007). Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis Programında Analiz Edilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk , İ.** (1996). *Atık Su Ön Arıtma ve Deniz Deşarjı Sistemleri*. İstanbul: İTÜ Rektörlüğü Sayı 1570.
- PAHO.** (1998). Natural Disaster Mitigation in Drinking Water and Sewerage Systems. *Guidelines for Vulnerability Analyses*, 59-64.
- Plaxis 2D General Information Manuel.** (2020). Bentley Communities.
- Plaxis 2D Materials Manuel.** (2020). Bentley Communities.
- Plaxis 2D Reference Manuel.** (2020). Bentley Communities.
- Plaxis 2D Scientific Manuel.** (2020). Bentley Communities.
- Plaxis 2D Tutorials Manuel .** (2020). Bentley Communities.
- Psarropoulos, P., Klonaris, G., & Gazetas, G.** (2005). Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 795-809.
- Ren-Peng, C., Yun-Min , C., & Dao-Shen, L.** (2000). Analysis of Vertical Pressure on Buried Pipeline with Case Study. *Journal of Zhejiang Univesrsity Science*, 414-420.
- Sağlamer , A., & Balkaya , M.** (2003). Gömülü Boru Davranışları. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı* , (s. 26-30). İstanbul .
- Salem, A., Ezzeldine, O., & Amer, M.** (2020). Seismic loading on cantilever retaining walls: Full-scale dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,.

- Samsunlu, A.** (1995). *Deniz Kirliliği ve Kontrolü* . İstanbul: İTÜ Rektörlüğü Gemi İnşaatı ve Denizcilik Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi.
- Sarıkaya , H., & Koyuncu , I.** (1999). Evaluation of the Effects of Kocaeli Earthquake on Water and Wastewater Systems. *International Conference on the Kocaeli Earthquake*, (s. 2-5). İstanbul.
- Seed, H., & Peacock, W.** (1971). Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1099-1119.
- Spangler, M.** (1948). Underground Conduit-An appraisal of Modern Research. *ASCE*, 316-374.
- Spangler, M.** (1966). *Soil Engineering* . Scranton, ABD: International Textbook Company.
- Süperlit.** (2008). *CTP Boru Teknik Şartnamesi*.
- Şendir, S.** (2005). Zemine Gömülü Boruların Sismik Etkiler Altındaki Davranışı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Toprak, H.** (1994). *Atık Su Arıtma Sistemlerinin Tasarım Esasları Cilt 1*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Toprak, S.** (1998). Earthquake Effect on Buried Lifeline Systems. *Ph.D. Thesis Cornell University*. Ithaca.
- Toprak, S.** (2004). Gömülü boru sistemlerinde deprem zararlarının tahmini. *Altıncı Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi* (s. 823-832). İstanbul : Boğaziçi Üniversitesi.
- Toprak, S., & Yoshizaki, K.** (2003). Boru Hatlarına Deprem Yüklerinin Etkisi. 5. *Ulusal Deprem Mühendisliği Kongresi*, (s. 26-30). İstanbul.
- Tsinidis, G., Pitilakis, K., & Madabhushi, G.** (2016). On the dynamic response of square tunnels in sand. *Engineering Structures*, 419-437.
- Tsukamoto , Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Yasuda , S., & Horie, Y.** (2001). Soil properties of the deposits in Adapazari from laboratory tests. . *In XV ICSMGE TC4Satellite Conference*, (s. 275-280). İstanbul.
- Unutmaz , B., Çetin, K., & Gökyay, M.** (2008). Gömülü Yapıların Zemin-Yapı-Deprem Etkileşiminde Basitleştirilmiş Çerçeve Yöntemi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi* (s. 16-17). Konya: Selçuk Üniversitesi.

- Uslu, M.** (1979). *Prefabrike Kanalizasyon Kanalları ve Boru Hatlarının Döşenmesine Ait Talimatlar*. Ankara: Alman Normları DIN 4033.
- Vaslestad, J.** (1991). Load Reduction on Buried Rigid Pipes”,. *10th European Conference on SMFE, Florence*, (s. 771-774).
- Veletsos, A., & Younan, A.** (1994). Dynamic soil pressures on rigid vertical walls. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 275-301.
- Xuan, F., Xia, X., & Wang, J.** (2009). The application of a small strain model in excavations. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 418-422.
- Yasuda, S., Sutani, Y., Suzuki, N., & Isoyama, R.** (2002). Countermeasures of buried steel pipes against surface fault rapture. *US-Japan Seminar on Seismic Disaster Mitigation Urban Area by Geotechnical Engineering*. Alaska.
- Yüzügüllü, Ç., & Birgören, G.** (2003). Depremlerde Altyapı Davranışı ve Oluşan Hasarlar. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, (s. 23-30). İstanbul.
- Zhang, L., & Liu, Y.** (2018a). Seismic responses of rectangular subway tunnels in a clayey ground. *PLOS ONE*.
- Zhang, L., & Liu, Y.** (2018b). Numerical investigations on the seismic response of a subway tunnel embedded in spatially random clays. *Underground Space*, 43-52.