

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ZEMİNLERDEKİ BORULARIN DİNAMİK YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Murat GÜMÜŞ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri

Programı : Deprem Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayfer ERKEN

Eylül 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ZEMİNLERDEKİ BORULARIN DİNAMİK YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Murat GÜMÜŞ
(501051214)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.09.2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 15.09.2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayfer ERKEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Atilla ANSAL (BÜ)
Doç. Dr. Recep İYİSAN (İTÜ)**

EYLÜL 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, farklı zeminlerdeki boruların dinamik yükler altındaki davranışları, yapılan analizler yardımıyla sayısal olarak incelenmiştir.

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve hoşgörüsünü esirgemeyen, destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Plaxis sonlu elemanlar programını öğrenmeme ve kullanmama yardımcı olan değerli dostum Araştırma Gör. Tolga ÖZÜDOĞRU'ya yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Öğrenim hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de teşekkürü borç bilirim.

Eylül 2009

Murat GÜMÜŞ
(İnş. Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. ALTYAPI TESİSLERİ VE BORU HATLARI.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Kullanılan Boru Türleri ve Özellikleri	7
2.3 Boru Hatlarının Tasarımında Etkili Olan Zemin ve Boru Özellikleri.....	10
2.4 Boru Döşeme Yöntemleri ve Yönetmelikler.....	13
2.4.1 Boru döşeme yöntemleri	13
2.4.1.1 Özel boru yerleştirme yöntemleri.....	19
2.4.1.2 Atıksu arıtma tesisleri ve deşarj hatlarında döşeme yöntemleri	20
2.4.1.3 Kazısız boru yerleştirme yöntemleri ve yenileme teknolojileri.....	22
2.4.2 Depreme dayanıklı boru hatlarının tasarımı	23
2.4.2.1 Türk yönetmeliği.....	24
2.4.2.2 Amerikan yönetmeliği.....	26
2.4.2.3 Japon yönetmeliği.....	27
2.5 Sonuç	31
3. BORU HATLARI ÜZERİNE ETKİYEN YÜKLER.....	33
3.1 Giriş.....	33
3.2 Yüklerin Tanımlanması.....	34
3.3 Boru Üzerindeki Dış Yükler ve Yüğü Etkileyen Koşullar.....	35
3.4 Dış Yüklerin Hesaplanması (Marshon Teorisi ve Spangler Teorisi)	37
3.4.1 Marshon yük kabulü	38
3.4.2 Spangler yük teorisi	39
3.5 Zemin Boru Etkileşimleri ve Depreme Göre Modellenmesi	41
3.6 Sonuç	46
4. DEPREMİN BORU HATLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE	
OLUŞABİLECEK HASARLAR.....	47
4.1 Giriş.....	47
4.2 Altyapıların Diğer Yer Üstü Yapılarından Farklılıkları	48
4.3 Hasar Türleri	49
4.4 Hasarlara Neden Olan Faktörler.....	51
4.4.1 Dalga yayılımı.....	52
4.4.2 Fay geçişi davranışı.....	53
4.4.3 Toprak kayması, oturma ve yıpranma.....	54

4.4.4 Sıvılaşma.....	54
4.5 Geçici ve Kalıcı Yer Deformasyonları	56
4.6 Boru Hatlarının Dünyada ve Türkiye’de Oluşan Büyük Depremlerdeki Sismik Davranışları.....	59
4.6.1 Dünyadaki büyük depremler.....	59
4.6.1.1 1900-1970 arası gerçekleşen büyük depremler.....	60
4.6.1.2 1970-1990 arası gerçekleşen büyük depremler.....	61
4.6.1.3 1990 ve sonrası gerçekleşen büyük depremler.....	63
4.6.2 Türkiye’de gerçekleşen büyük depremlerde boru hatlarının durumları.....	65
4.7 Sonuç	68
5. PLAXIS SONLU ELEMENLAR PROGRAMI İLE FARKLI ZEMİNLERDEKİ BORULARIN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ	69
5.1 Giriş	69
5.2 Plaxis Sonlu Elemanlar Programının Tanıtılması	69
5.3 Vaka Analizi.....	74
5.3.1 Kullanılan boru özellikleri	75
5.3.2 Çalışma alanında yer alan zemin koşulları.....	76
5.3.3 Boru döşeme uygulaması	83
5.3.4 Kullanılan deprem kaydı	84
5.3.5 SK-1 Kesitinin plaxis programıyla modellenmesi	86
5.3.5.1 Betonarme boru.....	87
5.3.5.2 CTP boru.....	92
5.3.5.3 HDPE korige boru.....	93
5.3.6 SK-2 Kesitinin Plaxis Programıyla modellenmesi.....	94
5.3.6.1 Betonarme boru.....	95
5.3.6.2 CTP boru.....	100
5.3.6.3 HDPE korige boru.....	101
5.3.7 SK-3 Kesitinin plaxis programıyla modellenmesi	102
5.3.7.1 Betonarme boru.....	104
5.3.7.2 CTP boru.....	109
5.3.7.3 HDPE korige boru.....	110
5.4 Yapılan Analizlerin Karşılaştırılması	111
5.5 Sonuç	119
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	121
KAYNAKLAR.....	123
EKLER.....	129
ÖZGEÇMİŞ.....	149

KISALTMALAR

AÇB	: Asbest Çimento Boru
ALA	: American Lifelines Alliance
ANSI	: American National Standard Institute
API	: American Petroleum Institute
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASME	: American Society of Mechanical Engineers
ASTM	: American Society of Testing and Materials
AWWA	: American Water Works Association
BOTAŞ	: Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş.
CTP	: Cam Takviyetli Polietilen Boru
DN	: Yarıçap
EA	: Normal Rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
FRB	: Fiberglas Lifli
GYD	: Geçici Yer Değiştirme
HAZUS	: Hazards United States
HDPE	: High Density Polietilen Boru
HS	: Pekleşen Zemin Modeli
İDO	: İnce Dane Oranı
İSTON	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikası
İSU	: İzmit Su ve Kanalizasyon İşletmesi
JR	: Eklemlili Kaya Modeli
KYD	: Kalıcı Yer Değiştirme
LADWP	: Los Angeles Department of Water and Power
LE	: Lineer Elastik Model
M	: Manyetüt
MC	: Mohr-Coulomb Modeli
MWD	: Metropolitan Water District
ND	: Nominal Diameter
PVC	: Polivinil Klorid Boru
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
SS	:Yumuşayan Zemin Modeli
SSC	:Yumuşak Zemin Krep Modeli
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UD	: Kullanıcı Tanımlı Model
USGS	: United States Geological Survey
YYS	: Yönlendirilebilir Yatay Sondaj

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Başlangıç Defleksiyonu Limitleri [22]	14
Çizelge 2.2 : Kabul edilebilir boru bölgesi malzemesi sınıflandırması	16
Çizelge 2.3 : Çakıl ve kırmataşlar için maksimum tane büyüklüğü	18
Çizelge 2.4 : İçme ve Kullanma Suyu Tesislerinde Deprem Sonrası Performans Hedefleri [31]	24
Çizelge 2.5 : Atıksu tesislerinde deprem sonrası performans hedefleri [31]	25
Çizelge 2.6 : Sismik bölge katsayısı (v_2) [33].	29
Çizelge 3.1 : Matematik modelin oluşturulması ve sayısal analiz yapılmasındaki kabuller [41]	42
Çizelge 4.1 : Hakkında Bilgi Verilen Büyük Depremler	60
Çizelge 5.1 : Boruların Mühendislik Özellikleri	75
Çizelge 5.2 : SK-1 derinliğe göre SPT N_{30} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri	77
Çizelge 5.3 : SK-2 derinliğe göre SPT N_{30} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri	79
Çizelge 5.4 : SK-3 derinliğe göre SPT N_{60} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri	81
Çizelge 5.5 : Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	84
Çizelge 5.6 : SK-1'deki (1 No'lu Kesitteki) Zemin Parametreleri	86
Çizelge 5.7 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	89
Çizelge 5.8 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	92
Çizelge 5.9 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	93
Çizelge 5.10 : SK-2'deki (2 No'lu Kesitteki) Zemin Parametreleri	94
Çizelge 5.11 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti yatay ve düşey yer değiştirme	97
Çizelge 5.12 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	100
Çizelge 5.13 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	101
Çizelge 5.14 : SK-3'deki (3 No'lu Kesitteki) Zemin Parametreleri	103
Çizelge 5.15 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	106
Çizelge 5.16 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	109
Çizelge 5.17 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme	110
Çizelge 5.18: Deprem sonrası her üç zemin profilinde meydana gelen maksimum yatay ve düşey deplasman değerleri ve deprem sonrası borudaki yer değiştirmeler	112
Çizelge 5.19 : Dinamik yük sonrası borulara etkiyen tesir kuvvetleri	113

Çizelge 5.20 : Kesit-3 Tığcılar'dan alınan kesitte sınır koşulları, depremin etki yeri, seçilen zemin uzunluğu, maksimum ivmeye göre artırılmış deprem kayıtları değiştirilerek yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar.....	117
Çizelge A.1 : Zemin Sınıflandırılması	147

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Esnek boru deneyi ve borunun davranışı [10].	8
Şekil 2.2 : Boruların aşınma miktarını gösteren grafik [19].	9
Şekil 2.3 : Oturmanın (a) rijit ve (b) esnek borular üzerindeki etkisi [15].	11
Şekil 2.4 : Rijit (a) ve Fleksibl (b) boruda yük aktarımı ve borunun yük etkisi altında davranışı [24].	12
Şekil 2.5 : Boru dolgusunun bilimsel adlandırılması [22]	14
Şekil 2.6 : Boru altlarındaki sıkıştırma [22].	16
Şekil 2.7 : Elekten geçen malzeme (%) – Elek açılımı (mm)	17
Şekil 2.8 : Sürekli kaplamalı hendek	20
Şekil 2.9 : Stabilize çimento dolgu biçimi	20
Şekil 2.10 : Sismik Dalga Hızı [33].	28
Şekil 2.11 : Hız Spektrumu [33].	29
Şekil 3.1 : Boru üzerindeki yükler ve basınçlar (Moser)	33
Şekil 3.2 : Boruların deformasyon durumları	36
Şekil 3.3 : Boru üzerine etkiyen yüklerin dağılımı [15]	38
Şekil 3.4 : Spangler hipotezine göre yük dağılımı [15]	40
Şekil 3.5 : Elastik modeldeki kiriş modeli	44
Şekil 3.6 : Düzlem- gerilme modeli	44
Şekil 3.7 : Shell modeli	45
Şekil 3.8 : Hybrid modeli	45
Şekil 4.1 : 1993 Hokkaido – Nansei – Oki depreminde (M=7.8) boru hatlarında görülen hasarlar [40].	50
Şekil 4.2 : Adapazarı su ve atıksu hattında borularda karşılaşılan hasarlar	51
Şekil 4.3 : Boruda fay kırığı hareketi sonucu oluşan buruşma	53
Şekil 4.4 : Düzce depremi sonrası E5 karayolunda meydana gelen toprak kayması.	54
Şekil 4.5 : Çamurlu yüzeyde yüzen iki boru hattının havadan görünüşü. (Damgaard,2004)	55
Şekil 4.6 : Depremin oluşturduğu KYD sonucunda zemin boru etkileşimi [42].	57
Şekil 4.7 : İzmit'te deprem sonrası demiryolu hattındaki KYD	57
Şekil 4.8 : Farklı zemin ayrılma modelleri.	59
Şekil 4.9 : Boru deformasyonuna bağlı yer hareketi.	59
Şekil 5.1 : Zemin Sondajlarının Yerleri (Dilovası Organize Sanayi Bölgesi)	75
Şekil 5.2 : SK-1 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri.	78
Şekil 5.3 : SK-2 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri.	80
Şekil 5.4 : SK-3 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri.	82
Şekil 5.5 : Tipik Hendek Kesiti.	83
Şekil 5.6 : İzmit E-W artçı depremi hastane kaydı ivme-zaman grafiği.	85
Şekil 5.7 : Sonlu Elemanlar Ağı - SK1	87
Şekil 5.8 : Dinamik yük sonrası zeminde oluşan gerilmeler (SK-1) (Toplam maksimum yer değiştirme: 0.24 m)	88
Şekil 5.9 : SK-1 Zemin Profilinde yatay yer değiştirme (0,239m)	90

Şekil 5.10 : SK-1 Zemin Profilinde düşey yer değiştirme (0,013m).....	90
Şekil 5.11 : Boruda Meydana Gelen Yatay Yer değiştirme hareketi (SK-1).....	91
Şekil 5.12 : SK-1 zemin kesitindeki beton boruda meydana gelen toplam yer değiştirme (0,23m)	91
Şekil 5.13 : Sonlu Elemanlar Ağı – SK-2	95
Şekil 5.14 : Dinamik yük sonrası zeminde oluşan gerilmeler (SK-2) (Toplam yer değiştirme : 0.115m)	96
Şekil 5.15 : SK-2 Zemin Profilindeki yatay yer değiştirmeler (0,115m)	98
Şekil 5.16 : SK-2 Zemin Profilindeki düşey yer değiştirmeler (0,001m)	98
Şekil 5.17: Boruda Meydana Gelen Yatay Yer değiştirme hareketi (SK-2).....	99
Şekil 5.18: SK-2 zemin kesitindeki beton boruda meydana gelen toplam yer değiştirme (0,114m)	99
Şekil 5.19 : Sonlu Elemanlar Ağı – Kesit-3	104
Şekil 5.20 : Dinamik yük sonrası zeminde oluşan gerilmeler (SK-3) (Toplam yer değiştirme: 0.374m)	105
Şekil 5.21: SK-3 Zemin Profilinde yatay yer değiştirme (0.372m)	107
Şekil 5.22: SK-3 Zemin Profilinde düşey yer değiştirme (0.037m).....	107
Şekil 5.23 : Boruda Meydana Gelen Yatay Yer değiştirme hareketi (SK-3).....	108
Şekil 5.24 : SK-3 zemin kesitindeki beton boruda meydana gelen toplam yer değiştirme (0.345m)	108
Şekil A.1 : Zeminde oluşan düşey efektif gerilmeler (Maks. düşey efektif gerilme : 287,25 kN/m ²)	129
Şekil A.2 : Zeminde oluşan yatay efektif gerilmeler (Maks. yatay efektif gerilme : 287,02kN/m ²)	129
Şekil A.3 : Boruda Meydana Gelen Düşey Yer değiştirme hareketi (SK-1)	130
Şekil A.4 : SK-1 kesitinde yer alan beton boruda oluşan aksenal kuvvetler (30.56 kN/m).....	130
Şekil A.5 : SK-1 kesitinde yer alan beton boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.82 kN/m).....	131
Şekil A.6 : SK-1 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eğilme momentleri (7.92 kNm/m)	131
Şekil A.7 : SK-1 kesitinde CTP boruda oluşan aksenal kuvvetler (30.45 kN/m)	132
Şekil A.8 : SK-1 kesitinde CTP boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.79 kN/m)	132
Şekil A.9 : SK-1 Kesitinde CTP boruda oluşan eğilme momentleri (7.31 kN.m/m)	133
Şekil A.10 : SK-1 kesitinde HDPE boruda oluşan aksenal kuvvetler (19.59 kN/m).....	133
Şekil A.11 : SK-1 kesitinde HDPE boruda oluşan kayma kuvvetleri (2.34 kN/m)	134
Şekil A.12 : SK-1 kesitinde HDPE boruda oluşan eğilme momentleri (4.34 kNm/m)	134
Şekil A.13: Zeminde oluşan düşey efektif gerilmeler (Maks. düşey efektif gerilme : 682,55 kN/m ²).....	135
Şekil A.14 : Zeminde oluşan yatay efektif gerilmeler (Maks. yatay efektif gerilme : 244,42 kN/m ²)	135
Şekil A.15 : Boruda Meydana Gelen Düşey Yer değiştirme hareketi (SK-2)	136
Şekil A.16: SK-2 kesitinde yer alan beton boruda oluşan aksenal kuvvetler (41.56 kN/m)	136
Şekil A.17 : SK-2 kesitinde yer alan beton boruda oluşan kayma kuvvetleri (9.40 kN/m).....	137

Şekil A.18 : SK-2 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eğilme momentleri (10.30 kN.m/m).....	137
Şekil A.19 : SK-2 kesitinde CTP boruda oluşan aksenal kuvvetler (46.97 kN/m).....	138
Şekil A.20 : SK-2 kesitinde CTP boruda oluşan kayma kuvvetleri (18.51 kN /m).....	138
Şekil A.21 : SK-2 Kesitinde CTP boruda oluşan eğilme momentleri (12.19 kN.m/m).....	139
Şekil A.22 : SK-2 kesitinde HDPE boruda oluşan aksenal kuvvetler (25.50 kN/m).....	139
Şekil A.23: SK-2 kesitinde HDPE boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.08 kN/m).....	140
Şekil A.24 : SK-2 kesitinde HDPE boruda oluşan eğilme momentleri (5.67 kN.m/m).....	140
Şekil A.25 : Zeminde oluşan düşey efektif gerilmeler (Maks. düşey efektif gerilme : 293,08 kN/m ²)	141
Şekil A.26 : Zeminde oluşan yatay efektif gerilmeler (Maks. yatay efektif gerilme : 278,22 kN/m ²)	141
Şekil A.27 : Boruda Meydana Gelen Düşey Yer değiştirme hareketi (SK-3)	142
Şekil A.28 : SK-3 kesitinde yer alan beton boruda oluşan aksenal kuvvetler (24.81 kN/m).....	142
Şekil A.29 : SK-3 kesitinde yer alan beton boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.07 kN/m).....	143
Şekil A.30 : SK-3 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eğilme momentleri (5.98 kN.m/m).....	143
Şekil A.31 : SK-3 kesitinde CTP boruda oluşan aksenal kuvvetler (24.74 kN/m)..	144
Şekil A.32 : SK-3 kesitinde CTP boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.05 kN/m)	144
Şekil A.33 : SK-3 Kesitinde CTP boruda oluşan eğilme momentleri (5.94 kN.m/m).....	145
Şekil A.34 : SK-3 kesitinde HDPE boruda oluşan aksenal kuvvetler (16.58 kN/m).....	145
Şekil A.35 : SK-3 kesitinde HDPE boruda oluşan kayma kuvvetleri (2.14 kN/m).....	146
Şekil A.36 : SK-3 kesitinde HDPE boruda oluşan eğilme momentleri (3.65 kN/m).....	146

SEMBOL LİSTESİ

a	: Boruyla hendek arası mesafe
α	: Şekil değiştirme transfer katsayısı
α_R ve β_R	: Rayleigh katsayısı
α ve β	: İntegrasyon parametreleri
B_c	: Boru dış çapı
B_d	: Boru üzerindeki hendek genişliği
β	: Boru hattı fay hattı arasındaki açı
C	: Titreşim katsayısı
$c_0, \dots, c_7$	: İntegrasyon parametreleri
C_D	: Hendek yük katsayısı
d	: Duvar kalınlığı
D	: Boru çapı
D_1	: Deformasyon gecikme faktörü,
e	: Doğal logaritma tabanı
e	: Pasif direnç modülü
E	: Young Modülü
E	: Boru malzemesinin elastisite modülü
E'	: Zemin reaksiyon modülü
E_{oed}	: Tek boyutlu bir zemin fonksiyonu olarak tanımlanan rijitlik
ε	: Boru hattının düz kısımlarında izin verilen boru şekil değiştirmesi
ε_{G1}	: Uniform bir zeminin şekil değiştirmesi
ε_{G2}	: Ana kayanın eğimli olması durumunda zeminin şekil değiştirmesi
ε_{G3}	: İki noktanın farklı yer değiştirmesi nedeni ile oluşan şekil değiştirme
ε_{v1}	: Zemin tabakasının ana kayaya paralel olması durumunda düz boruda şekil değiştirme
ε_{v3}	: Ana kayanın eğimli olması durumunda düz boruda şekil değiştirme
F	: Yük vektörü
g	: Yerçekimi
H	: Boru tepesinden itibaren gömme derinliği
H	: Yüzey tabakasının derinliği
I	: Boru cidarı atalet momenti
I_p	: Plastisite İndisi
K	: Yataklanma açısına bağlı olarak değişen yataklanma sabiti
K	: Rijitlik matrisi
K	: Rankine toprak basınç katsayısı
K	: Zemin doğal periyoduna bağlı katsayı
K_1	: Eksenel yönde zemin yay katsayısı
k_h	: Yatay permeabilite katsayıları
k_v	: Düşey permeabilite katsayıları
K_{oh}	: Ana kayada sismik şiddet
L	: Dalga boyu
M	: Kütle matrisi

M	: Manyitüt
n	: Dügüm noktası
P	: Yük
q	: Boru ve zemin arasındaki kayma azalma katsayısı
Q_m	: Aşınan boru kalınlığı
R	: Ortalama boru yarıçapı
R_I	: Hybrid modelinde iç bölgeler
R_{II}	: Hybrid modelinde dış bölge
S	: Rijit borunun etrafına yapmış olduğu dolgunun oturması,
S_v	: Spektral hız
t	: Et kalınlığı
T	: Zeminin doğal periyodu
u	: Yer değiştirme vektörü,
u'	: Hız
u''	: İvme
U_h	: Zeminin yer değiştirmesi
U_x	: Yatay Yer değiştirme
U_y	: Düşey Yer değiştirme hareketi
V	: Dalga hızı
V_s	: Kayma dalgası hızı
V_p	: Azaltılmış dalga hızı
v₁	: Önem katsayısı
v₂	: Sismik bölge katsayısı
v	: Poisson oranı
w	: Eleman ağırlığı
W	: Boru üzerindeki dolgu yükü
W_c	: Borunun birim uzunluğuna gelen yük
W_L	: Boru üzerine etkiyen trafik yükü
W_L	: Likit Limit
W_n	: Doğal su muhtevası
W_p	: Plastik Limit
z	: Boru hattı derinliği
δ	: Toprağın birim ağırlığı
δ	: Zemin basıncı etkisi altında fleksible borunun düşey eğilmesi
γ	: Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı
φ	: Zemin içsel sürtünme açısı (°),
u'	: Dolgu ve hendek arasındaki sürtünme katsayısı
Δx	: Borunun yatay deformasyonu
ψ	: Genleşme (Dilatasyon) açısı
λ_k	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
λ_n	: Zeminin doğal birim hacim ağırlığı
θ	: Ana kayanın eğim açısı
λ₁	: Zemin yüzeyindeki sismik dalgaların dalga boyu
Δt	: Zaman aralığı
ρ	: Kütle

FARKLI ZEMİNLERDEKİ BORULARIN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

ÖZET

Son yıllarda yaşanan büyük deprem felaketlerinde yaşananlar yapıların sismik tasarımı ve sismik etkiler altındaki davranışı ile ilgili araştırmaları arttırmıştır. Fakat yapılan araştırmaların birçoğu üst yapılarla ilgili olup altyapılarla ilgili araştırmalar sınırlı kalmaktadır. Oysaki ülkemizde ve dünyada meydana gelen depremlerde altyapı tesisleri ve boru hatları ciddi hasarlar görmektedir. Altyapıların en önemli iletim aracı olan borular su, atıksu ve doğalgazların taşınmasında kullanılırlar ve şehrin hayat damarlarını oluştururlar. Yeraltındaki boruların deprem bölgelerindeki projelendirilmesi ve imalatı, çok önemli bir mühendislik çalışması gerektirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, özellikle deprem bölgelerinde inşa edilecek gömülü boruların projelendirilmesinde, depremde hasar oluşup oluşmayacağını öngörmek ve gerektiği takdirde önlem alabilmektir. Bu amaçla zemin problemleri için geliştirilen sonlu elemanlar yazılımıyla analizler yapılmaktadır. Bu sayede yer altı yapılarından olan boru hatlarının deprem sırasındaki davranışların öngörmek amaçlanmaktadır. Boru hatlarını çevreleyen zemin koşullarını ve boru malzeme niteliklerini dikkate alarak gömülü boruların sismik davranışı incelenebilmektedir.

Farklı zeminlerde boru hatlarının dinamik yük altındaki davranışı inceleyebilmek için Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Vaka analizi için deprem bölgesinde yer alan 3 farklı noktadan zemin kesiti alınmıştır. Alınan her üç zemin kesitine üç farklı boru malzemesi yerleştirilerek gerçekleşen 13.09.1999 tarihinde gerçekleşen İzmit artçı Depremi kaydı ile boru davranışları incelenmektedir.

Sonuç olarak yapılan çalışma ile zayıf zeminlerin dinamik yükleme sonrası daha fazla yer değiştirme yaptığı gözlenmektedir. Esnek boruların ise rijit borulara oranla gelen yükleri aktarabildikleri görülmektedir.

BEHAVIOUR OF PIPES IN DIFFERENT SOIL CONDITIONS UNDER DYNAMIC LOADS

SUMMARY

After the big earthquake effects, researches have been increased related with seismic design and behaviour of seismic response under the earthquake loads. All these researches are generally related with superstructures. However; after the big earthquakes in the world and in our country; infrastructures like plants and pipelines get more damage. Pipelines which supply water, wastewater and gas are very important for the city life which are called lifelines. In the earthquake regions, design and application of buried pipes needs more engineering performance.

The purpose of this study is to predict the damages after the earthquakes especially design of the construction of buried pipes in the earthquake zones, if necessary to take prevention before. For this purpose, finite element program which is developed for the soil problems used for analyses. Purpose is to view the behaviour of the buried pipelines after the earthquake with this analyses. Condition of soil around pipe and pipe material parameters are considered to study for these buried pipes seismic behaviour.

Plaxis finite element program has been used for the analyse the behaviour of the buried pipelines in different soil conditions. For the case study, three different soil section selected from the earthquake zone. Three different kinds of pipe behaviours have been analysed under the 13.09.2009 İzmit aftershock earthquake data of three different type of pipe has been laid to these three sections.

As a result after this case study indicated that after the dynamic loads pipes under bad soil conditions are displaced more. Flexible pipes have transferred the loads more than that has been seen in the rigid pipe.

The results show more displacements develop around the pipes as the soil conditions become worse.

1. GİRİŞ

Depremlerde altyapı sistemlerinde meydana gelen zararlar gerek ekonomik gerekse toplum yaşamı açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Son yıllarda yerleşim bölgelerine yakın gerçekleşen büyük depremler bu gerçeği bir çok kez göstermiştir. Meydana gelen depremler sonrasında; deprem büyüklüğü, deprem odağına uzaklık, yerel zemin koşulları gibi parametrelere bağlı olarak gerek bina gibi üst yapı sistemlerinde ve gerekse alt yapı sistemlerinde hasarlar oluşmaktadır. Bu güne kadar deprem sonucu oluşan üst yapı hasarları çok sayıda araştırmacı ve mühendis tarafından incelenmiş ve halen araştırmalara devam edilmektedir. Ancak altyapı tesisleri ve önemli bir uzantısı olan boru hatlarının gerek hasar durumu ve gerekse olası deprem riskleri yeterince araştırılmamıştır. Fakat oluşan hasarların büyüklüğü ve kentlerde bu sebeple meydana gelen sorunlar boru hattı sistemlerinin yapılırken depreme güvenli tasarlanmasını ve mevcut sistemlerinde deprem performanslarının önceden değerlendirilmesi gerekliliğini gündeme getirmiştir. Son dönemlerde ise yeraltındaki boru sistemlerinin deprem etkisi altında davranışları geçmiş depremlerdeki gözlemler, teorik ve teknolojik ilerlemeler ve analizler ile daha anlaşılır hale gelmiştir. Deprem sonucu borularda oluşacak hasarlar zemin kesitlerindeki farklılıklara göre çeşitlik göstermektedir. Dinamik yükler zeminler farklı davranışlar sergilediği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Dinamik yükler altında farklı zeminlerle yapılan çalışmalardan bazıları zeminlerin deprem yükleri altında davranışlarının incelemiştir [1]. Ansal ve Erken, 1987'de yapmış oldukları çalışmada depremlerde yerel zemin şartlarının öneminden bahsetmişlerdir [2].

Erzincan Ekisu'da yapılan vaka çalışmasında siltli zeminlerin dinamik davranışı incelemiştir [3]. Bütün bu çalışmalar zeminlerin dinamik yükler altında davranışlarına yönelik çalışmalar olmuşlardır. Zeminlerle ilgili olarak zeminlerin doğrusal olmayan davranışları vaka analizleriyle incelenmiştir [4]. Yine son yıllarda sivilaşma ve taşıma gücü kaybı sonucu oluşan oturmaları kapsayan vaka analizleri de yapılmıştır [5]. Yapılan çalışmalarda genelde farklı tip zeminlerdeki üst yapıların dinamik yükler altındaki davranışları analiz konusu olmuştur. 1975 yılında Newmark

ve Hall tarafından büyük fay hareketlerinin gömülü boru hatları üzerindeki etkileri için analiz prosedürleri geliştirmiştir [6]. Boru hatlarının sismik davranışı ile ilgili ilk detaylı çalışma tarafından yapılmıştır [7]. Çeşitli depremler için boru hatlarının yapısal tasarımını incelemişlerdir [8]. Boru hatlarına deprem yüklerinin etkisi araştırılmıştır [9]. Depremlerde altyapı davranışı ve oluşan hasarlara bildiri konusu olmuştur [10]. Deprem bölgelerinde gömülü boru davranışları da incelenmiştir [11].

Bu tezde deprem sonrası farklı zeminlerde yer alan farklı boru malzemesinden yapılmış hatların performansları incelenmektedir. Dinamik yükleme sonrası farklı zeminlerdeki boruların deprem performansının belirlenebilmesi için örnekler verilmekte ve yapılan vaka analizi ve bunlara ilişkin karşılaştırmalar ve değerlendirilmeler belirtilmektedir.

Çalışmanın amacı özellikle deprem bölgelerinde inşa edilecek gömülü boruların projelendirilmesinde, depremde hasar oluşup oluşmayacağını öngörmek ve gerektiği takdirde önlem alabilmektir. Ayrıca kullanılacak boru malzemelerinin seçiminin ne kadar önemli olabileceği hakkında fikir edinebilmektir.

İkinci bölümde altyapı tesisleri ve boru hatları hakkında genel bilgiler verilmektedir. Altyapılarda kullanılan boru türleri ve özellikleri anlatılmaktadır. Boru hatlarının tasarımında etkili olan zemin ve boru özelliklerinden bahsedilmektedir. Farklı boru döşeme yöntemleri ve dünyada depreme dayanıklı olarak boru hatları tasarımıyla ilgili yönetmeliklerden bahsedilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise boru hatları üzerine etkiyen yükler tanımlanmıştır. Boru üzerine etkiyen dış yükler ve yükü etkileyen koşullardan bahsedilmiştir. Dış yüklerin hesabında kullanılan Marshon ve Spangler yük kabulleri anlatılmıştır. Zemin boru etkileşimleri ve boru hatlarının depreme göre modellenmesi hakkında bilgiler ve örnekler verilmektedir. Çalışmanın dördüncü bölümünde ise depremin boru hatları üzerindeki etkileri ve oluşabilecek hasarlar anlatılmıştır. Altyapıların diğer yer üstü yapılarından farklılıklarından bahsedilmektedir. Depremler sonucunda boru hatlarında oluşan hasar türleri hakkında bilgi verilmektedir. Oluşan hasarlara neden olan faktörler; dalga yayılımı, fay geçişi davranışları, toprak kayması, oturma ve yıpranma, sıvılaşma, geçici ve kalıcı yer değiştirme hususları örneklerle anlatılmaktadır. Dünyada ve Türkiye’de gerçekleşen geçmiş büyük depremlerde boru hatlarında meydana gelen hasarlar anlatılmaktadır.

Çalışmanın beşinci bölümünde vaka analizi yapılmaktadır. İlk olarak Plaxis sonlu elemanlar programı tanıtılmaktadır. Vaka analizinin yapıldığı yapıldığı yerle ilgili bilgiler verilmektedir. Analizde kullanılacak borulara ait malzeme özelliklerden bahsedilmektedir. Çalışma alanında yer alan zemin koşulları anlatılmaktadır. Boru döşeme uygulaması tekniği ve çalışmada uygulanan tip kesit verilmektedir. Dinamik yükler için kullanılan depreme ait ivme-zaman kaydı verilmektedir. Çalışmada kullanılan zemin özellikleri verilerek yapılan modelleme hakkında bilgiler verilmektedir. Yapılan analiz sonucunda zeminlerde ve borularda meydana gelen yer değiştirmeler verilmektedir. Boruda meydana gelen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momentleri değerleri verilerek elde edilen sayısal değerler karşılaştırılmaktadır.

Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve önerilerde bulunmaktadır.

2. ALTYAPI TESİSLERİ VE BORU HATLARI

2.1 Giriş

Altyapı, insan ve şehir hayatının devamlılığı için ihtiyaç duyulan bütün yapılara verilen tanımdır. Bir ülkenin özellikle ekonomik büyüme ve kalkınması açısından önemli olduğu kabul edilen temel hizmetlerden biri altyapı hizmetleridir. Günümüzde altyapıların son derece önemli işlevleri olduğu aşıkardır. Son zamanlarda dünyanın gündeminde yer alan Nabucco Projesi çok büyük bir dogalgaz boru hattı taşımacılığı projesi olup çok önemli sosyo-ekonomik içeriklere sahiptir. HAZUS97'nin tanımına göre altyapı tarifine giren elemanlar, ulaşım ve hizmet Sistemleri başlıkları altında iki grupta toplanmıştır. Ulaşım sistemine, karayolu ulaşım sistemi, demiryolu ulaşım sistemi, hafif raylı ulaşım sistemi, otobüs ulaşım sistemi, iskele ve liman yapıları, feribot ulaşım sistemi ve hava limanları dahildir. Hizmet sistemlerinde ise içmesuyu, atıksu, doğalgaz, enerji, elektrik ve telekomünikasyon sistemleri yer almaktadır [12]. Hizmet sistemi içerisinde yer alan kanalizasyon hatları, drenaj kanalları, su kanalları, gaz hatları, telefon ve elektrik hatları, menfezler, petrol boru hatları, metro tünelleri, ısı dağıtım hatları, atıksu arıtma tesisleri ve deşarj hatları gibi pek çok amaç için kullanılırlar [13]. Bunlardan altyapı sistemleri içinde yer alan boru hatları petrol, doğalgaz, su ve atıksu gibi insan hayatında önemli yer tutan malzemelerin iletiminde temel rol oynamaktadır. Bu çalışmada ele alınan altyapı hizmetleri ise, yeraltındaki boru hatları üzerine olacaktır. Bu altyapılar su, atıksu, enerji, yakıt, telekomünikasyon gibi ihtiyaçların kaynağından kullanılacakları yere olan iletimi için gerekli olan yapılardır. Altyapılar yerleşim yerlerinde sağlıklı bir yaşamın sürdürülebilmesi için gereklidirler. Örneğin; yerleşime içmesuyu sistemleri ile verilen sular kullanıldıktan sonra atıksu olarak kanalizasyon sistemleri ile uzaklaştırılırlar. Yağışla gelen sular ise yağmursuyu olarak farklı kanallarda toplanması gerekmektedir. Arıtılan atıksular göl, deniz, dere gibi alıcı ortamlara verilir. Bütün bu hizmetler boru hatları ile yapılabilir. Boru hatları, kullanım alanlarının genişliği düşünüldüğünde bir yerleşim bölgesinin can damarını oluşturmaktadır. Boru hatları, genellikle toprak altına döşenen boru

sistemi ve bununla ilgili sanat yapılarından oluşur. Ulaşılması zor alanlara su iletiminin kolay olması taşıdıkları suya tat, koku ve renk vermemeleri nedeniyle tercih edilirler [14,15]. Bu sistemlerin herhangi bir nedenden dolayı hasar görmemesi ve oluşan hasarın veya arızanın acilen giderilmesi gerekmektedir. Özellikle doğal afet durumlarında içme suyu ihtiyaçlarının karşılanması, pis suların çevreye ve insanlara zarar vermemesi için altyapı tesislerinin çalışır durumda olması gerekir. Ancak deprem durumunda içmesuyu ve kanalizasyon boru hatlarının hasarı çok irdelenmemektedir. Oysaki meydana gelen her depremde altyapı tesisleri ve boru hatları ciddi hasarlar görmektedir. Elektrik veya suyun kesilmesi, şehir yaşamını felce uğratar; bu yüzden meydana gelebilecek büyük ekonomik kayıplara ilaveten, halk sağlığı tehlikeye girer ve devamında şehirden göç bile başlar [10]. Altyapıların depremlerle ilişkisi ise son yıllardaki depremlerin altyapılar üzerindeki etkisi ve sosyal yaşamın bundan oldukça fazla etkilenmesi üzerine önemli bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle ABD ve Japonya altyapıların deprem esnasındaki davranışları konusunda en çok tecrübeye ve araştırmaya sahip iki ülkedir. ABD'de altyapı hasarının ehemmiyeti, ilk defa 1906 San Francisco depremindeki deprem sonrası yangınla anlaşılmıştır. Bu dünyadaki sayılı büyük depremde, doğalgaz dağıtım şebekesindeki hasar nedeniyle çıkan yangınlarda, itfaiye binaları kullanılamaz hale gelmiş ve kent yaşamı için gerekli bütün su yangın söndürme işlerinde kullanılmıştır. 1906 depremi hem ABD hem de diğer bütün dünya ülkeleri için depremlerde altyapının önemini bir kere daha vurgulamıştır. Bunun sonucu olarak, 1933 Long Beach Depreminde doğalgaz vanalarının depremde otomatik olarak kapatılması ve muhtemel yangınların önlenmesi sağlanmıştır. 1971 San Fernando depreminde ise daha başka altyapı sistemleri hasara uğramıştır (elektrik, su, yıkılma tehlikesi atlatan bir baraj, doğalgaz dağıtım şebekesi ve acil yardım tesisleri, hastaneler) . Altyapıların deprem davranışı konusundaki araştırmalar ABD'de bilhassa 1971 San Fernando depreminden sonra hızlanmış ve yoğunlaşmıştır. Böylece Altyapıların deprem davranışı , tamir ve takviyeleri konusunda epeyce yol alınmıştır. Buna rağmen 17 Ekim 1989 Loma Prieta ve 17 Ocak 1994 Northridge Kaliforniya Depremlerinde daha az da olsa altyapı hasarları meydana gelmiştir [16]. Türkiye'de ise 90'larda meydana gelen 1992 Erzincan, 1995 Dinar depremlerinin dışında meydana gelen depremlerin çoğunluğu kırsal yöreleri etkilemiştir, o yüzden depremlerde gerçek anlamda altyapı davranışına ait veri miktarı çok kısıtlıdır. Fakat daha sonra gerçekleşen 1999 Kocaeli Depreminde

altyapılar oldukça etkilenmiştir. 2000’li yıllarda bu konuda yapılan çalışmalarda oldukça artmıştır.

2.2 Kullanılan Boru Türleri ve Özellikleri

Günümüzde yeraltındaki borular; su ve drenaj kanalları, kanalizasyon hatları, gaz, ve petrol boru hatları, telefon ve elektrik hatları, menfezler, metro tünelleri, ısı dağıtım hatları, atıksu arıtma tesisleri ve deniz deşarj hatları gibi farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Medeniyetin varoluşundan bugüne kadar insanlar yaşam kalitesini yükseltmeye çalışmıştır. Bu tip su ve atıksu sistemi yapılarının eski medeniyetlere ait kalıntıları Asya, Avrupa ve Amerika kıtalarında bulunmuştur. Eski Pers kalıntıları ortaya çıkarıldığında, düzlüklerdeki şehirlere su getirmek amacıyla dağların altından kazılmış yer altı tünelleriyle karşılaşmıştır. Ortaçağda da Paris, Londra gibi merkezi şehirlerde tuğla kaplamalı atıksu kanalları inşaa edilmiştir. Boru teknolojisi, ortaya çıkan sorunlarla geliştirilmiş ve günümüze kadar gelmiştir. Borular için malzeme seçiminde yapılırken iletilecek akışkanın türü, sıcaklık ve basıncı etkilidir.

Bugünkü çağdaş toplum seviyesine gelinceye kadar yaşanan evrim sürecinde altyapıda, ihtiyaca ve teknolojik gelişmelere paralel olarak kullanım maksatlarına yönelik çeşitli sistemler oluşturulmuştur. Bu sistemlerden beklenen faydaya yönelik kalıcı çözümler getiren materyal seçiminde oldukça büyük sıkıntılar yaşanmış ve hep araştırma konusu olmuştur. Farklı amaçlar için değişik tür borular kullanılsa da hala en çok beton, font, çelik, dökme demir, düktil, cam takviyeli, plastik ve pvc borular kullanılmaktadır. Borular, yapıldıkları malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirence göre rijit ya da fleksibl olarak ikiye ayrılırlar. Rijit boruların (asbestli çimento, beton, betonarme, vs.) deformasyon yapmadığı kabul edilir. Bu nedenle, yükün tamamı boru tarafından taşınır. Rijit borular genellikle, yatay veya düşey boyutlarında %0.1’den fazla değişikliğin zararlı çatlaklara neden olduğu borular olarak tanımlanır. Fleksibl borular (ince çelik, plastik, vs.) ise yük altında deformasyona uğrayabilirler [15,17-18]. Şekil 2.1’de hdpe korige borunun yük altında deformasyona uğrayabildiği görülmektedir. Bu tür borular, yapısal hasara meydan vermeden en az % 2 oranında eğilme yapabilen borulardır. Bu nedenle fleksibl borularda yük, boru tarafından taşındığı kadar boru etrafındaki zemin tarafından da taşınır [15].



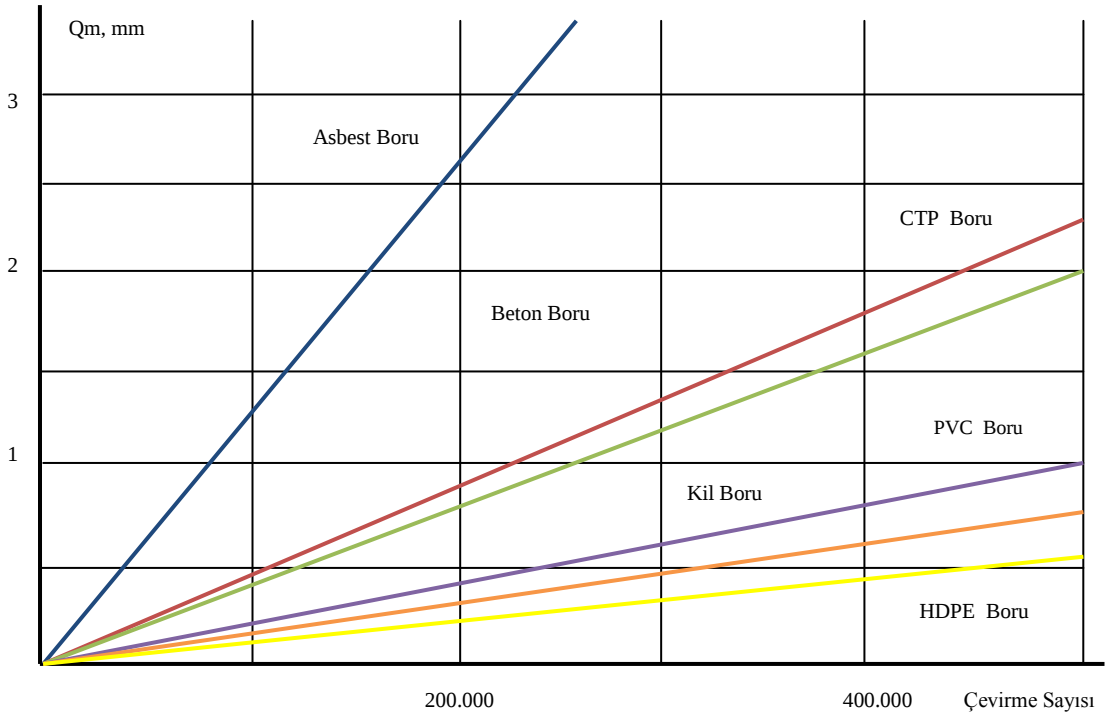
Şekil 2.1 : Esnek boru deneyi ve borunun davranışı [10].

Beton Boruların, değişik dış yük ve trafik yüklerine karşı üstün dayanımı vardır. Yüksek iç basınç dayanımı vardır. Ağırlıkları nedeniyle içi boş olduğunda dahi yüzmeye ihtimalleri azdır. Normal şartlarda korozyondan etkilenmez, asidik ortamlarda korozyona uğrarlar. Porozite ve büzülme sonucu oluşan çatlaklardan sızıntı olma ihtimali yüksektir. Bakım masrafları düşük, ancak tamirleri zordur. Sürekli ve hareketli yükler altında işletme ömrü boyunca hattı ve boru kesiti deforme olmadan kalır [20]. Asbest ve font borular geçmişte iller bankası ve belediyeler tarafından yapılan şebeke hatlarında çok kullanılan boru tipidir. Fakat günümüzde dayanıksızlığından ötürü terkedilmeye başlanılan borulardır. Çelik borular isale hatlarının yüksek basınca maruz büyük çaplı kısımlarında tercih edilir. Statik ve dinamik kuvvetlere dayanımı, elastik oluşu, kırılmadan bükülmesi, yüklere ve kuvvetlere daha ince et kalınlığıyla karşı koyabilmesi, sıcak ve soğuk ortamlara karşı dayanımı nedeniyle tercih edilmektedir. Cidarları ince ve korozyona dayanıksız olmasından dolayı paslanmadan ötürü bakım masrafı fazladır [20,21].

PVC borular pis su deşarj hatlarında kullanılabilen sert plastik kökenli borudur. PVC borular uzun ömürlüdür (Teorikte sonsuz, pratikte 50 yıl). Düşük ısılarda darbe etkisi ile kırılma veya çatlama görülmez. Yüksek darbe mukavemetine sahiptir. Çapraz bağlı yapısı sayesinde yumuşama sıcaklığına kadar ısıtıldığında termal hafızası sayesinde eski halini almaktadır. Bu döşeme esnasında oluşabilecek bükülme hatalarının düzeltilmesini sağlar. Aşınmaya karşı yüksek performans gösterir. Sürtünme katsayısı çok düşüktür. Parlak iç yüzey özelliğinden dolayı tortu, birikinti veya kirlenme meydana gelmez [20]. HDPE borular yüksek esneme kabiliyetine sahiptirler. Bu sayede montajda kolaylık sağlarlar. Kopma uzaması minimum %600'dur. Yer altı hareketlerinden etkilenmezler, kırılma özellikleri yoktur. Darbe dayanımı ve çatlak yayılma dirençleri yüksektir. İç yüzey pürüzlülük düşük

olduğundan projede çap seçiminde önemli avantajlar sağlar. Denizaltında döşenmeye uygundur, deniz suyu ve deniz hareketlerinden etkilenmezler. Bu nedenle katodik koruma yapılmasına gerek yoktur. Suyun kokusunu ve tadını değiştirmez, bu nedenle sağlığa uygundur [20]. CTP borular isale hatlarında büyük çaplı borularda tercih edilmektedir. İnce et kalınlığına rağmen çok dayanıklıdır. Çelik boruya göre 6 kat ve betonarma borudan 15 kez daha hafiftir. Uzun üretilebildiğinde bağlantı sayısı azdır ve sızdırmazlık minimumdur. Ekonomik ömrü 50 yıldır ve bakım gerektirmez [22].

PE, sünek demir ve cam takviyeli plastik borular gibi fleksibl boruların deprem bölgelerinde kullanılması tavsiye edilmektedir. Kullanılacak boru seçiminde, maliyeti düşüklüğü ve borunun teknik ve işletme yönlerindende uygunluğu amaçlanır [7]. Yukarıda özellikleri belirtilen boruların, günümüzde kullanılmak üzere seçimleri yapılırken önemli bir parametrede boruların aşınma miktarlarıdır (Şekil 2.2). Burada HDPE boru aşınmaya karşı en fazla direnç gösteren boru tipidir. HDPE boru 400.000 çevrim sonucunda et kalınlığında en fazla 0.5 mm aşınma meydana gelir . Bu da polietilen malzemenin yapısından kaynaklanmaktadır. Asbest boru ve beton borular ise en fazla ve en kolay aşınan boru tipleri olup daha kolay aşınıp üzerlerine gelen yükler sonucu uzun süre yer altında kalan bu tip borularda daha kolay hasarlar oluşabileceği düşünülebilir.



Şekil 2.2 : Boruların aşınma miktarını gösteren grafik [19].

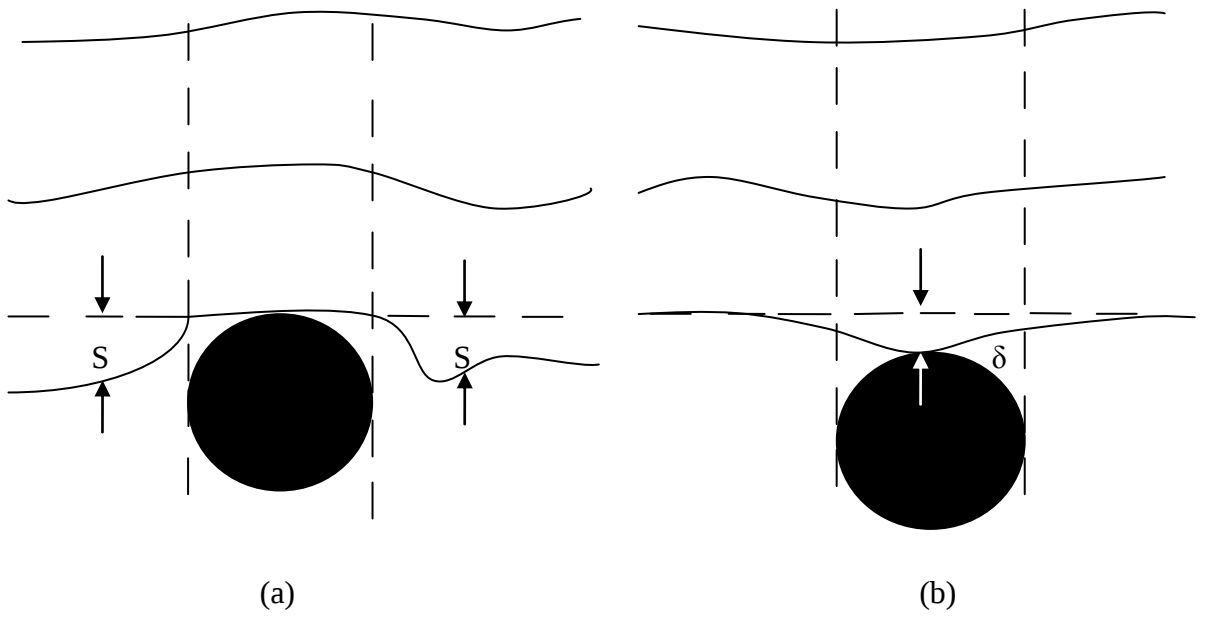
2.3 Boru Hatlarının Tasarımında Etkili Olan Zemin ve Boru Özellikleri

Boru hatlarının tasarımında değişik parametreler rol oynamaktadır. Bunlarında arasında tasarımı en çok etkileyen boruyu çevreleyen dolgu zeminin ve boru malzemesinin özellikleridir. Zemin özellikleri geçmişten bu yana inşaatın önemli unsurlarından biridir. Yollar, binalar, tüneller, barajlar gibi bir çok alanda kullanılmıştır. Zeminler kanalizasyonlarda, kanallarda, tünellerde ve diğer altyapı kanallarında sadece inşaat malzemesi olarak kullanılmamıştır. Bunun yanında yapıların dayandığı, desteklendiği ve yük transferinin yapıldığı unsur olarak varolmuştur. Boru etrafındaki zemin yerçekimi ve yüzey yüklerini yapıya doğru, yapının etrafına doğru iletir. Bütün bunlar zemin mekaniği ve zemin yapısının etkileşimi açısından önemlidir. Tasarım zemin özellikleri açısından ele alındığında; dolgu zeminin sıkılığının, su muhtevasının, birim hacim ağırlığının ve deformasyon modülünün özellikle incelenmesi gereken değişkenler olduğu görülmektedir. Gerilme birikmelerini önlemek üzere dolgu zeminin uniform olarak yerleştirilmesi ve uygun bir şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. Yerleştirme yöntemi ise zemin cinsi, zeminin birim hacim, nem oranı, gömülme derinliği, boru rijitliği ve borunun mukavemeti gibi değişkenlere göre belirlenmektedir [15].

Günümüzde rijit betondan esnek termal plastiğe kadar çok farklı malzemelerde yapılan boru türleri üretilmekte ve kullanılmaktadır. Her tür malzemenin bir diğerine karşı üstün ve zayıf olduğu tarafları bulunmaktadır. Boruların birbirlerine göre rijitlik, korozyon dayanımı, hafiflik, esneklik ve bağlama kolaylığı gibi avantajları bulunmaktadır [15].

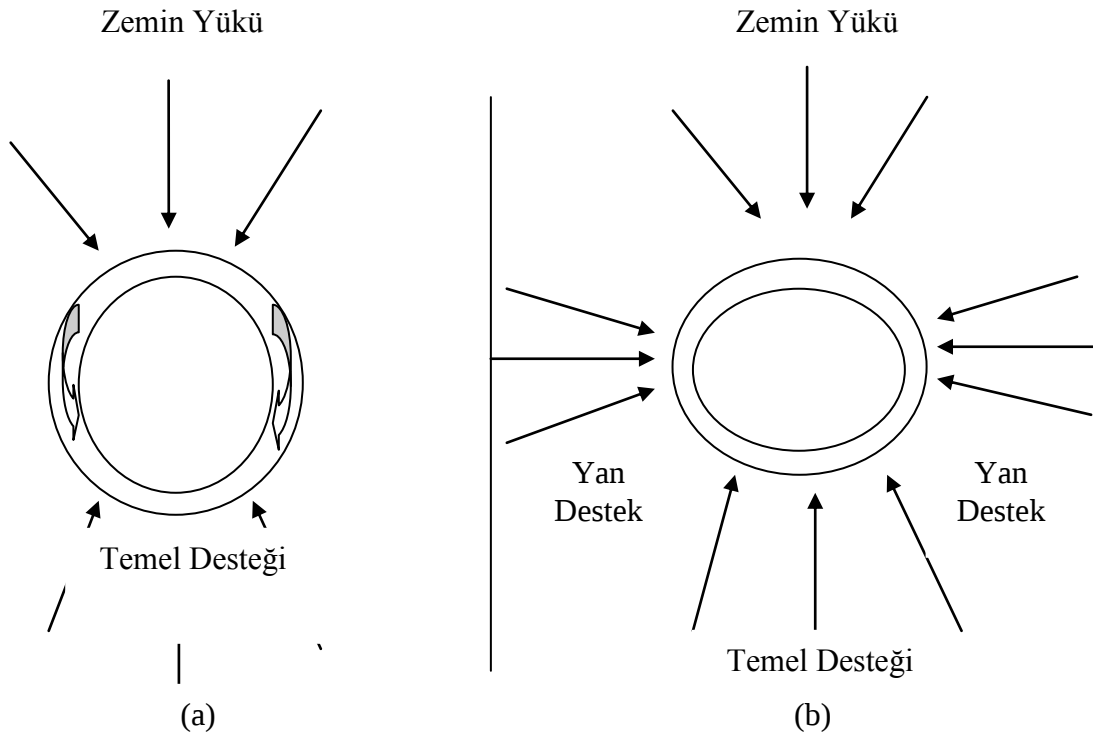
Mukavemet ve rijitlik değerleri kullanım amacına göre boru hatlarının tasarımında dikkate alınması gerekli değişkenlerdir. Mukavemet, gerilmeye karşı koyabilme yeteneği olarak tanımlanır. Boruda iç basınç, zemin yükleri, hareketli yükler, farklı oturmalar ve eğilme gibi çeşitli yüklemelerle gerilmeler meydana gelir. Rijitlik, malzemenin eğilmeye karşı koyabilmesi olarak tanımlanır. Rijitlik, boru malzemesinin elastisite modülüne ve borunun atalet momentine bağlıdır. Dayanıklılık, borunun zamanla çevresel etkilere dayanabilme yeteneğinin ölçütü olarak tanımlanır ve korozyon dayanımı ve aşınma direnci gibi terimlerini içerir [18].

Daha önceki bölümde de belirtildiği üzere borular, yapıldıkları malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirence göre rijit ya da fleksibl olarak ikiye ayrılırlar. Fleksible borular, yapısal olarak bozulmadan en az % 2'lik eğilme yapabilen borulardır. Geri kalanlar ise rijit olarak sınıflandırılır. Tasarımlarında borunun rijit veya fleksibl oluşuna göre ilgili standartlar kullanılır. Genel olarak, beton borular rijit olarak, plastik borular is fleksibl borular olarak düşünülür. Her tür borunun kendisine ait bir veya birden fazla mühendisler tarafından düşünülmesi gereken performans limitleri vardır. Şekil 2.2'de rijit ve fleksibl borunun oturma etkisi altında davranışı yer almaktadır.



Şekil 2.3 : Oturmanın (a) rijit ve (b) esnek borular üzerindeki etkisi [15]

Fleksible boru tasarımında boru üzerindeki yük boruyu çevreleyen zemine aktarılır. Yükleme artarsa, düşey yarıçap düşer ve yatay yarıçap artar. Eğer yatay zemin basıncı ve düşey basınç birbirine yakın değerlerde ise, boru çevresindeki yük bir hidrostatik kuvvetle yaklaşır. Bu durumda boru çeperlerindeki gerilmeler büyük burkulmalara neden olurlar [23]. Rijit borularda, borunun zemin ve trafik yüklerinden kaynaklı düşey basınç etkisi altında kaldığı ve herhangi bir yatay tepki kuvvetinin oluşmadığı veya ihmal edilebilir olduğu kabul edilir. Dolayısıyla boru etrafındaki zemine göre daha rijit olduğundan yükün büyük kısmını boru taşır diğer kısmı temel zeminine iletilir. Şekil 2.4 'de farklı iki borudaki yük aktarımı ve borunun yük etkisi altındaki davranışı gösterilmiştir [15,24].



Şekil 2.4 : Rijit (a) ve Fleksibl (b) boruda yük aktarımı ve borunun yük etkisi altında davranışı [24]

Rijit borular için iç basınç ve dış yüklerin etkisine bağlı olan çeper gerilmesi değerleri genelde kritiktir. Rijitlik halka eğilmesi ve olası burkulmaya karşı koyması fleksibl borular için oldukça önemli olabilir. Yüksek mukavemetli malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle çelikle güçlendirilmiş beton ve camla güçlendirilmiş termal ayarlı plastik gibi ürünlerin üretimi önem kazanmıştır. Bu tip ürünlerin tasarımında, kırılmayı önlemek üzere şekil değiştirme limiti gibi performans limitleri önem kazanmaktadır. PVC gibi termal plastik borular için mukavemet, uzun süreli hidrostatik tasarım çeper gerilmesi cinsinden ölçülür. Bu yüzden tüm ürünlerin tasarımının aynı şekilde olmadığı görülmektedir. Farklı çeşit boruların tasarım kriterleri bilinmeli ve buna uygun tasarım parametreleri kullanılmalıdır [25].

Rijit boruların yapısal tasarımı belli bir emniyet faktörüne göre yapılır. Dış yükleri taşıyabilecek uygun mukavemetli boru seçimi yapılabilmesi için, toprak yükü ve hareketli yük tespit edilir, istenilen yataklama tipi seçilir buna bağlı yük faktörü tespit edilir. Güvenlik faktörü ile çarpılır ve uygun mukavemetli boru seçilir. Fleksibl borularda ise yük, boru etrafındaki dolgunun rijitliği ve boru rijitliği çok önemlidir. Fleksible borular için ana malzeme özelliği olarak, boru çatlama mukavemetinden çok ring rijitliği önemlidir. Zaten fleksibl borular parçalanmasından çok, borunun

düşey yönde aşırı çökmesinden hasar görürler. Fleksible borular genelde bir deformasyon limitine sahiptirler. Deformasyon limiti bir performans limiti olmamasına rağmen, bu değerler aşıldığında borular ciddi deformasyonlara uğrarlar.

2.4 Boru döşeme yöntemleri ve yönetmelikler

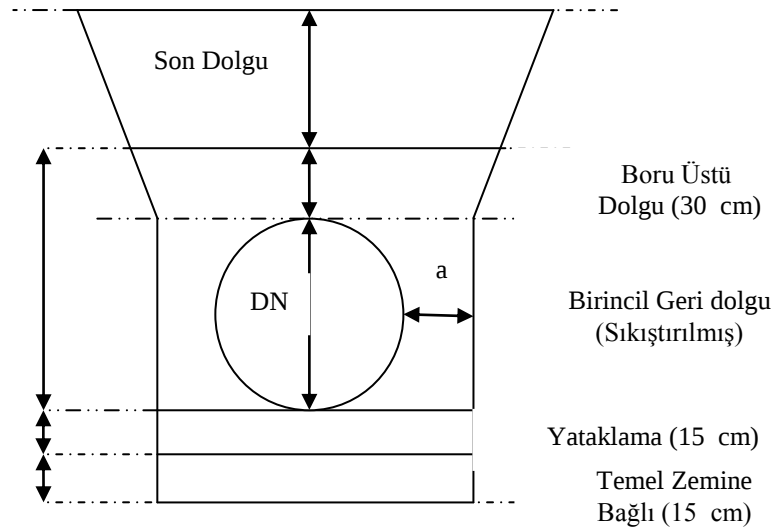
Boruların döşeme yöntemleri boru rijitliği, hendek derinliği, doğal zemin özellikleri ve mevcut dolgu malzemelerine göre değişiklik göstermektedir. Boru hattı tasarımı da aynen yapıların tasarımında olduğu gibi değişik yerleşim bölgelerinde farklılıklar göstermektedir. Dolayısıyla borularda ve zeminlerdeki her farklı özellik, farklı şekillerde tasarıma yöneltir. Bunlarda özellikle depremlerden sonra yönetmeliklerde daha açık bir şekilde yer almıştır. Bu bölümde boru döşeme yöntemleri ve bunlarla ilgili olarak yönetmeliklerde yer alan önemli hususlar açıklanmıştır.

2.4.1 Boru döşeme yöntemleri

Yük hesapları açısından borular, yerleştirme ve yükü etkileyen çevre şartlarına bağlı olarak “hendek tipi” ve “dolgu tipi” boru döşeme yöntemleri olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Dolgu tipi borular da kendi aralarında, “pozitif ve negatif projeksiyonlu borular” olmak üzere ikiye ayrılır [26].

Hendek tipi yerleşimde borular, kısmen kendini tutabilen örselenmemiş zemin içinde kazılmış oldukça dar ve derin bir hendek içine yerleştirilir ve üstü geri dolguyla kaplanır. Kanalizasyon, su ve doğalgaz boruları, hendek tipi yerleşime örnek olarak verilebilir [26].

Şekil 2.5’te yer alan hendek kesitte boru desteği sağlayabilmek için, uygun malzeme boru bölgesi dolgusuna doğru şekilde uygulanmalıdır. Başlangıç ve uzun dönem defleksiyonları, toprak şartları ve döşeme metotları ne olursa olsun, Çizelge 2.1’ te verilmiş olan kabul edilebilir değerleri geçmemelidir. Bu sınırlar dışında yapılan döşemeler, beklenen performansı göstermeyecektir. Defleksiyon terimi eğilme, bel verme olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.5 : Boru dolgusunun bilimsel adlandırılması [22]

Çizelge 2.1 : Başlangıç Defleksiyonu Limitleri [22]

Maksimum Başlangıç Defleksiyonu (%)	3.0	3.0
Maksimum Uzun-Dönem Defleksiyonu (%)	5.0	

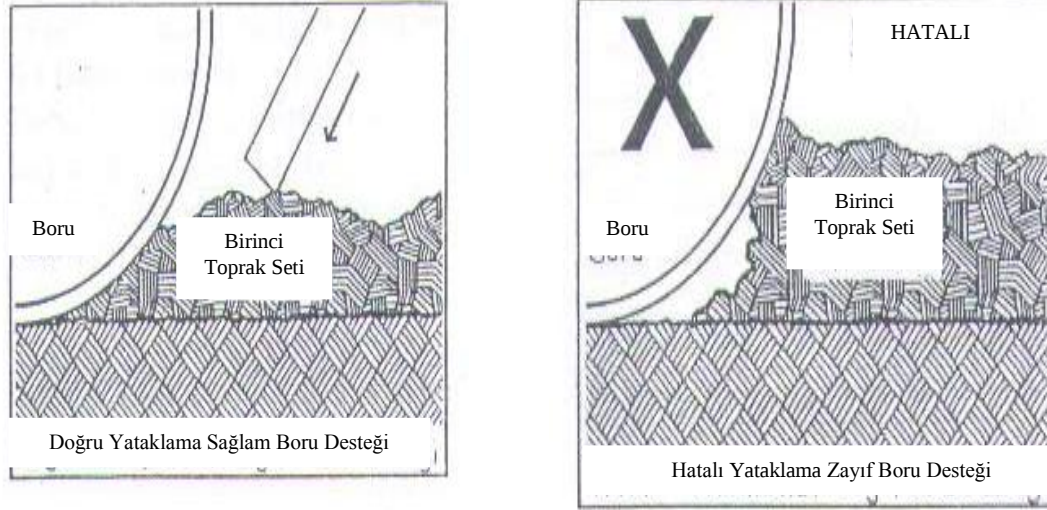
Boru hatları döşenirken doğal zemin, özellikle olası değişimlerin bulunduğu durumlarda sıkça kontrol edilmelidir. Bu olası değişimlerin önem dereceleri, yatak ve boru bölgesinde suyun yükselmesiyle elde edilmektedir. Sıkıştırma hesaplamaları veya toprak sertlikleri, herhangi bir önemli zaman periyodunda var olabileceği endişesi olan en dayanıksız koşulları göstermektedirler. Bu durum genellikle suyun en üst seviyesinde ortaya çıkmaktadır [22].

Döşemede borunun uzun ömürlü ve istenilen performansa ulaşmanın yolu döşeme işlemlerinin boru özelliklerine uygun şekilde gerçekleştirmektir. Yataklanması ve döşenmesi şartlarına göre dizayn edilmelidir. Boru ve yataklama malzemeleri döşemeye destek sağlamak amacıyla, bir “ boru-zemin sistemi “ oluştururlar. Mühendisler tecrübeler sonucunda, tüm borular için en ideal dolgu malzemesinin, uygun olarak sıkıştırılmış granüler malzemeler olduğunu görmüşlerdir. Bununla birlikte boru bölgesi geri dolgu malzemesi olarak kazılı hendek toprakları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Hendek, çalışanların emniyetlerini sağlamak ve istenen yoğunluk şartlarını karşılayabilmek için, duvarların olabildiğince dikey durmasını

sağlayacak tarzda kazılmalıdır. Burada önemli bir nokta da akarsuyun hiçbir şekilde içeriye sızmayacağından emin olunmasıdır. Trafiksiz ortamda hendek derinliği zemin seviyesinden en azından 70 cm boru üstüne olan mesafe olmalıdır. Sürekli yük ve teşekkül seviyesinde yataklama toprağı gibi durumlarda kazı derinliği, boru alt seviyesinden en az 15 cm olmalıdır. Teşekkül seviyesindeki toprağın değişkenlik göstermesi durumunda, toprak tekrar kazı yoluyla stabilize edilmeli ve istenen yük kapasitesine yeterliliğı sağlamak için de uygun malzemelerle yeterli bir derinliğe yerleştirilmelidir. Boru altına min. 15 cm kalınlıkta temelde yapılabilir. Sulama yapılan zeminlerde yapılacak boru döşemesinde zemin suyu seviyesine, borunun üst kısmının yüzmesini de önleyecek yeterlilikte toprak dolgusu sağlanmadığı sürece izin verilmemelidir. Örtünün bir boru çapına eşit olması yeterlidir. Hendek genişliği, boru ile hendek duvarı arasında çalışacak olan sıkıştırma ekipmanının girmesine ve birleştirme elemanlarının döşenmesine yay hattı ile hendek duvarı arası en az 40 cm olacak duruma da elverişli şekilde belirlenmelidir. Boru bölgesindeki doğal zeminin, değişkenlik gösterdiği veya zayıf olduğu durumda, hendek genişliği arttırılabilir. Buna ilaveten gerekli durumlarda levha kazık kullanımı da uygulanabilir. Yataklanmanın hazırlanması ile ilgili olarak; Minimum %70 Relatif Yoğunluğu'nda sıkıştırılmış granüler malzeme veya min %90 Standart Proktor Yoğunluğu'nda sıkıştırılmış herhangi bir uygun dolgu malzemesi kullanılarak yapılan boru yataklaması, minimum 15 cm. derinliğinde olmalıdır [22].

Değişken veya nemli toprak koşullarında bu derinlik arttırılabilmektedir. Yataklama, borunun yatırıldığı yerde kalıcı ve sağlam bir destek sağlamalıdır. Kumlu yataklama malzemesinin sıkılığının sağlanması, önce kumlu yataklamanın ıslatılması ve ardından titreşimli makinalı sıkıştırıcıların kullanılması yoluyla gerçekleştirilmektedir. Gerekirse yataklama kademesinden önce temel kanal tabanını güçlendirmek için yapılmalıdır. Yataklama düz ve boru alt seviyesi hizasında olmalıdır. Boru veya fitting hendek içi pozisyonunda kaldırılır, boru yataklamanın hemen üzerinde alçatılır ve boru uçları arasındaki olası boşluk veya dengesizliği minimize edecek şekilde ve bir önceki boruya temasından kaçınılarak en yakın pozisyonda manevra yapılır. Boru, hizalama açısından kontrol edilmeli ve gereken durumlarda düzeltilmelidir. Herhangi bir özel hizalama durumu söz konusu ise, açılma ve kontrol işlemleri tekrar edilmelidir [22].

Kazıların dolgu malzemesiyle tamamen doldurulduğundan emin olunmalıdır. Dolgu, boru üstünden 30 cm olmalıdır. Hendeğin kazılması işleminde çıkartılan doğal toprak da dolgu malzemesi derecelendirmesi için kullanılabilir. Son tabakalar için sıkıştırmaya gerek duyulmaz (Şekil 2.6). Çizelge 2.2 ‘de kabul edilebilir yataklama malzemesi sınıflandırılması verilmiştir.



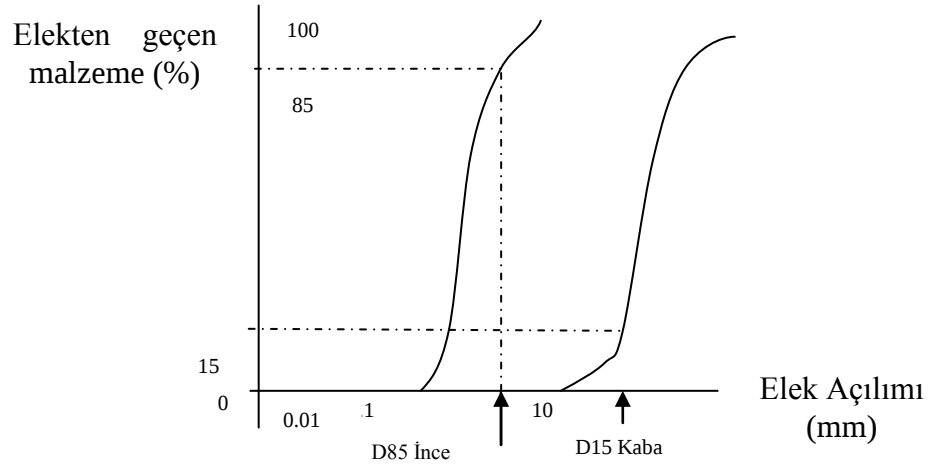
Şekil 2.6 : Boru altlarındaki sıkıştırma [22]

Çizelge 2.2 : Kabul edilebilir boru bölgesi malzemesi sınıflandırması

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	SM, SC
	SW-SM, SP-SC, SP-SM	GM, GC

Çizelge Ek A.1'de birleşik zemin sınıflandırılması verilmiştir. Hendeğin tabanındaki zemin suyu şartlarının hareketli ve devamlı olması, yahut tabandaki toprağın bataklık kumu eğilimi göstermesi durumlarında hendeğin, boru döşemesi tamamlanana kadar, kuyu-noktalar veya alttan drenaj gibi uygun yöntemler kullanılarak sudan arındırılmalı ve ardından boru hattının yüzmesini engelleyecek yükseklikte doldurulmalıdır. Doymuş koşullar altında; boru bölgesi, yataklama ve temel malzemeleri gibi ince taneli materyallerin hendeğin tabanı veya duvarlarına

yakın yerlere ve hendek tabanındaki materyallerin de boru bölgesi materyallerine göçmesi önlenmelidir. İnce taneli toprakların bir alandan diğerine hareketi veya göçmesi, temel veya boru desteği (yahut her ikisininde) kaybına yol açmaktadır. Bu muhtemel göçme, dokuma filtre kullanımıyla önlenebilmektedir. Döşeme esnasında, su seviyesinin çeşitli pompalama veya kuyu-noktalar methodlarıyla kontrol edilmesi işlemi yapılırken, hendekte büyük çaplı hidrolik eğimler meydana gelebilmektedir. Bu eğimler, yapı tamamlandıktan sonra, yani izin verilebilir bağlantılı borular veya kademelenmiş yataklama ve dolgu malzemelerinin yüksek zemin suyu seviyelerinde bir zincir gibi hareket ettiği durumlarda artabilmektedir. Doğal zeminin ince taneli toprak içerdiği alanlarda, hendek tabanı ve duvarlarında dokuma filtreler kullanılmalıdır. Bu filtrelerin kullanılmadığı durumlarda, dolgu malzemesi olarak homojen yapıya sahip aşağıda belirtilen Filtre Eğim Kriterine uygun kırma taş veya gravel malzeme kullanılabilir. Hidrolik eğim altındaki ince taneli malzemelerin daha iri taneli malzemelerin arasına göçmelerini sınırlamada aşağıdaki filtre eğim kriteri kullanılabilir [22] (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Elekten geçen malzeme (%) – Elek açılımı (mm)

$D_{15}/d_{85} < 5$ ise; D_{15} , iri taneli malzemenin ağırlıkça %15'inin geçtiği elek açılma boyutunu, d_{85} ise, ince taneli malzemenin ağırlıkça %85'inin geçtiği elek açılma boyutunu göstermektedir.

$D_{50}/d_{50} < 25$ ise; burada D_{50} , iri taneli malzemenin ağırlıkça %50'sinin geçtiği elek açılma boyutunu, d_{50} ise, ince taneli malzemenin ağırlıkça %50'sinin geçtiği elek açılma boyutunu göstermektedir.

İri taneli malzemenin iyi ayrılmış olması durumunda, bu kriter kullanılmamaktadır [27].

İnce taneli malzeme, orta-yüksek oranda plastisiteli kil (CL veya CH) içeriyorsa kullanılacak,

S15/D85 kriteri: $D_{15} < 0.02$ inç (0.5 mm)'dir.

Burada D_{15} iri malzemenin ağırlıkça % 15'inin geçtiği elek açılma boyutudur [18].

Bu kriter, malzemelerden birinin boşluk içermesi durumunda modifiye edilir. Kullanımda filtre eğim kriterine bağlı olarak seçilecek olan malzeme, ufalanmayı minimize edebilecek şekilde kullanılmalı ve yerleştirilmelidir. Levha kazıkların kullanıldığı durumda, sıkıştırma işleminden sonra boşluklar kalabilmekte ve dolgu malzemesi desteğinde azalma veya tamamen kayıp görülebilmektedir. Levha kazıklar, doldurma ve katman sıkıştırma işlemlerinde olduğu gibi kademeler halinde kaldırılmalıdır. Levha kazık arkasında kalmış olan boşluk alanlar sıkıştırılmış malzemeyle kapatılmalıdır. Bu yükseltme işlemi aşamalı olarak yapılmalıdır. Böylece, boru yataklaması ve boru bölgesi dolgu malzemelerine, boru üzerinden 300 mm yüksekliğe kadar olan tabii hendek duvarlarına karşı iyi bir sıkıştırma sağlanmış olmaktadır. Çakıl ve kırmataşlar için maksimum tane büyüklüğü Çizelge 2.3'te görüleceği üzere, boru çapına bağlıdır [27].

Çizelge 2.3 : Çakıl ve kırmataşlar için maksimum tane büyüklüğü

Nominal Boru Boyutu DN (Nominal Çap)	Maksimum Dane Büyüklüğü mm
DN < 300	10
300 < DN < 600	15
600 < DN < 1000	20
1000 < DN < 1500	25
1500 < DN	32

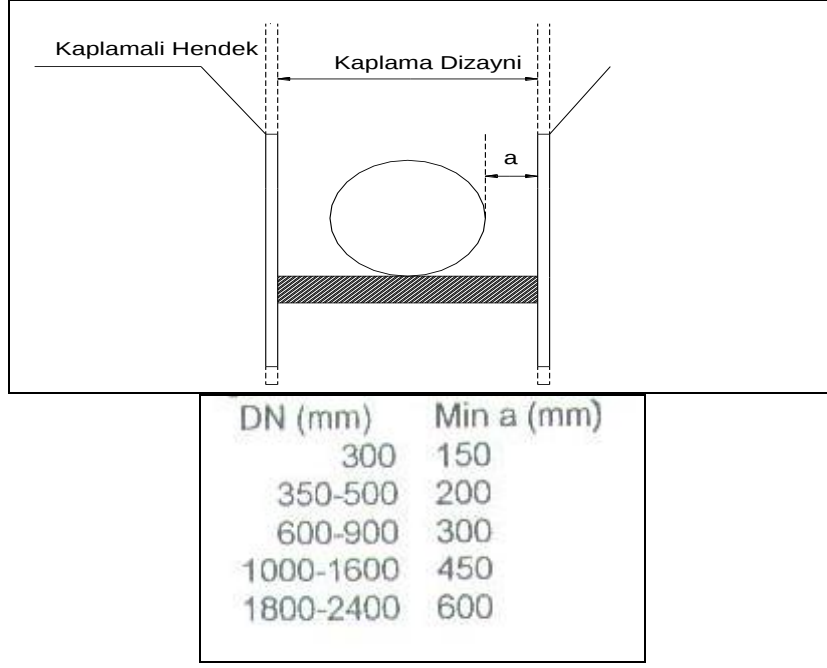
Dolgu Tipi boru döşeme yöntemi ise, ikiye ayrılır bunlardan pozitif projeksiyonlu boru döşeme tipinde, doğal zemin yüzeyi seviyesinde yapılan sığ bir yatağa yerleştirilir ve daha sonra üzeri dolgu ile kaplanır. Ayrıca, boru çapından üç kat veya daha fazla genişlikte olan hendekler içine yerleştirilen borular da dolgu tipi boru döşeme yöntemi olarak adlandırılır. Otoyol ve demiryolu menfezleri genellikle bu mantıkla yerleştirilir. Negatif projeksiyonlu boru döşeme yönteminde ise, nispeten dar ve sığ bir hendek içine boru üst seviyesi doğal zemin yüzeyinin altında kalacak şekilde yerleştirilen ve daha sonra üzeri dolgu ile örtülür. Bu yöntem, belirli bir dolgu yüksekliğinden kaynaklanan yükün pozitif projeksiyonlu boru üzerindeki

yükten az olması nedeniyle otoyol ve demiryolu menfezlerinin yerleştirilmesinde sıkça kullanılmaktadır [26].

Gömme derinliği ihtiyacı, verilen boru rijitliği, döşeme tipi ve tabii toprak gruplarının limitlerini aşıyor ise, alternatif döşeme prosedürleri uygulanabilir. Uygulanabilir 3 alternatif döşeme metodu, daha geniş hendek, kalıcı gömlekleme ve çimento ile bağlanmış dolgu malzemesidir [27]. Bunlar özel boru yerleştirme yöntemleri olarak adlandırılırlar. Bunlara ilave olarak atıksu arıtma tesisleri ve deşarjlarında farklı döşeme yöntemleri kullanılır. Ayrıca şehirleşmeyle çok önemli bir ihtiyaç olan kazısız boru yerleştirme yöntemleri ve yenileme teknolojilerine de bu bölümde değinilmiştir.

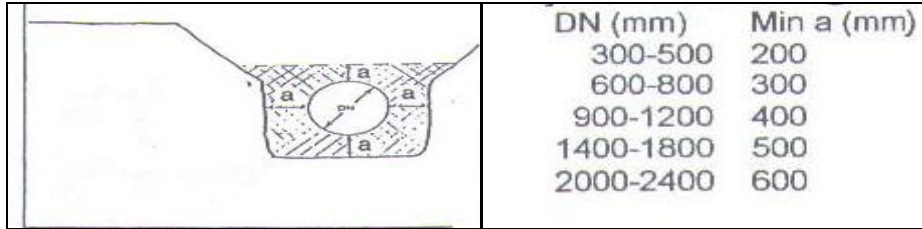
2.4.1.1 Özel boru yerleştirme yöntemleri

Uygulanabilir üç alternatif döşeme metodundan biri olan daha geniş açılarak hendek genişliğinin arttırılması işlemi, izin verilebilir sınırlar içinde tabii toprağın, daha derinde bir döşemeye elverişli olacak ve negatif basınçlara daha fazla dayanım sağlayacak şekilde borudan daha fazla vakumlama yoluyla uzaklaştırılmasıdır. Özellikle zayıf tabii toprak şartlarında tavsiye edilir. Sürekli kaplama hendek metodunda ise, boru yanal yüklerini uygun şekilde dağıtmaya yetecek uzunlukta ve borunun tasarım ömrünün uzunluğunu sağlayacak kalitede olmalıdır (Şekil 2.8). Doldurma prosedürü ve maksimum örtü derinlikleri standart döşemeninkiyle aynıdır. Kalıcı gömlekleme standart döşeme olarak da farz edilebilir [27].



Şekil 2.8 : Sürekli kaplamalı hendek

Üçüncü alternatif ise, stabilize dolgu malzemesi (Çimento ile) tipik olarak 1 ton kuma (% 4-5 çimento) 40-50 kg çimento yeterli miktardır. Kumun 200 nolu elekten maksimum % 15 ' i geçmelidir. Stabilize malzemenin 7 günlük dayanımı 690-1380 kPa olmalıdır. Stabilize dolgu malzemesi, kademeleme için doldurulmaya başlanmadan önce, ilk örtüde 24 saat bekletilmelidir. Borunun etrafı, Şekil 2.9'da görüldüğü üzere stabilize edilmiş dolgu ile kaplanmalıdır. Tamamlanmış kazı alanı, stabilize malzemeler ile doldurulmalıdır. Maksimum toplam örtü derinliği 5 metredir. Konan malzeme %90 derecesine kadar 15-20 cm katmanlar halinde sıkıştırılmalıdır [27].



Şekil 2.9 : Stabilize çimento dolgu biçimi

2.4.1.2 Atıksu arıtma tesisleri ve deşarj hatlarında döşeme yöntemleri

Bu döşeme tipi, su arıtma tesislerinin deniz suyuna ihtiyaç duyduğu, kanalizasyon ve yağmur suyu akışlarının denize pompalanmasının ve enerji santralleri için soğutma

suyu çevrimlerinin gerektiği durumlarda uygulanmaktadır. Bu gibi durumlarda boru bağlantılarının montajı genellikle suyun altında yapılmaktadır. Su altına boru döşenmesi işlerinde kullanılan başlıca yöntemler yüzdürme yöntemi, tabandan çekme yöntemi, teker teker veya modüller halinde batırma yöntemi ve gemiden döşeme yöntemidir. Deniz deşarj hatlarının inşasında kullanılan boru cinsleri betonarme, çelik ve plastik kökenlidir. En çok kullanılan boru tipleri döküm demir boru, çelik boru, betonarme boru, PVC boru, FRB (fiberglas lifli) boru ve yüksek yoğunluklu polietilen borulardır. Son zamanlarda boru malzemesi ve inşa maliyetlerini düşürmek amacıyla genellikle çelik veya plastik boruların kullanılması yoluna gidilmektedir. Çelik boru kullanılması durumunda, stabiliteyi sağlayabilmek için, boru hattına çeşitli şekillerde ek yük koymak gerekir. En çok kullanılan ve önerilen yöntem, çelik boruların dışına beton ağırlık kaplaması yapmaktır [28]. Dalgıçların birleştirme aygıtlarının montajlarının suyun altında kolaylıkla gerçekleştirebilmelerine yardımcı olmak amacıyla, borunun her iki ucuna yerleştirilerek kullanılabilecek özel bir aparatı kullanmak zorundadır. Diğer bir alternatif ise montajı 3 boru boyuna kadar bir mavna üzerinde gerçekleştirmek ve ardından montajı tamamlanan kısmı, yavaşça deniz yatağına indirmektir. Deniz dışında çok uzun boylarda montajı yapıp ardından deniz tabanına indirilmek üzere tasarlanmamıştır. Bu işlem 3 boru boyuyla sınırlandırılmıştır. Boruların suyun altına döşenmesinde kullanılacak hendek, saha döşemesinde yapılan şekilde olup, daha geniştir. Tipik su altı hendeği genişliği $ND+1$ m'den den az olmamak şartıyla, $2x ND$ (nominal çap) olarak hesaplanmaktadır. Boru üzerindeki örtünün yüksekliği, boru üzerinden deniz tabanına kadar yaklaşık 1 metredir. Dalgıçlar tarafından, kazılmış granüler deniz yatağı malzemesiyle yapılacak olan doldurma işleminde malzemenin boru yan koltuk altına iyice yerleşmiş olduğundan emin olunacak şekilde, maksimum, boru üzerine konulacak dolgu malzeme yüksekliği 30 cm 'dir. Doldurma işlemi, borunun yerinden oynamasını önlemek için, borunun etrafına düzgün bir şekilde yapılmalıdır. Boru hendeği üzerindeki dolgulu deniz yatağına koruma sağlanması normal bir uygulama olup, genellikle bu koruma büyük taşlar veya kayalarla (rip-rap) oluşturulmaktadır. Her biri 100 kg civarında ağırlığa sahip betonarme plaklarla bu örtme işlemi güvenli şekilde gerçekleştirilebilir [28].

2.4.1.3 Kazısız boru yerleştirme yöntemleri ve yenileme teknolojileri

Gömülü boru hatlarının döşenmesinde, genellikle açık kazı yöntemi kullanılmaktadır. Hızla gelişen dünyamızda, projeleri kısa zamanda ve daha ekonomik koşullarda toprak altına indirebilmek için büyük bir yarış gözlenmektedir. 1983 yılından itibaren Amerika'da uygulanan yönlendirilebilir yatay sondaj sistemi 90'li yıllarla beraber tüm Avrupa ülkelerinde de kullanılmaya başlamıştır. Bu tarihlerde Türkiye'de ise, karayolu ve demiryolu altlarına boru döşemek için; boru sürme, boru itme ya da boring denilen ilkel yatay delgi metodları kullanılıyordu. 2000 yılından itibaren ise ilkel yatay delgi metodları yerine dünya ülkelerinde horizontal directional drilling technology olarak bilinen yönlendirilebilir yatay sondaj sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Yönlendirilebilir yatay sondaj (YYSS) sistemi, açık kazı yapmadan boru ve kabloların toprak altına döşenmesidir. Her aşamada üstten takip edilebilme özelliği sayesinde yeraltında bulunan mevcut yapılara ve şebekelere zarar verilmeden istenilen noktadan girip yine istenilen noktadan çıkmaktadır. Dünyadaki en gelişmiş kazısız geçiş sistemi olan yönlendirilebilir yatay sondaj sistemi ülke ekonomilerine kazançlar sağlarken; doğalgaz, su, elektrik, telekom gibi projelerde açık kazı yapmadan ve trafiği engellemeden uygulanabilmesiyle insanların günlük hayatlarında da kolaylıklar sağlar Kazısız boru yerleştirme ve yenileme teknolojileri, doğru uygulandıklarında etkili ve çevreye duyarlı bir boru döşeme, bakım ve tamir yöntemleridir. Kazısız teknolojiler; yüzeysel kazıları en aza indirmektedir. Yeraltı yapılarının inşaatı sırasında doğabilecek istenmeyen çevresel etkileri, bakım ve tamir masraflarını azaltmaktadır. Yüzeysel bozulmayı en aza indirerek trafik karmaşasını önemli ölçüde azaltmakta, hava ve gürültü kirliliğini büyük ölçüde önlemektedir. Zemin ve yol kaplamalarının kazısı sırasında meydana gelen atıkların en aza indirilmesini sağlamakta ve derinlikten bağımsız olarak boruyu en uygun zemin tabakasına yerleştirmeyi mümkün kılmaktadır [29]. Mikrotünel sistemi, boru patlatma, boru kırma, yatay doğrusal delgi, kablo şebekeleri ve basınçlı altyapı hatlarının yatay doğrusal delgi ile yeraltına yerleştirilmesi, çelik boru çakımı ve köstebek yöntemleri, kazısız boru yerleştirme ve yenileme teknolojilerine örnek olarak verilebilir.

Bunlardan mikrotünel sistemi, boru hatlarının yer altına tek bir geçişle direk olarak döşenmesini sağlayan, operatörün yüzeyde kurulan kontrol odasından makineyi kontrol edebildiği bir sistemdir. Döşenecek olan boru çapına uygun olan mikrotünel

makinesi, boru döşenecek derinliğe uygun olarak açılan şaftlara indirilerek çalışması sağlanır. Tünel hattını açacak olan başlık operatör kontrolü ile kendi ekseni etrafında döner. Dönme işlemi sırasında başlık üzerinde bulunan kesici uçlar zemini parçalar. Başlık gerektiğinde operatör tarafından açı oluşturacak şekilde yönlendirilebilir. Daha önce yatay delgi metodlarıyla veya aç-kapa metodu ile döşenmiş şebeke boruları zamanla yıpranır veya tıkanır. Yönlendirilebilir yatay sondaj sistemi ile döşenen çelik ve hdpe borular bu tür tıkanma ve yıpranmalara karşı beton borulara oranla çok daha dayanıklıdır. Özellikle kılıf olarak kullanılan beton borular çeşitli etkilerle kırılır ve boru hattının tıkanmasına neden olur. Böyle durumlarda yeni bir hattın döşenmesi zaman kaybı yaşattığı gibi büyük mali kayıplarında yaşanmasına neden olur. Kullanılmayan her boru hattının yerine yenisinin döşenmesi aynı zamanda alt yapıda da düzensizliğe neden olur. Yönlendirilebilir yatay sondaj sistemi birden fazla borunun aynı anda çekilmesine olanak verdiği için çoğu boru hattı zaten yedekli olarak çekilmektedir.

Ancak mevcut hattın tekrar kullanılabilmesi için kırılan ve yıpranan şebeke borularının içersinden klavuz boru (tij) gönderilir. Tıkanıklığın yaşandığı boru hattına en yakın iki baca arasında yapılan bu işlemde, bacadan çıkan klavuz borunun ucuna büyütme kafası ile birlikte yeni boru takılarak çekilir. Bu işlem sırasında eski boru hattı kırılır ve sıkıştırılır. Böylece eski borunun bulunduğu yere zaman kaybı yaşanmadan ve kazı işlemi yapılmadan yeni hat döşenmiş olur [30].

2.4.2 Depreme dayanıklı boru hatlarının tasarımı

Eski dönemlerde deprem kuvvetleri boru hatları tasarlanırken pek dikkate alınan bir parametre değildi. Fakat daha sonra geçmişteki depremlerden alınan veriler neticesinde altyapılarda görülen büyük çaptaki hasarlar, boru tasarımında depremin son derece hayati bir önem taşıdığını çok açık bir şekilde ortaya çıkartmıştır. Yapıların tasarımında olduğu gibi değişik yerleşim bölgelerinde de boru hatlarının tasarımı farklılıklar göstermektedir. Bölümün devamında Türk, Amerikan ve Japon Yönetmeliklerinde depreme dayanıklı boru hattı tasarımıyla ilgili bölümler yer almaktadır.

2.4.2.1 Türk yönetmeliği

Türkiye’de boru hatlarının tasarım ve imalatına dair TSE’nin hazırladığı bir takım şartnameler yer almıştır. Fakat bu şartnamelerde genelde boruların yüklenmesi, taşınması ve depolanması gibi konulara değinilmiştir. Daha sonra “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” çıkarılmış fakat burda da boru hatların depreme dayanıklı tasarımına dair herhangi bir husus yer almamıştır. 2007 yılında ise deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelikte de bu konunun üzerinde fazlaca durulmamıştır. 2007 yılında çıkartılan Altyapılar için afet yönetmeliği’nde içme suyu ve kanalizasyon şebeke ve arıtmalarını içeren altyapı tesislerinin doğal afetlere dayanıklı olarak tasarımı ve mühendislik hesapları ile malzeme seçimi, yapımı, işletilmesi, bakım ve onarımı için gerekli asgari şartlara dair usul ve esasları belirtilmiştir. Planlama yapılırken altyapı tesisinin afet risk analizinin ve Altyapı tesisine ait acil durum müdahale planlarının yer alması gerektiği belirtilmiştir. Depremlerle ilgili olarak performans hedefleri olarak Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5 dikkate alınmıştır [31].

Çizelge 2.4 : İçme ve Kullanma Suyu Tesislerinde Deprem Sonrası Performans Hedefleri [31]

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 kullanılır durumdadır.
Kritik hizmet İçme suyu ve halk sağlığı Evsel, ticari ve endüstriyel kaynak	Kış talep oranlarında tüm alanlara sürekli tam hizmet sağlanır. Su kalitesi korunur.	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. 7 gün içerisinde birkaç alana kış talep oranlarında tam hizmet verilir. 1 ay içerisinde tüm bölgeye kış talep oranlarında tam hizmet verilir.

Çizelge 2.5 : Atıksu tesislerinde deprem sonrası performans hedefleri [31]

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

Yönetmelikte zemin yapı etkileşimi ile ilgili olarak; yapılacak arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda belirlenecek su içeriği, birim hacim ağırlığı, kıvam limitleri, konsolidasyon, şişme, dayanım parametreleri, yataklama katsayısı, zemin grubu, yerel zemin sınıfı, spektrum karakteristik periyotları, sismik dalga hızı, maksimum yatay yer ivmesi, sıvılaşma potansiyeli, şev duraylılığı gibi geoteknik parametreler ve değerlendirmeler esas alınarak, tasarımda kullanılmak üzere geoteknik etüt (zemin etüt) raporu hazırlanması gerektiği belirtilmektedir. Geoteknik etüt (zemin etüt) raporu bunlarla sınırlı olmamak kaydıyla aşağıda verilen değerlendirmeleri içermelidir [22] .

- Alt yapı projelerinin uygulanacağı sahaların doğal afet riski taşıyan bölgelerde bulunması durumunda, heyelan, taşkın, çığ, kaya düşmesi, yangın gibi doğal bir afetin etkisi altında iletim hatları ve sınai yapıların afet güvenliğinin ve risk azaltıcı önlemlerin açıklaması.
- Proje alanının afet tehlike ve riskinin, çeşitli kurum ve kuruluşlarca yapılmış, temin edilmesi mümkün olan, envanter, duyarlılık, tehlike, risk haritaları gibi üst ölçek harita ve örnek çalışmalara atıfla belirtilmiş açıklaması. Önceki çalışmaların bulunmadığı durumlarda, jeolojik-jeoteknik araştırma ve analizlere dayalı olarak gerekli veriler toplanılmalı, kritik alanlarda gerekli görüldüğü takdirde, ayrıntılı çalışmalar ile doğal afet tehlike ve risk durumu 1/5.000, 1/1.000 veya 1/500 ölçekli haritalar üzerinde ortaya konulmalıdır.
- Elde edilen veriler ışığında, güzergah ve sınai yapı yeri alternatiflerinin kıyaslaması.
- Alternatif güzergahın tespit edilememesi durumunda uygulanabilecek zemin iyileştirme yönteminin güvenlik, maliyet ve teknik açıdan uygulanabilirlik karşılaştırmaları da yapılarak alternatifler halinde sunumu.

d) Proje alanı merkez olmak üzere sismolojik çalışmalar ve 100 km yarıçaplı bir alan dikkate alınarak depremsellik ve sismik risk analizi çalışmaları yapılarak elde edilen muhtemel deprem büyüklüğü, maksimum yatay yer ivme değeri, deprem tekrarlama periyotları ve oluşma ihtimallerine ilişkin değerlendirmeler [31].

Ayrıca Afet bölgelerinde kullanılacak boru hatları ve bağlantıları ile ilgili hususlarda yönetmelikte yer almaktadır. Dolayısıyla çıkartılan bu yönetmelik sayesinde deprem dayanıklı boru hattı tasarımlarının geçmişe nazaran çok daha dikkate alındığı anlaşılmaktadır.

2.4.2.2 Amerikan yönetmeliği

Amerika’da ise zemine gömülü boru hatları ile ilgili olarak 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) şartnameleri bulunmaktadır. American Lifelines Alliance (ALA) için FEMA (Federal Emergency Management) ve ASCE ortak çalışarak bir şartname oluşturmuştur. Bu şartnamede gömülü borular üzerine etkiyen farklı kuvvetler üzerinde durulmuş ve bu kuvvetlerin etkisi altında boru tasarımının ve gerekli hesaplamaların ne şekilde yapılacağı belirtilmiştir. Bu şartnameye göre; iç basınç, düşey zemin yükleri, yüzey hareketli yükleri, yüzey etki kuvvetleri, suyun kaldırma kuvveti, ısı genleşme, rölatif boru –zeminler değiştirmesi boru dirseklerindeki hareket , deprem, geçici sıvı hareketi, hat yakınında olabilecek patlama etkisi, servis dışındaki tekrar yerleşim gibi kuvvetler esas alınmıştır. Potansiyel deprem tehlikesi zemin sarsıntısı ve yüzey faylanması sonucu oluşan kalıcı yer değiştirmeden ileri gelen farklı zemin yer değiştirmesi, yanal yayılma yer değiştirmesi, toprak kayması yer değiştirmesi ve sıkışma veya sıvılaşma sonucunda oluşan oturma nedenli geçici şekil değiştirmeleri kapsamaktadır. Standardın deprem bölümünde dalga yayılım nedenli şekil değiştirmenin meydana geldiği boru hatlarının tasarımına yer verilmiştir.

Deprem sonucu oluşan kalıcı yer değiştirme, sonlu elemanlar programları ile ve özellikle özel amaçlı 2 boyutlu boru hattı deformasyon analizi, PIPLIN kullanılarak hesaplanmaktadır [32].

2.4.2.3 Japon yönetmeliği

Japonya'daki 1995 Hyokogen – Nanbu depreminden sonra özellikle boru hatlarında çok büyük hasarlar meydana gelebildiği görülmüştür. Deprem sonrası yaşananlar ve gözlenen hasarlar sonrası mühendisler aynen yerüstü yapıları gibi altyapılardaki borularla ilgili olarak da şartnamelere ve yönetmeliklere ihtiyaç olduğunu tespit ettiler [33]. Bu ihtiyacın gerekliliği üzerine yapılan yeni çalışmalarla sismik kapasite bu yapıların depreme dayanıklılıklarını artırmak üzerine çalışmalar başladı. Japonlar bu çalışmalarını 2 temel deprem çeşidine göre oluşturdular. Bunlar seviye 1 yer hareketi ve seviye 2 yer hareketi olarak adlandırdılar [34]. Özetle aşağıdaki değişiklikler yapılmıştır.

Seviye 1 hareketleri Kobe depremine kadar olağan olarak kullanılan ve yapıyı kullanımda olduğu süre içinde bir veya birkaç kere etkileyen deprem hareketleridir. Esas olarak, seviye 2 hareketleri muhtemel fay hareketlerini gözönüne alarak senaryo depremleri ilke tespit edilir. Bu yer hareketleri tahmini tasarım depremine göre ve şiddetli deprem derecesine göre ilişkilendirildi. Şiddetli deprem derecesi acil durumlar veya süneklik dereceli deprem olarak kabul edilmiştir. 2. Seviye yer hareketi boru elemanlarında plastik deformasyonları oluşturmaya yeterlidir. Şu an ki sismik tasarım yaklaşımı 2. Yer hareketi seviyesi elastik tepki kabulüne uygun olacak şekilde direk olarak uygulanmayabilir. Bu durumda sadece 1. Seviye yer hareketleri için değil, aynı zamanda 2. Seviye yer hareketleri içinde gömülü boru hatlarında yeni geliştirilmiş basit tasarım formüllerine ihtiyaç olacaktır [34].

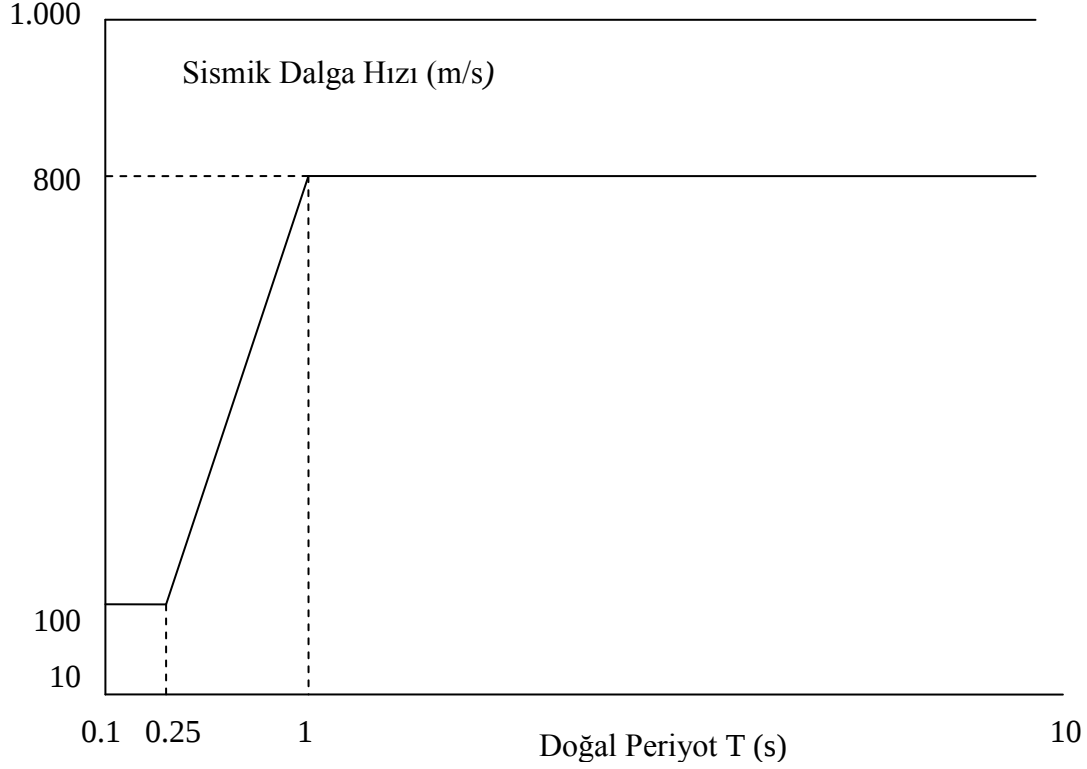
Tasarım yöntemi şekil değiştirme esaslıdır ve deprem sırasındaki şekil değiştirmelerin, elastik limit aşmasına izin verilmektedir. Gömülü boru hatlarının düz kısımlarında, boruda oluşan şekil değiştirmeler zemin ve boru arasındaki kayma nedeni ile oluşmaktadır. Boru hattının dirsek ve /veya T bağlantı gibi bağlantı bölgelerindeki şekil değiştirmeler ise boruya etkiyen deprem kuvvetleri ile oluşmaktadır. Zeminin uniform olan veya olmayan bölgelerinde, boru hattında oluşan şekil değiştirmelere ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Özetle borularda şekil değiştirmelerin bu yönetmelikte tanımlanan sınırlar içinde kalması istenir. Şekil değiştirmeye ilgili olarak yönetmeliklerde yer alan bir takım ampirik bağıntı aşağıda verilmektedir.

Uniform bir zeminin şekil değiştirmesi 2.1 ile hesaplanır.

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

Bu Bağıntıdaki dalga boyu L, 2.2 ile hesaplanır.

$$L = VT \quad (2.2)$$



Şekil 2.10 : Sismik Dalga Hızı [33].

Dalga hızı V ise şekil 2.10'da verilen grafik yardımıyla bulunur. Zeminin doğal periyodu T'nin hesabı bağıntısında verilmektedir.

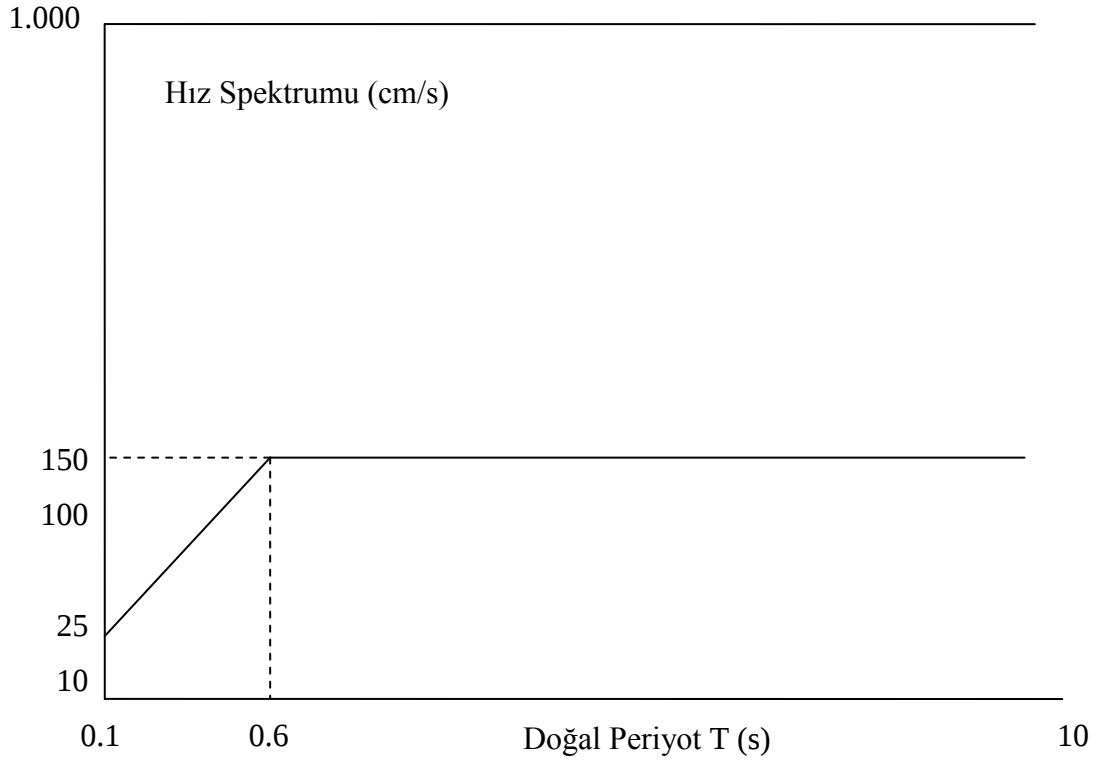
Zeminin yer değiştirmesi U_h ise (2.3) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda yer alan diğer değişkenlerin hesabı da (2.4), (2.5) ve (2.6) bağıntıları, Çizelge 2.6 ve Şekil 2.11 kullanılarak yapılmaktadır.

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

z : Boru hattı derinliği (m)

T : Zeminin doğal periyodu

S_v : Spektral hız (cm/s)



Şekil 2.11 : Hız Spektrumu [33].

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

v_1 : Önem katsayısı (Şehir içi yollarda gömülü borular 1.0, diğer yerler 0.8)

v_2 : Sismik bölge katsayısı

Çizelge 2.6 : Sismik bölge katsayısı (v_2) [33].

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

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

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

H : Yüzey tabakasının derinliği (m)

V_s : Kayma dalgası hızı (m/s)

Yüzey tabakasının derinliğinin bulunması için yapılacak çalışmada SPT değerinin 50'den büyük olması veya kayma dalgası hızının 300 m/s'den büyük olması olması

aranır. Ana kayanın boru hattının geçtiği bölgede eğimli olması durumunda zemin şekil değiştirmesi (2.7) bağıntısı ile hesaplanır.

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

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

ε_{G3} : İki noktanın farklı yer değiştirmesi nedeni ile oluşan şekil değiştirme

K: Zemin doğal periyoduna bağlı katsayı

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

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

θ : Ana kayanın eğim açısı

Zemin şekil değiştirmesinin bulunmasının sonrasında, şekil değiştirmenin boru hattı üzerinde meydana getireceği şekil değiştirme, düz boru hatlarında uniform zemin olması durumunda ise (2.9), eğimli kaya olması durumunda ise (2.10) bağıntıları ile hesaplanır.

$$\text{Uniform Zemin} \quad \varepsilon_{v1} = \alpha \cdot \varepsilon_{G1} \quad (2.9)$$

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

Şekil değiştirme transfer katsayısı α , (2.11) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

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

q = Boru ve zemin arasındaki kayma azalma katsayısı

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

K_1 : Eksenel yönde zemin yay katsayısı

Kaynaklı birleşimlerin olduğu boru bölümlerinde (2.9) ve (2.10) bağıntıları ile verilen şekil değiştirme değerlerinin iki katı dikkate alınır. Yönetmelikte boru hattının düz kısımlarında izin verilen boru şekil değiştirmesi:

$$\varepsilon=0.01 \text{ veya } \varepsilon= \frac{4}{3} \frac{t}{D-t} n \quad (2.13)$$

t : et kalınlığı (cm)

D : boru çapı (cm)

n : 0.11

değerlerinden küçük olanıdır. Güvenlik katsayısı olarakda 1.25 kullanılmaktadır.

Ayrıca sıvılaşma etkisiyle oluşan kalıcı yer değiştirme gözüne alınmak zorundadır. Performansa dayalı tasarım ve yönetim kapsamlı olarak benimsenmiştir. Yapıların ve tesislerin önem derecesi değişik kategorilere bölünmüş ve istenilen deprem performansı, yer hareketleri seviyeleri ile bunların oluşma ihtimalleri arasında ilişkiler tanımlanır. 2. seviye depremler için tasarımda esas olarak yapıların ve zemin yapıların plastik deformasyon ve taşıma gücünün tahmin edilmesi gerekir [8].

Ayrıca Japon Yönetmeliği'ne göre;

Su temininde anti-sismik tedbirlerin geliştirilmesinden önce, ilk olarak aşağıdaki temel planlar dikkate alınır:

- Deprem meydana geldikten sonra oluşabilecek uygun hasar tahminleri, ve alınabilecek önlemlerde bu tahminlere dayandırılmaktadır.
- Depremden hemen sonra alınması gereken acil önlem planlarına girilir ve afet önleme tedbirleri etkili acil önlem bakım işlerini içerecek şekilde planlanır.
- Kalıcı restorasyon işleri uygulamaları organizasyonlar detaylı olarak planlanmalıdır.

Japon Yönetmeliği'ne göre planlama, tasarım ve uygulamalarla ilgili olarak; planlamada değişik şartlardaki depremlere göre yeterli önem verilmelidir. Yapıların rasyonel olarak tasarımı yapılırken önemli tesisler için yeterli önem verilmelidir. Ayrıca su servisinin deprem sonrasında iyi kapasiteyle devamının sağlanabilmesi için su temini sistemi korunabilmek üzere yönetmelikler iyileştirilmiştir [33].

2.5 Sonuç

Altyapı tesisleri hayatın devamlılığı için ihtiyaç duyulan en önemli yapılardır. Boru hatları ise su, atıksu, enerji, yakıt, telekomünikasyon gibi hayati ihtiyaçların

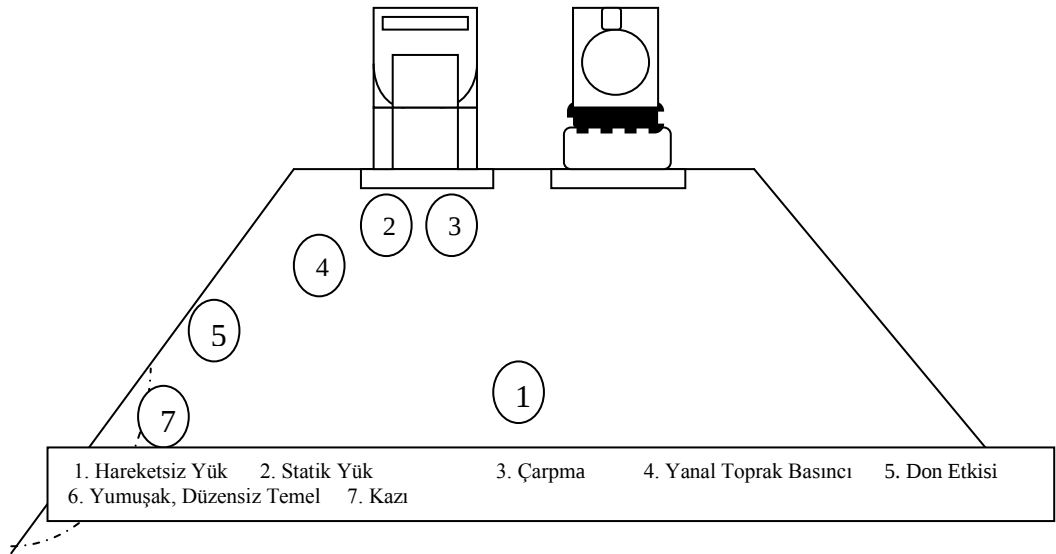
kaynaklarından kullanılacakları yere iletiminde gerekli olan yapılardır. Borular medeniyetin varoluşundan bu yana insan yaşamında yer almaktadır. İhtiyaç durumuna göre farklı amaçlar için kullanılmıştır. Boru teknolojinin de gelişimine paralel olarak üretim, teknolojilerinin de değişmesiyle, farklı ihtiyaçlar için farklı tip borular kullanılmaktadır. En çok hala beton, font, çelik dökme demir, font, cam takviyeli, plastik ve PVC borular hala kullanılmaktadır. Borular malzemelerin deformasyona karşı gösterdikleri dirence göre esnek ve rijit olarak ikiye ayrılmıştır. Boru hatlarının tasarımında zemin özellikleri ve boru malzemesinin rijit veya esnekliği oldukça önemlidir. Farklı borulardaki yük aktarmı ve boruların yük altındaki davranışları değişiklik gösterir. Her bir borunun malzeme özelliklerine göre belli deformasyon limitleri vardır. Bunlar aşıldığı takdirde çok ciddi deformasyonlara uğrarlar. Boruların deformasyonlarını asgariye indirebilmek için boruların tekniğine uygun şekilde zeminlere yerleştirilmesi gerekir. Borular zeminler içine yerleştirilirken boru rijitliği, hendek derinliği, doğal zemin özellikleri ve mevcut dolgu malzemelerinin parametreleri oldukça önemlidir. Ayrıca boruları yerleştirmek için zemin koşullarına göre farklı yöntemlerde kullanılmaktadır. Boru hatları tasarlanırken deprem yükleri son zamanlarda varolan yönetmeliklerde yapılan bazı değişikliklerle hem Türkiye’de hem de Japonya ve Amerika’da varolan yönetmeliklerde dikkate alınmıştır. Sonuç olarak; boru hatlarının depreme dayanıklılıkları tasarlanırken depremlerin performans hedefleri, muhtemel risk faktörleri, hasar tahminleri, depremsellik, zemin-boru etkileşimleri gibi birçok faktör dikkate alınmaya başlanmıştır.

3. BORU HATLARI ÜZERİNE ETKİYEN YÜKLER

3.1 Giriş

Gömülü borular üzerine etkiyen yükler sabit yükler ve sürşarj yükleri olmak üzere ikiye ayrılır. Sabit yükler dolgu ağırlığı ve yol üzerindeki kaplamanın ağırlığı gibi sürekli olan yüklerdir. Sürşarj yükleri ise yüzeye etkiyen, sürekli olan veya olmayan yüklerdir. Taşıt ve yapı yükleri gibi yükler sürşarj yüklerine örnek olarak gösterilebilir [24].

Boru hatlarında iç ve dış basınçların etkileri bulunmaktadır. Dolayısıyla tasarlanırken iç basınç, boru içindeki akışkanın hareketindeki değişiklikler, dış basınçlar ve ısı değişimleri nedeniyle meydana gelen gerilmelere karşı koyabilecek şekilde düşünülmelidir. İç basınçlar, iç sıvı basıncı ve su darbesinden meydana gelir. Dış basınçlar ise, boru üzerindeki geri dolgu ağırlığı, boru ve bileşenlerinin kendi ağırlıkları ve trafik yükleri nedeniyle meydana gelir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Boru üzerindeki yükler ve basınçlar [25].

Boru hatlarında dış yüklerin hesaplanması geçmişten bu yana araştırma konusu olmuştur. Sabit yükler ve sürşarj yükleri incelenmiştir. Sabit yükler sonucu kemerlenmenin olduğu gözlenmiştir. zemin kayma direnci yoluyla boru üzerindeki dolgu yükünün bir kısmının hendek kenarları ve tabanına iletilmesiyle “kemerlenme” meydana geldiği görülmüştür. Marshton ve Spankler Yük kabulleri bu yapılan bu analiz ve deneyler sonucu ortaya çıkmıştır. Bu kabuller ışığında zemin-boru etkileşimlerinin yer altındaki borunun performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Daha sonra zemin – boru etkileşimlerinin sismik etkiler altında yapmış olduğu davranış şekillerini tespit etmek amacıyla bir çok analiz metodları ortaya çıkmıştır. Farklı modellemeler ve farklı analiz metodları bu etkileşim sonucu boru davranışlarını tespit etmek için kullanılmıştır. Zemine gömülü boruların yer üstü yapılarından farklılık gösterdiği bu metodlar sayesinde de görülebilmektedir. Olası sismik tehlikelerin zemin ve boru davranışında değişiklikler gösterildiği anlaşılmıştır. Birçok hasara neden olan geçici yer değiştirme konusuna da bu bölümde değinilmiştir.

3.2 Yüklerin Tanımlanması

Boruların üzerindeki toprak ve trafik nedeniyle oluşan yüklere karşı yapısal davranışı, borunun bir halka olarak deforme olabilme kabiliyetine ve aynı zamanda boru etrafındaki geri dolgu malzemesinin rijitliğine bağlıdır. Boru yük altında, kalın duvarlı rijit bir halka gibi davranır. Zemin - boru ara yüzeyine dik doğrultuda ölçülen, boru tabanına ve tacına yakın yerlerde yüksek toprak basınçları meydana gelir. Düşük toprak basınçları ise borunun orta hattına yakın yerlerde meydana gelir. Fleksibl borular yatay yönde, boru kenarındaki geri dolguya doğru deforme olmaya çalışırlar. Geri dolgudaki pasif basınç kenarlardaki dış yönlü hareketle oluşur. Bu da borunun yük taşıma kabiliyetini artırmaktadır. Bundan dolayı fleksibl boru etrafındaki zemin basınçları, rijit boru etrafındakilerden daha uniform dağılır [10,35].

Boru üzerine dik olarak etkiyen toprak yükü (W_c); boru üzerine dik olarak etkiyen toprak yükü borunun üzerindeki dikdörtgen prizma şeklindeki toprağın ağırlığı olarak kabul edilir. Bu toprak prizmasının yüksekliği gömme derinliğine, genişliği de boru dış çapına eşittir.

$$W_c = \gamma_s H / 144 \quad (3.1)$$

Burada W_c (kN/m), boru üzerine dik olarak etkiyen toprak yükü (kN), γ_s , toprağın birim ağırlığı (kN/m³), H , boru tepesinden itibaren gömme derinliği (m)'dir.

Boru üzerine etkiyen trafik yükü (W_L); derine gömülü olmayan borular için kamyon, tren ve diğer taşıtların tekerlek yükleri oldukça önem taşımaktadır. Boruda taşıt yükünün oluşturduğu gerilme; taşıtın ağırlığına, lastik hava basıncına, lastik ebadına, taşıt hızına, yüzey pürüzlülüğüne, yol kaplaması cinsine, yol kaplaması kalınlığına, zemin cinsine ve borunun noktasal yüke olan mesafesine bağlıdır [22].

Boru duvarında meydana gelen kırılma veya eğilme, çekme gerilmelerinin veya boyuna doğrultuda eğilmelerin ortaya çıkışı ve boruda burkulmanın oluşması gibi nedenler, boru üzerindeki fazla yüklerin sonucu olarak göçmeye neden olabilir. Fakat, dış yükler nedeniyle gömülü borularda kırılma meydana gelmesi çok sık rastlanan bir olay değildir. Karşılaşılan göçme olaylarından çoğu hatalı inşaat, inşaat sırasında meydana gelen yüklerin tasarım yüklerinden fazla olması, temelin oturmasına veya göçmesine bağlı olarak boruların eğilmesi gibi nedenlerden dolayı meydana gelmektedir. Bundan dolayı, çeşitli durumlar için uygun boru cinsi veya mukavemetini seçmek amacıyla, öncelikle toprak yükü ve hareketli yükü hesaplamak, yataklama malzemesini seçmek, yük faktörünü belirlemek, güvenlik faktörünü uygulamak, uygun boru mukavemetini seçmek şeklinde sıralanan adımlar takip edilmelidir [15].

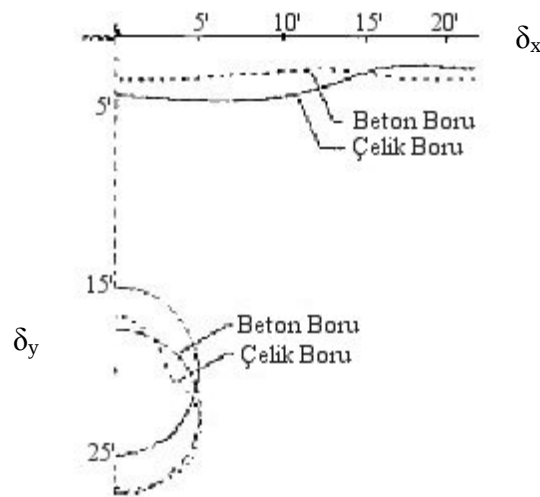
3.3 Boru Üzerindeki Dış Yükler ve Yükü Etkileyen Koşullar

Gömülü borulara etkiyen dış yükler; boru üzerindeki geri dolgu ağırlığı, boru ve bileşenlerinin kendi ağırlıkları ve trafik yükleri nedeniyle meydana gelir. Ayrıca, dolgu yüksekliği, boru üzerinde ve etrafındaki zeminin yapısı ve yoğunluğu, hendek genişliği ve derinliği, borunun yük altındaki deformasyonu ve inşaat yöntemleri de boruya etkiyen dış yükler üzerinde büyük öneme sahiptir. Bu nedenle, gömülü borulara etkiyen dış yükleri hesaplarken boru ile yan dolgunun rölatif rijitliği, dolgu yüksekliği, yükün cinsi, yerleştirme şartları, boru çapı, borunun şekli ve malzeme özelliklerini dikkate almak gerekir [15,36].

Boruya üzerindeki dolgu sebebiyle iletilen yük gerçekte dolgu ve borunun birbirlerine göre bağlı sıklıklarına bağlıdır. Boru üzerine etkiyen dolgu yükü prizma yüküne göre daha az olabilir. Bunun sebebi zemin kayma direnci yoluyla boru

üzerindeki dolgu yükünün bir kısmının hendek kenarları ve tabanına iletilmesidir. Bu yük iletimine “kemerlenme” adı verilir. Teoride gömülü boru üzerine prizma yükünün etkimesi için boru ve boruyu çevreleyen zemin sıkılıklarının birbirine eşit olması gerekir. Boru ve zeminin aynı sıkılığa sahip olmaları pratikte mümkün olmayacağı için gerçekte boru üzerine etkiyen yük, boru ve zemin bağıl sıkılıklarına göre prizma yükünden ya daha fazla ya da daha az olacaktır. Boru sıkılığı birçok esnek boru türünde olduğu gibi kendini çevreleyen zemin sıkılığından daha az olduğu takdirde boru üzerindeki dolgu yükünü azaltıcı yönde etkiyecektir. Uygulanan yük ve prizma yükü arasındaki fark olarak tanımlanabilecek kemerlenme yükü, genelde düşey yükteki azalma olarak algılanmaktadır. Eğer boru üzerindeki düşey yük, prizma yükünden fazla ise aksi yönde kemerlenme oluşmaktadır. Aşağı yönlü dolgu hareketi, gömülü boru üzerindeki dolgunun kemerlenme hareketine sebebiyet verir [37].

Fleksibl ve rijit boruların toprak yükü altındaki farklı deformasyon davranışları zemin-boru etkileşim mekanizmasını değiştirir ve farklı zemin kemerlenme davranışları oluşturur (Şekil 3.2) [37]. Boru rijitliğinin zemin rijitliğine oranı, boru üzerine etkiyen yükün büyüklüğünü belirler. Bu nedenle, gömülü yapıları projelendirilirken, yapı ve içine gömüldüğü zeminin performansı bir arada ele alınmalıdır. Bu durum genellikle zemin-yapı etkileşimi olarak adlandırılır. Zemin, yapı üzerine basınç etkitir. Eğer yapı zemine göre sıkışmaz nitelikteyse, yapı üzerinde basınç birikmesi meydana gelir.



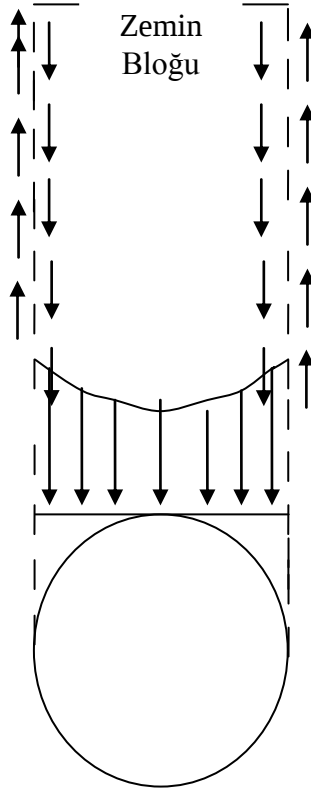
Şekil 3.2 : Boruların deformasyon durumları [11].

Yapı üzerindeki zeminin ağırlığı rijit bir boru üzerindeki düşey toprak basıncından küçüktür. Negatif kemerlenme bu şekilde oluşur. Bu durum meydana geldiğinde, yan dolgular oturur ve sonuçta da boruya ek bir yük etkimiş olur. Böylece, gerilmeler yan dolgularda azalır, boru etrafında yoğunlaşır.

Fleksibl bir boru üzerindeki toprak ağırlığı, boruda üzerindeki düşey toprak basıncından büyüktür. Pozitif kemerlenme de bu şekilde oluşur. Bu durumda, boru üstündeki zemin prizması yükünün bir bölümü yan dolgulara iletilir. Sonuç olarak, aynı veya benzer durumda yerleştirilen rijit bir boru, fleksibl bir borudan çok daha fazla yüke maruz kalır [15,36].

3.4 Dış Yüklerin Hesaplanması (Marshon Teorisi ve Spankler Teorisi)

Boru üzerine etkiyen dolgu yükünü dolgu kolonu ağırlığına veya başka bir deyişle “prizma eleman ağırlığına” eşit kabul ederek boru üzerine yansıtmak yaygın olarak kabul gören bir yöntemdir. Boruya üzerindeki dolgu sebebiyle iletilen yük gerçekte dolgu ve borunun birbirlerine göre bağıl sıkılıklarına bağlıdır. Boru üzerine etkiyen dolgu yükü prizma yüküne göre daha az olabilir. Bunun sebebi zemin kayma direnci yoluyla boru üzerindeki dolgu yükünün bir kısmının hendek kenarları ve tabanına iletilmesidir. Bu yük iletimine “kemerlenme” adı verilir. Boru üzerindeki dolgu, borunun düşey hareketini takip etmek istese de dolgudaki kayma yüzeyleri boyunca oluşan kayma direnci (sürtünme kuvveti ve kohezyon) bu hareketi engeller. Bu sebeple boru üzerine etkiyen düşey dolgu yükü boru üzerindeki dolgu kütlelerinden, dolayısı ile prizma yükünden azdır. Stabil uygulamaların birçoğunda oluşan kemerlenme genelde kalıcıdır (Şekil 3.3) [24].



Şekil 3.3 : Boru üzerine etkiyen yüklerin dağılımı [24]

Zemin kayma gerilmeleri sebebi ile oluşan kemerlenme, borunun büyük kapasiteli sıkıştırma makineleri altına yerleştirilmesi, taşıt trafiğine maruz sıg dolgu yükü altında kalması durumunda veya yumuşak, stabil olmayan dolgularda ortaya çıkmayabilir. Bu çalışmada hem kemerlenme etkisine göre hem de prizma yükü kabulüne göre hesap yöntemleri verilecektir.

3.4.1 Marshton yük kabulü

Marston 1930 yılında deney ve arazi ölçümlerine dayanarak gömülü boru projelendirilmesine ilişkin kemerlenmeyi de dikkate alan bir çalışma yayımladı. Amerikan inşaat mühendisleri birliği dergisinde yayınlanan bu çalışma büyük ölçüde kabul gördü. Marston teorisinin temel kabulü boru ve boruyu saran zemin sıkılıkları arasındaki farka dayanmaktadır [38]. Marston, hendek içindeki dolgunun örselenmemiş hendek yanal yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri tarafından destekleneceğini düşündü. Örneğin; fleksibl boru, Marston eşitliğine göre genişliği boru çapının iki katından daha dar olan bir hendeğin içine gömülürse, üstündeki dolgu yükü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.(3.2)

$$W = C_D \cdot \gamma \cdot B_d \cdot B_c \quad (3.2)$$

Burada C_D , hendek yük katsayısı (birimsiz), B_d , boru üzerindeki hendek genişliği (m), B_c , boru dış çapı (m), γ , dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (N/m^3), W , boru üzerindeki dolgu yükü (N/m)'dir.

$$C_D = \frac{1 - e^{-2K_u H_c / B_d}}{2 K_u} \quad (3.3)$$

Burada e , doğal logaritma tabanı, K , rankine toprak basınç katsayısı (birimsiz),

$$K = \tan^2 (45 - (\phi/2)) \quad (3.4)$$

Burada ϕ , zemin içsel sürtünme açısı ($^\circ$), u' , dolgu ve hendek arasındaki sürtünme katsayısıdır.

3.4.2 Spangler yük teorisi

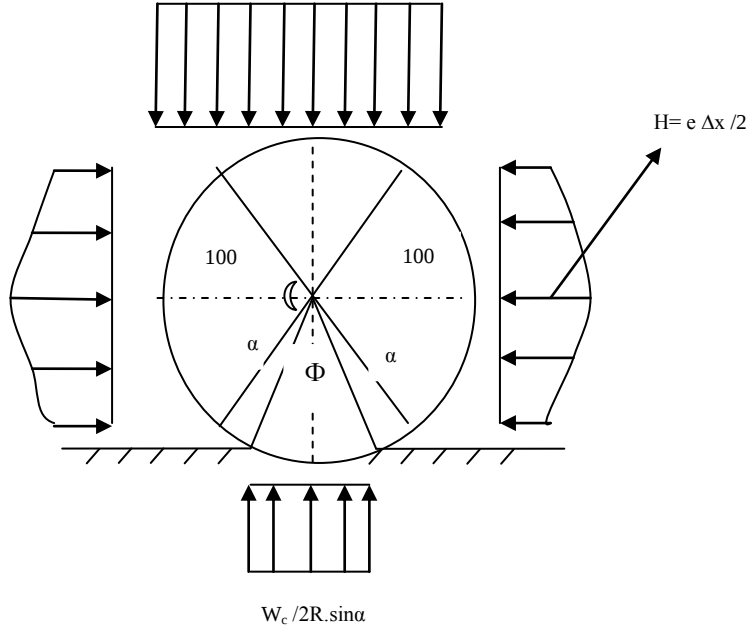
Hendek ortamında özellikleri bilinen geri dolgu malzemesi içerisine yerleştirilen esnek boruların şekil değişimlerini saptamaya yönelik yapılan ilk çalışma Spangler tarafından gerçekleştirilmiştir. Spangler (1941)'de yük altında şekil değiştiren bir borunun deformasyon oranının, yük (P), geri dolgu malzemesinin boru yan duvarlarına olan pasif itkisi ve borunun Elastisite modülüne (E_{boru}) bağlı olarak belirlenebileceğini belirtmiş ve elde edilen formüle Iowa Eşitliği denilmiştir. Spangler eşitliğinde bu üç temel değişken dikkate alınmıştır [39].

$$\Delta x = \frac{D_r \cdot W_c \cdot K \cdot r^3}{EI + 0.061 e \cdot r^4} \quad (3.5)$$

Burada Δx , borunun yatay deformasyonu (mm), D_r , deformasyon gecikme faktörü, K , yataklanma açısına bağlı olarak değişen yataklanma sabiti (birimsiz), W_c , borunun birim uzunluğuna gelen yük (N/mm), r , ortalama boru yarıçapı (mm), E , boru malzemesinin elastisite modülü (Mpa), I , boru cidarı atalet momenti (mm^3), e , pasif direnç modülüdür (MPa/mm).

Spangler, eşitliği deneysel olarak esnek boruların yerleştirilmelerinden çıkarmıştır. Spangler'in hipotezine göre halka üzerinde çeşitli noktaların yanal hareketi bilinirse, her noktadaki hareketin pasif direnç modülü (e) ile çarpılması ile yanal basınç dağılımı hesaplanabilir. (Şekil 3.4)

$$W_c / 2R$$



Şekil 3.4 : Spangler hipotezine göre yük dağılımı [24]

Matematiksel uygunluk açısından yanal basınç borunun orta kısmında 100 derecelik bir kısmı saran basit bir parabolik eğri olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda toplam düşey yükün boru boyunca üniform olarak dağıldığını, zemin reaksiyonunun düşey yüke eşit olduğunu ve üniform olarak boru yatağı boyunca dağıldığını kabul etmiştir [24].

Pasif direnç modülünün gerçek bir modül için doğru boyutlara sahip olmaması sebebiyle zemin özelliği olamayacağını keşfedilmesinden sonra 1955 yılında Spangler ve Dr. R. K. Watkins zemin reaksiyon modülü için E' 'nü önermişlerdir:

$$E' = e. r \quad (3.6)$$

Bu sebeple günümüzde kullanılan Iowa Eşitliği aşağıdaki son halini almıştır:

$$\Delta x = \frac{D_I. W_c. K. r^3}{EI/r^3 + 0.061 E'} \quad (3.7)$$

$E' =$ Zemin reaksiyon modülü (MPa).

Iowa Eşitliği yeniden düzenlenerek terimler boru sehimini etkileyen üç ayrı faktör olarak tanımlanabilir:

Burada $D_I.W_c.K$, yük faktörü, EI/r^3 , halka sıkılık faktörü, $0,061 E'$ ise zemin sıkılık faktörü'dür.

Bu doğrultuda Iowa Eşitliği'ni yeniden yazarsak;

Toplam yatay deformasyon = yük faktörü / (halka sıkılık faktörü + zemin sıkılık faktörü) halini alır.

3.5 Zemin Boru Etkileşimleri ve Depreme Göre Modellenmesi

Yer altı yapıları uzun hatlar boyunca ilerlediğinden ve genellikle bu mesafeler boyunca zemin özelliklerinin sürekli değişkenlik göstermesinden dolayı, bu tip yapılarda zemin-yapı etkileşimi problemlerinin her zemin ve yapı kesiti için ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu da hem maliyet hem de iş gücü açısından oldukça olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Genel olarak yer altı yapılarının çevrelerindeki zeminlerle etkileşimi kazılan zeminin yerine yerleştirilen yapısal elemanların rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Özetlemek gerekirse yer altı yapılarında zemin-yapı etkileşimi yapı rijitliğine ve boyutlarına, yapının etrafını çevreleyen toprak dolgu malzemesinin rijitliğine ve sonrasında uygulanan statik ve dinamik yüklemelere bağlı olarak değişmektedir. İnşaat sonrasında gömülü yapının ne miktarda deformasyona maruz kalacağını hesaplayabilmek için tüm bu etkenlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [40].

Boru ve etrafındaki zeminin etkileşimi, yer altındaki borunun performansını önemli ölçüde etkiler. Zemin – boru sistemi statik olarak belirsizdir. Bunu şöyle ifade etmek gerekir: dolgu kenar ile boru arasındaki basıncın dağılımı, her iki malzemenin rijitlik özelliklerini dikkate almadan, statik olarak hesaplamak mümkün değildir. Dolayısıyla boru rijitliğinin zemin rijitliğine oranı, boru üzerindeki yükün şiddetini önemli ölçüde etkiler. Mesela, rijit boru üzerindeki yük, aynı şartlardaki fleksibl boru üzerindeki yükten fazla olur. Boru hattının uzun süreler işlerliğini sürdürebilmesi için gömüldüğü yerde, stabil koşullar içerisinde yer alması çok önemlidir. Bundan dolayı borunun altına yapılan yatağın, boru hattı boyunca farklı oturmaları önler aynı zamanda borunun taban basıncı üzerinde de etkisi olmaktadır. Borunun yakınındaki dolgu da aynı yoğunlukta olması gerekir. Üniform yerleşim ve sıkıştırma basınç yoğunlaşmalarının önlemek için oldukça mühim bir konudur. Boru mukavemeti, rijitliği, hendek yüksekliği, dolgunun yoğunluğu ve zemin cinsine bağlı yerleştirme metotları farklılık gösterir [15].

Depremlerin sonucunda boru hatlarında meydana gelen hasarlar sivil yaşama öncelik eden hayati servislere, iletişim ve ulaşım sistemlerine çok olumsuz etkileri olmaktadır. Bunlardan dolayı bu yapıların sismik davranışları bilim adamları

tarafında oldukça fazla sorgulanmıştır. Yeraltındaki boru hatlarının davranışı ve sismik analizlerle bir dizi konu incelenmiştir. Örneğin; sismik uyarma ve toprak-boru sistemleri ile ilgili modellemeler, boru hatlarındaki sismik gerilmeler, bağlantı noktalarında ve dönemeçlerdeki gerilmeler, fay hareketi ve toprak sıvılaşmasıyla boru hattındaki gerilmeler, depremlerdeki boru hattı hasarları ve sismik tehlikelerde boru hatlarındaki kırılabilirlik gibi konularda birçok araştırma yapılmıştır [7]. Yapının matematik modelinin kurulmasının dışında bazı sayısal yaklaşımlarda bulunularak, basitleştirmeler, idealleştirmeler ve kabuller yapılmaktadır. Zemin özelliklerindeki belirsizliklerden bazı kabuller yapılmak zorunda kalınmıştır (Çizelge 3.1).

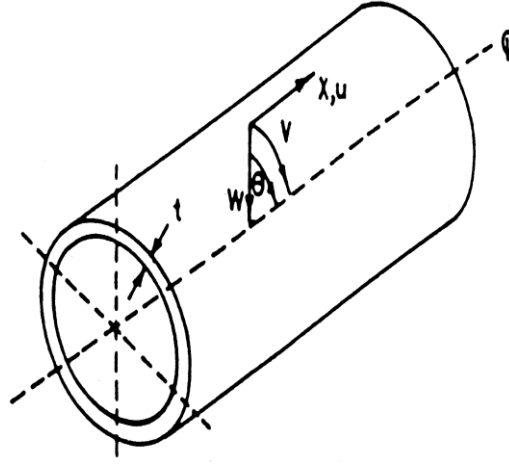
Çizelge 3.1 : Matematik modelin oluşturulması ve sayısal analiz yapılmasındaki kabuller [41]

	Yapılan Kabuller
Zemin	Zemin tabakasının idealleştirilmesi (Elastik, viskoelastik 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

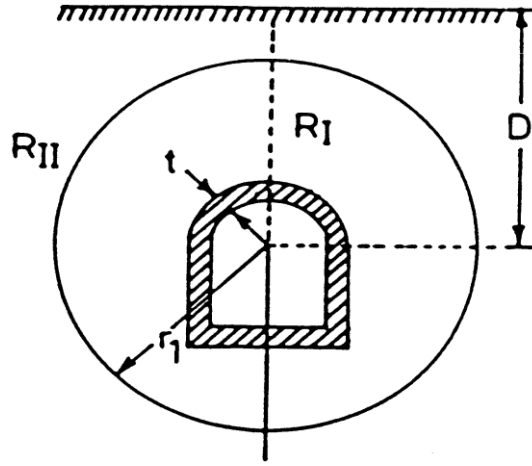
Bu kabullerin sayısal analizlerin yapılması oldukça katkısı olmuştur. Analizler çok basitleştirilmişten başlayarak üç boyutlu kompleks sonlu elemanlar analizlerine kadar uzanmaktadır. Kullanılan analiz metodları; yapı – zemin etkileşimi düşünülmeyen yapılan analizler, yapı – zemin etkileşimiyle yarı statik analizi, kirişteki elastik temel teorisi ile dinamik analiz, yapı – zemin etkileşiminde shell teorisi analizi, sinamik düzlem-gerilme modeliyle analiz, sonlu eleman metodu analizi ve gömülü boru hatlarında fay hareketi ve toprak sıvılaşmasına bağlı tepki analizleri olarak sıralandırılabilir. Yapılan analizler sayesinde zemin profili, temel şekli, temel derinliği, komşu yapıların etkisi, temel esnekliği gibi değişkenlerin yapıların sismik tepki analizleri üzerindeki etkisini araştırmak mümkün olmaktadır [7].

Boru hatlarının davranışları, yapılara kıyasla zeminin daha sert olması halinde tasarlanmış deprem sırasında zemin kendi bütünlüğünü kaybetmez. Bu nedenle deformasyona uygun olan yapıya deprem tesir eder. Oluşan deformasyonlar iki çeşit olup, bunlar eğrilik ve kaymadır. Yapı üzerindeki zeminin eğrilğine yani sonuçlanabilecek gerilmeleri emme kapasitesine sahip direk yüklemeleri temsil eder. Taban ivmesine tepki olarak zemine verir. Tasarımcılar için, yapısal tasarım kriteri, statik yükleri taşıma kapasitesini kaybetmeden ve belirlenmiş gerilme düzeyinde atalet yüklerine direnmektense, yeterli sünekliği absorbe edecek şekilde sağlanır. Depremde yer değiştirmeye mutlak genlik yüksek olabilir, fakat bu yer değiştirme uzun bir mesafeyi kaplayabilir. Bu nedenle depremdeki bozulma oranı genelde ufak ve sıklıkla yapıdaki elastik deformasyon kapasitesi kapsamındadır. İhtiyaç olan deformasyon, direnç sağlanamazsa elastik mesafe ötesinde yapı zorlanmayacağından maksimum deformasyon oluşacaktır. Eğer deprem tarafından maksimum deformasyon yüklendiğinde, elastik mesafe boyunca yapı gerilemeyecek olup, daha fazla önlem ihtiyaç olursa deformasyon için kurulabilecektir. Belirlenmiş birleşim yerleri plastik kısım boyunca kuvvetlendirilebiliyorsa bu birleşim yerlerindeki süneklik araştırılmalıdır [7].

Borunun riitliği, zeminin sertliğiyle kıyaslanabildiğinde boru-zemin etkileşimi önemli olur. Bu şartlar altında boru-zemin sistemi için şiddetli bir dinamik analiz gereklidir. Gömülü boru hatlarında sismik tepki analizi, çok noktalı sismik uyarılarda ve homojen olmayan non-lineer viskoelastik çevre davranışları altındaki zemin-boru sisteminlerini de içeren kompleks üç boyutlu dinamik analizlerle olabilir. Tüm şartları sağlanabilenen analizler imkansızdır, bu nedenle farklı ölçülerde yapılan basitleştirmeler önemi artan tepki miktarları için iyi tahminler yapılabilir. Yapının zemindeki deformasyonu takip ettiği farz edilir. Zemin ile borunun kesiştiği düşünüldüğünde, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6' da gösterilen modeller genellikle kullanılır.



Şekil 3.7 : Shell modeli



Şekil 3.8 : Hybrid modeli

Şekil 3.5'te yay zeminin sertliğini ifade eder. Zeminin sönümü ve sertliği dengedeki yaylar ve sönümleyiciler tarafından matematiksel model içerisinde hesaplanabilir. Şekil 3.7'deki shell modeli, ana eksenlerden birinin shell kesitiyle yaptığı açı ile birlikte hem de deprem dalgasını etkisiyle yapılarıdaki boyuna eksenle yaptığı açı sayesinde yapıdaki tüm düzlemsel ve boyuna gerilmeleri sağlar. Ayrıca shell modeli burkulma probleminin olabilirliğini ispat eder. Düzlem-gerilme modeli, ne zaman sismik dalgalar sayesinde dairesel gerilme ve çevresel yer değiştirme elde edinilmek istenirse kullanılır. Kesitte burkulma ihtimali de bu modelde araştırılır. Şekil 3.8'deki hybrid modelinde iç bölgeler (R_I), (R_{II}) dış bölge ise yarı boşluklu süreklilik tarafından sonlu elemanlar metodu tarafından modellenmiştir. Düzlem – gerilme modelinde ise kesişim bölgesi sınırlarında gerilme ve yer değiştirme sürekliliği korunmuştur [7].

Bazı harmonik fonksiyonlar tarafından zemin-yer değiştirme modelleri P, S ve Rayleigh dalgalarıyla gömülü boru hatlarında analizler yapılmıştır. Dalgalar boru hatlarının uzun eksenine paralel yayılma, S dalgaları için yapı üzerine sinüzoidal enine bozulmaya bağlı zorlamaya eğilimlidir. S dalgaları yapıyla doğru açıyı yapacak, geriye ve ileri boylamasına hareket etmeye, dalga özellikleri değişebilecek koşullar ve farklı zemin koşulları içinde ani geçişlere eğilimlidir. Digonal arpan dalgalar faz deplasmanları dışında boru hatlarının farklı bölümlerine konu olur. Bunlar yapı boyunca hareket eden basınç ve seyreltilmiş boylamsal dalgalar içinde sonuçlanır. Sismik kayma dalgalarında herhangi bir eğim olabilir, Fakat gözlemler genelde en büyük genlikteki yatay düzlem içindeki dalgaların oluşturduğu deplasmanların, ilgili yatay dalgaların genelde yarısı veya üçte ikisi byklğindeki düşey dalgaları gösterir [7].

3.6 Sonuç

Yeraltındaki boruların üzerine sabit ve sürşarj yükleri etki etmektedir. Boru zerindeki dış yükler, boru üzerindeki geri dolgu aęıręı, boru bileşenleri ve trafik yükleri nedeniyle meydana gelir. Boru zerine etkiyen yükleri etkileyen birçok parametre vardır. Boru ile yan dolgunun rijitliği, dolgu yüksekliği, yükün cinsi, yerleştirme şartları, boru çapı, boru şekli malzeme özellikleri gibi özellikleri dikkate almak gerekmektedir. Borular zerine aldıkları yüklere göre farklı deformasyon davranışları gösterirler. Boru zerindeki dış yükler hesaplanırken Marshton ve Spankler'in yapmış oldukları yk kabulleri kullanılmaydı. Daha sonra bu formüller geliştirilmiştir. Günümüzde IOWA eşitliği kullanılmaktadır. Yer altı yapılarında zemin-yapı etkileşimi yapı rijitliğine ve boyutlarına, yapının etrafının çevreleyen toprak dolgu malzemesinin rijitliğine ve sonrasında uygulanan statik ve dinaik yüklere bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak; inşaat sonrasında yerlatındaki borunun ne miktarda deformasyona maruz kalabileceğini hesaplayabilmek için tüm etkenlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

4. DEPREMİN BORU HATLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE OLUŞABİLECEK HASARLAR

4.1 Giriş

Geçmiş depremlerden edinilen tecrübelerle dayanarak, özellikle zemin koşullarında keskin değişimlerin gözlemlendiği yerlerde, sıvılaşma olasılığı olan zayıf zeminlerde, boru hatlarının diğer yapılarla bağlandığı yerlerde, büyük yer hareketlerinin meydana geldiği fay zonlarında, zemin kayma düzlemleri veya geçiş bölgeleri gibi borunun yapıya girdiği yerlerde yeraltı boru hatlarının büyük hasar gördüğü gözlenmiştir. Bununla beraber, çoğu gömülü boru depremden hasar görmemektedir. Örneğin, bükülebilir özellikte bağlantıları olan yüksek fleksibilite özelliği gösteren boru malzemesi kullanıldığında bu tip gömülü borular yer hareketlerine kırılmadan karşı koyabilmektedir [42, 43]. Depremde her ne kadar gömülü borular gibi yeraltı yapılarının üst yapı elemanlarından daha dayanıklı olduğu düşünülse de yakın zamandaki büyük depremlerde, gömülü borularda büyük hasarlar olduğu bilinmektedir. Doğalgaz hatlarında meydana gelebilecek bir hasar, depremde oluşan üst yapı hasarlarına ilave olarak büyük yangınlara sebep olabilmektedir. Ayrıca, böyle bir durumda özellikle su hatlarında ve pompa istasyonlarında meydana gelebilecek problem nedeniyle bu tür yangınlara müdahale şansı ortadan kalkabilmektedir.

Depremi boru hatları üzerindeki etkileri üzerine bir örnek vermek gerekirse; 1994 Northridge depremi sonunda Los Angeles şehri içme suyu şebekesinde oluşan hasarların değerlendirilmesi verilebilir. 1994 Northridge depremi, 1906 San Francisco depreminden beri A.B.D.'de bir su dağıtım şebekesinde meydana gelen en büyük zararı vermiştir. Los Angeles şehri içme suyu arıtma tesislerine kuzeyden su getiren Aqueduct 1, Aqueduct 2 ve Foothill Feeder adlı üç ana iletim hattı şehrin içme suyu ihtiyacının % 75'inden fazlasını sağlamaktadır. Deprem sonucunda şehre su getiren bu iletim hatlarında zararlar meydana gelmiştir. Los Angeles Su ve

Elektrik İdare'sine (LADWP) ve Metropolitan Su Kuruluşu'na (MWD) ait suyu şehir içersine ulaştıran iletim borularında (boru çapı ≥ 600 mm) 74 noktada ve LADWP dağıtım şebekesi borularında (boru çapı < 600 mm) 1013 noktada onarım gerekmiştir. Los Angeles'taki borularda depremin meydana getirdiği zararlar ve bu zararları karakterize etmek ve incelemek için oluşturulan veri tabanı Toprak (1998) ve O'Rourke, vd. (1998) yayınlarında sunulmuştur [44, 45].

Gömülü boru hattı sistemlerinde oluşabilecek hasarlarda; boru cinsi, boru çapı, ek türleri, zemin korozyonu ve boru yaşı gibi faktörler önemli rol oynamaktadır. Geçmiş depremlerde boru hatlarının performansı değerlendirildiğinde boru çaplarıyla onarım oranları arasında bir ilişki gözlenmiştir. Bu ilişkiyi boruları dağıtım (çapı 600 mm den küçük) ve iletim hatları (çapı 600 mm den büyük) olarak iki gruba ayırarak analiz etmiştir [44]. . Boru çapı büyüdükçe hasar oranı da düşmektedir. Bu konuyu irdeleyen O'Rourke ve Jeon (1999, 2000), hem yatay yer hızını hem de boru çapını, boru hattı onarım oranı ile ilişkilendiren bir bağıntı geliştirmiştir [45]. Boru hatlarının yapıldığı malzeme ve boruların ekleniş şekli deprem esnasındaki performanslarını etkilemektedir. En genel manasıyla boru hatları düktil ve kırılğan olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Örneğin düktil demir ve günümüzdeki çelik borular düktil borular grubuna dahilken, font ve asbestli çimento borular kırılğan borular grubuna girmektedir. HAZUS düktil borular için onarım oranı değerlerinin kırılğan borular için olanların üçte biri olarak alınmasını önermektedir. Font borulardan elde edilen hasar ilişkisi diğer boru türleri içinde ayrı ilişkiler geliştirmiştir [44,45].

4.2 Altyapıların Diğer Yer Üstü Yapılarından Farklılıkları

Yeraltı yapılarının deprem sırasındaki davranışını öngörmek için yapılan çalışmalarda üst yapıların sismik davranışına benzer yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, gömülü boruların sismik davranışı diğer üst yapılardan farklıdır. Zira, **a b** gömülü boru hatlarında sismik hareketler sonucu oluşan hasarlar, zemin hareketi ve faylanma, sismik dalgalar, kumlu zeminlerin sıvılaşması ya da yatay yönde komşu iki zemin tabakasının rijitliğindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Gömülü boru hatlarının sismik davranışı, birçok açıdan diğer yer üstü yapılarının davranışından farklıdır [7,43,46]. Bu farklılıklar aşağıdaki gibi özetlenebilir :

1. Üst yapıların tasarımını etkileyen en önemli faktör olan eylemsizlik kuvvetleri, gömülü borularda çevre zemin tarafından sınırlandırılır.
2. Birçok üst yapı zemin hareketlerine uygun biçimde projelendirilmesine rağmen, uzun ve sürekli sistemler olan boru hatları, farklı istasyonlar arasındaki faz farkı ve boru hattı boyunca zemin özelliklerinde gözlenen farklılıklar nedeniyle zemin hareketlerine uygun değildir.
3. Bir üst yapıda meydana gelen hasarlar sadece o yapıyla sınırlıyken, bir boru hattının belirli bir yerindeki hasar, sistemin diğer parçalarını da etkiler.

4.3 Hasar Türleri

Deprem nedeniyle boru hatlarında meydana gelen hasarlar ulaşım, iletişim, elektrik, petrol, doğalgaz, su ve kanalizasyon sistemleri gibi çok önemli servislerin servis dışı kalmasına neden olduğundan, günlük yaşamı olumsuz etkiler. Yapılan arazi incelemeleri ve çeşitli çalışmalara göre deprem nedeniyle gömülü borularda meydana gelen hasarlar ve bu hasarların görüldüğü yerler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [7,44,45] :

1. Zemin koşulları:

- Zayıf zeminli alanlar,
- Islah edilen, denizden-gölden kazanılan arsalar,
- Gevşek kumlu zeminler,
- Alüvyal ve dilüvyal zemin arasında sınırda olan zeminler,
- Boruların gömüldüğü zeminde keskin topoğrafik değişikliklerin olduğu yerler.

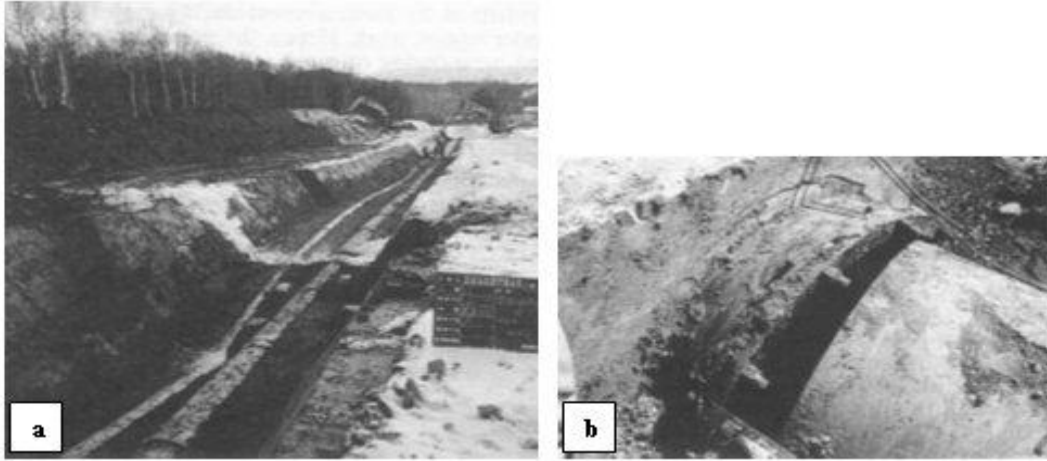
2. Yerleştirme koşulları

- Ana boru - yan boruların birleşim yerleri ile ana boru - bacaların birleşim yerleri,
- Yapılarla birleşim yerleri,
- Sığ kanalizasyon hatları,

3. Hasar türleri

- Boru hattının farklı noktaları arasındaki dalga yayılması ve faz farkı ile meydana gelen eksenel gerilme ve eğilme deformasyonları,
- Boru hattı önemli bir fay hattından geçtiğinde, deprem sırasında fay hareketlerinden kaynaklanan büyük yer değiştirmeler,

- Toprak kaymaları,
- Sıvılaşma nedeniyle boruların zemin içinde yüzmesi,
- Yükselme sebebiyle boru ekseninde yer değiştirme (Şekil 4.1a),
- Baca birleşim yerlerindeki çatlak ve kırılmalar (Şekil 4.1b),
- Birleşim ve dikiş yerlerindeki yer değiştirme, açılma ve kırılmalar.



Şekil 4.1 : 1993 Hokkaido – Nansei – Oki depreminde (M=7.8) boru hatlarında görülen hasarlar [47]

1999 Kocaeli Depremi sonucunda çeşitli bölgelerde farklı hasarlar oluşmuştur. Bunlar aşağıda verilmiştir [11] :

1. Su ve atıksu hatlarında orta derecede hasar görülmüştür. Bu hasarların ana sebebi boru içindeki sıvıların çarpma kuvvetlerinin projelendirmede dikkate alınmamış olmasından kaynaklanmaktadır.
2. Deprem bölgesindeki su ve atıksu arıtma tesisleri, deprem etkilerinin dikkate alındığı yakın zamanda yapılmış modern tesisler olduğundan herhangi bir hasarla karşılaşılmemiştir. Ancak, 6 tesisten birinde güç kaynağında problem görülmüştür.
3. Kaynaklı çelik malzemeden yapılmış gömülü borular her ne kadar genelde az veya hiç hasar görmemesine karşın, hasar gören yerlerdeki çelik boruların fay kırığı boyunca döşendiği ve bu kesimlerde yer yer 3m'den büyük yatay ötelenmeler oluşmuştur (Şekil 4.2.a).
4. Gömülü iletim ve dağıtım borularında çok ağır hasarlar görülmüştür. Ağır hasarın asıl nedeni, Adapazarı'nda görülen sıvılaşma, Gölçük civarındaki fay kırığı, tüm bölgede görülen güçlü yüzey sarsıntıları ve asbest çimentolu boru gibi zayıf boru malzemesi kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.2.b, Şekil 4.2.c).

5. Fay hatlarından geçen özellikle beton malzemenin kullanıldığı borularda burkulmaya bağlı oluşan boru kırılmalarıyla çok sık karşılaşılmıştır (Şekil 4.2.d).



(a), (b)



(c), (d)

Şekil 4.2 : Adapazarı su ve atıksu hattında borularda karşılaşılan hasarlar [11].

4.4 Hasarlara Neden Olan Faktörler

Deprem sonucu oluşan dalga yayılımına bağlı zemin hareketi, fay hareketi, sıvılaşma ve toprak kayması gibi etkenler önemli hasarlara yol açmaktadır. Fay hareketine dayanma yeteneği, boru hattı üzerine etkiyen sürtünme kuvvetleri sayesinde artar. Sünek malzemedan yapılmış borular, fay hareketlerine daha fazla mukavemet göstermektedir. Sıvılaşma ya da fay hareketi nedeniyle oluşan yer değiştirmeler, yeraltı yapılarında deprem kaynaklı hasarların ana nedenini oluşturmaktadır [43].

1. Fay hattı ya da toprak kayması ihmal edilirse, gömülü borularda hasara sebep olan iki etken vardır. Birincisi, sismik dalgalara bağlı deformasyon, diğeri ise boruyu çevreleyen zemin tabakalarının birbirlerine göre hareketleridir. Borunun sert zeminden yumuşak zemine geçtiği yerlerde, yani geçiş bölgelerinde sismik hasarlar görülmektedir.
2. Deprem esnasında genelde zeminin o anki hareketlerine benzer şekilde, boruların ve tünellerin hareketleri de gelişmektedir.
3. Gömülü boruların sismik davranışında, boyuna doğrultudaki deformasyon, borudaki eğilme deformasyonundan çok daha büyüktür.
4. Borunun kavisli bölümlerindeki eğilme deformasyonu, düz borulardaki eğilme deformasyonu ile aynı mertebededir.
5. Maksimum deformasyon, yüzey dalgaları sonucu meydana gelmektedir. Yer hareketinin ivmesi maksimum olduğunda, deformasyon maksimum değerine ulaşmaz.
6. Boruların sismik tasarım mukavemetleri açısından en önemli faktör sünekliktir. Örneğin çelik borular dökme demir borulardan daha dayanıklıdır.
7. Fay hatlarından geçen borularda burkulmaya bağlı oluşan boru kırılmaları sık karşılaşılan bir durumdur.

4.4.1 Dalga yayılımı

Zemin boyunca ilerleyen sismik dalgalar zeminde geçici şekil değiştirme ve eğriliklere neden olmaktadır Bu geçici şekil değiştirmeler farklı çaplardaki borular için araştırıldığında, borudaki şekil değiştirmelerin en önemli nedeni olarak görülmüştür. Yüzey dalgalarının yayılım hızları, cisim dalgalarınınkinden daha azdır. Bunun sonucu olarak da yüzey dalgaları, aynı parçacık hızına sahip cisim dalgalarına göre daha büyük zemin ve boru şekil değiştirmelerine neden olabilirler [48,49].

Sismik dalga yayılımı nedeniyle hasar gören yeraltına gömülü boru problemi gerçekte üç boyutlu bir problemdir. Bu problemin düzlemde ve üç boyutlu uzayda çözümü çok sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Problem lineer elastik, homojen, izotrop ve yarı sonsuz ortamda serbest yüzeyden h kadar derinlikte bulunan, eksen boyunca sabit çaplı bir borunun iki boyutlu problemi olarak ele alınmaktadır [41].

4.4.2 Fay geçişi davranışı

Fay atımı ve kopma uzunluğu için deprem büyüklüğünün bir fonksiyonu olan çeşitli ampirik ilişkiler de bulunmaktadır. Sürekli boru hatları ile parçalı boru hatlarının fay hareketi etkisi altındaki davranışları karşılaştırıldığında, parçalı boru hat hatlarının srekliilere göre daha az fay hareketine karşı koyabildikleri görülmüştür. Parçalı boru hatlarında izin verilen fay yer değiştirmesi özellikle bağlantı elemanlarının esneme, sıkışma ve dönme yapabilme yeteneklerine bağlıdır [49]. Borunun iç çapının 1.4 metreye indiği buruşma noktasında borunun iten görünüşünü göstermektedir. Boruda fay hareketi sonucu oluşan buruşma verilmiştir (şekil 4.3).



şekil 4.3 : Boruda fay kırık hareketi sonucu oluşan buruşma [50].

Tarek H.Abdoun ve arkadaşları depremdeki faylanmaya bağlı olarak yeraltındaki boru hatlarının davranışını etkileyen faktörlerle ilgili olarak bir takım testler yapmışlardır ve şu sonuçlara ulaşmışlardır. Yaptış oldukları 10 santrifüj testiyle kayar atımlı faylanmaya bağlı olarak yer altı boru hattı sistemlerinin davranışlarını etkileyen faktörlerin bulunmasına sağlamışlardır. Yaptıkları iki testte yavaş fay atımı oranı ve geri dolgu olan nemli toprak ve ölçülü bir gm derinliği ($H/D=2,8$) standart olarak kullanılmıştır. Diğer testlerde hızlı fay atım oranı, geri doldurulan kuru toprak ve yüksek (H/D) değerleri alınarak her parametrenin etkisi incelenmiştir. Sonucunda ise, test sonuçları fay atım oranı , toprak nem oranı gibi temel bileşenlerinin pik gerilmelerin yerine ve büyüklüğüne, pik yanal kuvvetler gibi bir etkisinin olmadığı belirlenmiş. Gömme derinliği (H/D) olarak borudaki pik gerilemelerin yeri hemde büyüklüğünü etkileyebileceği belirlenmiş. Ayrıca da boru çapı ve kalınlık oranı (R/t) boru – zemin etkileşimini etkileyen en önemli faktör olduğu belirlenmiştir [51].

4.4.3 Toprak kayması, oturma ve yıpranma

Toprak kaymaları zemin kütlesinin kalıcı yer değiştirmesine neden olur. Sonuçta borularda bu bölgeye etkiyen büyük yer değiştirmeler ciddi hasarlara yol açar. Özellikle yağışlı dönemde depremlerin meydana gelmesi sonucunda birçok toprak kayması oluşabilir (Şekil 4.4). Toprak kayması hareketinin miktarı kalıcı yer değiştirme cinsinden ölçülmektedir [52].



Şekil 4.4 : Düzce depremi sonrası E5 karayolunda meydana gelen toprak kayması [53].

Dolgudan doğal zemine geçiş bölgelerinde ve sıvılaşmanın rahatlıkla oluşabileceği yeni alüvyal zeminlerin bulunduğu alanlarda farklı oturma sonucunda boru kırılmaları gerçekleşmektedir. Ayrıca boruların bina ve tanklara bağlandığı yerlerde de farklı oturmaların gerçekleşmesi sonucunda kırılmalar gözlenmektedir. Oturma hareketinin miktarı kalıcı yer değiştirmeler cinsinden tanımlanmaktadır [52].

Özellikle parçalı çelik, dişli çelik ve dökme demir borularda kullanım süresi ve korozyon meydana gelecek, artırıcı etkide bulunmaktadır. Eski borularda göçme olaylarının görülmesi yeni borulara göre çok daha fazla bir oranda gerçekleşmektedir. 1987 Whittier Depreminde elde edilen kayıtlar, deprem sonucunda oluşan boru hattı kırıklarının borunun kullanım süresi ile birlikte arttığını göstermektedir. Benzer etkiye 1989 Loma Prieta Depreminde çelik borular üzerinde de rastlanmıştır [54].

4.4.4 Sıvılaşma

İlk olarak 1964 yılında Japonya-Niigata depremi ile Kuzey Amerika-Alaska depremlerinde sıvılaşmaya bağlı olarak gözlenen zemin hareketleri ve yapısal hasar

nedeni ile kumlu zeminlerin depremler sırasındaki davranışlarının belirlenmesi ile ilgili araştırmalar başlamıştır. Yapılan ilk çalışmalar laboratuvarda hazırlanmış kum numuneler üzerinde olmuştur [55,56,57]. Arazideki zemin yapısının laboratuvar ortamında oluşturulması değişik numune hazırlama yöntemleri ile gerçekleştirilmeye çalışılsa da örselenmemiş zemin numunesinin sıvılaşmaya karşı direncinin laboratuvarda hazırlanan zemin numunesine göre çok daha yüksek olduğu Hatanaka ve diğerlerinin 1988 yılında yaptığı çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Örselenmemiş zemin numunelerinin dinamik yükler altındaki Tsukamoto ve diğerleri (2001), Erken ve Ansal (1994), Özay ve Erken (2003), Kaya ve diğerleri (2002) tarafından araştırılmıştır [58-61]. Yapılan araştırmalardan suya doymuş kumlu, siltli ve yumuşak killi zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının genel olarak birbirinden farklılıklar gösterdiği elde edilmiştir [60].

Doygun kohezyonsuz zeminlerde gömülü boru hatları sıvılaşma sonucunda zemin yüzeyine doğru çıkarlar (Şekil 4.5). 1964 Nigaata (Japonya), 1967 Mudurnu Vadisi, 1970 Gediz, 1989 Lorna Prieta (Kaliforniya), 1995 Kobe (Japonya), 1998 Ceyhan-Misis ve 1999 İzmit körfezi depremleri sıvılaşmanın olduğu en çarpıcı örneklerdir. Sıvılaşmış zeminlerdeki yapılar suda yüzen gemilere benzerler.

Yüzeye doğru çıkma, yer değiştirme, burkulma, sıyrılma, boru hatlarında basınç ve kolektörlerin ayrılması boru hatlarında gözlenen sıvılaşma nedenli hasarlara örnek verilebilir

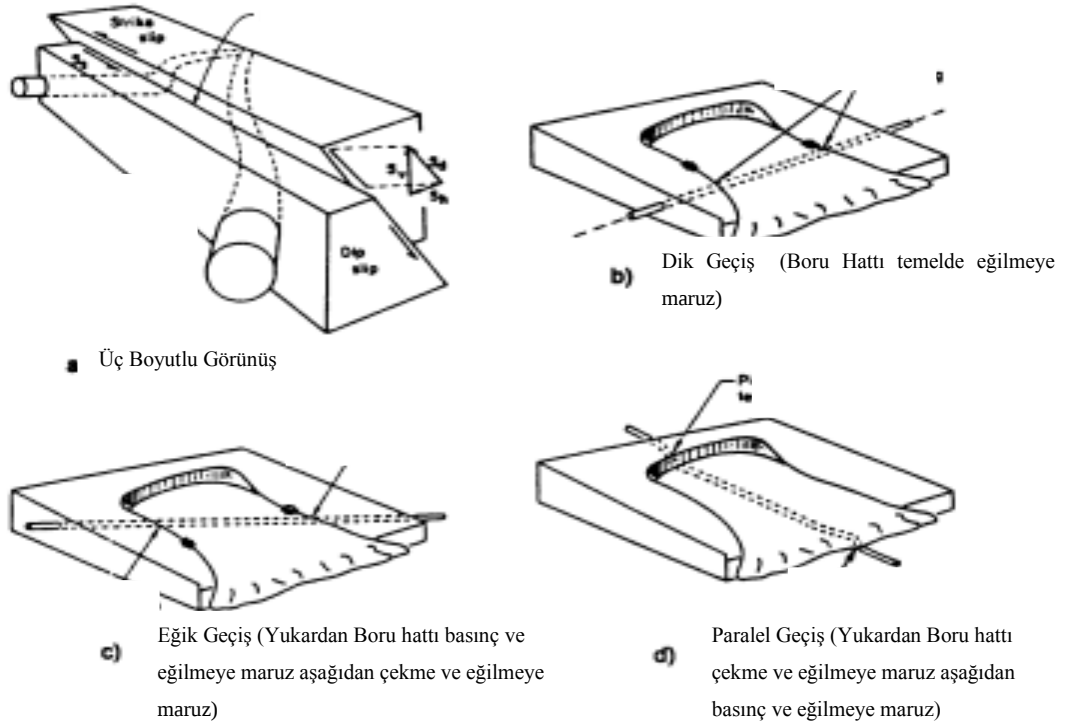


Şekil 4.5 : Çamurlu yüzeyde yüzen iki boru hattının havadan görünüşü [62].

4.5 Geçici ve Kalıcı Yer Deformasyonları

Deprem yeraldı boru hatları üzerine olan zararı, geçici yer deformasyonlarıyla (GYD) ya da kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) olmaktadır. Geçici yer deformasyonları deprem dalgalarının geişı esnasında oluşıan, zeminin dinamik tepkisi iken kalıcı yer deformasyonları ise deprem sonrasında zeminde oluşıan ve geri dönmeyen son yer değiştirmelerdir. (Şekil 4.6) GYD bazen küçük miktarda kalıcı deformasyonlar oluşturabilir fakat bunlar genelde yüzeysel etkilerdir. KYD genellikle büyük olmakta, örneğın fay hatlarının hareketlerini, şev kaymalarını, sıvılaşma sonucu oluşıan yer değiştirmeleri ve kohezyonsuz topraklarda oluşıan farklı oturmaları içine almaktadır [63].

KYD etkisi altındaki bir boru hattının maruz kalabileceğı belli başı yüklenme şekillerini göstermektedir. Şekil 4.6 Fay hattını geçen bir boru hattı fayın hareketine bağılı olarak değişik etkilere maruz kalır (Şekil 4.6.a). Normal fay, borularda çekme gerilmesi oluştururken ters fay basınç gerilmesine sebep olur. Yanal atılımlı fay ise boru ile fay kırığı doğırtusu arasındaki açıya bağılı olarak boruda çekme ya da basınç gerilmesi oluşturabilir. Şekil 4.6.b bir şev kaymasının ya da sıvılaşma sonucu oluşıan yanall yer değiştirmenin hareket yönüne dik yönde geçen bir boru hattını göstermektedir. Böyle bir boru hattı eğilme ve uzama etkilerine maruzdur. Eğer boru hattının geişı KYD yönüne göre eğikse boru hattında meydana gelen eğilme etkisine ilaveten yer hareketinin sınır bölgelerinde basınç ve çekme gerilmeleri oluşıur (Şekil 4.6.c). Boru hattı ve KYD doğırtusunun aynı olması durumunda ise hareketin baş kısmında boru hattı eğilme ve çekmeye maruz iken topuk kısmında eğilme ve basına maruz kalır. Örneğın 1999 Kocaeli depreminde 3 metrelik sağı atılımlı fay hareketiyle 2.2 metre çapındaki bir elik boru hattı zarar görmüştür. Depremden bir yıl önce yerleştirilen Thames Water su şirketine ait bu boru depremde zarar görmesine rağmen su iletmeye devam etti ve sonraki günlerde de geçici onarımı yapıldı [50]. Boru hattının fay hattına göre yerleştirilme konumundan dolayı boru hattı basınç gerilmesinden etkilenmiş ve boruda üç yerde buruşma ve yırtılmalar gözlenmiştir.



Şekil 4.6 : Deprem'in oluşturduğu KYD sonucunda zemin boru etkileşimi [49].

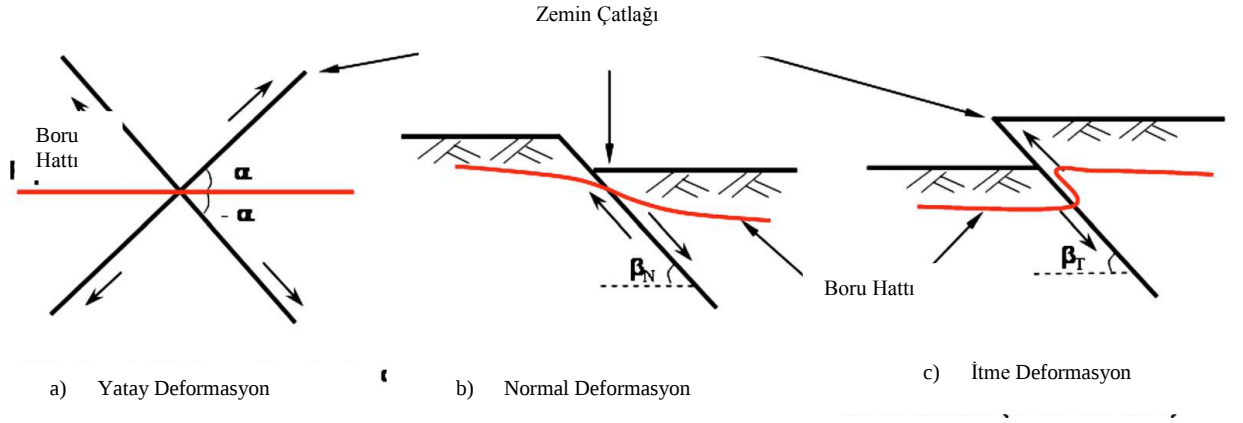


Şekil 4.7 : İzmit'te deprem sonrası demiryolu hattındaki KYD [64].

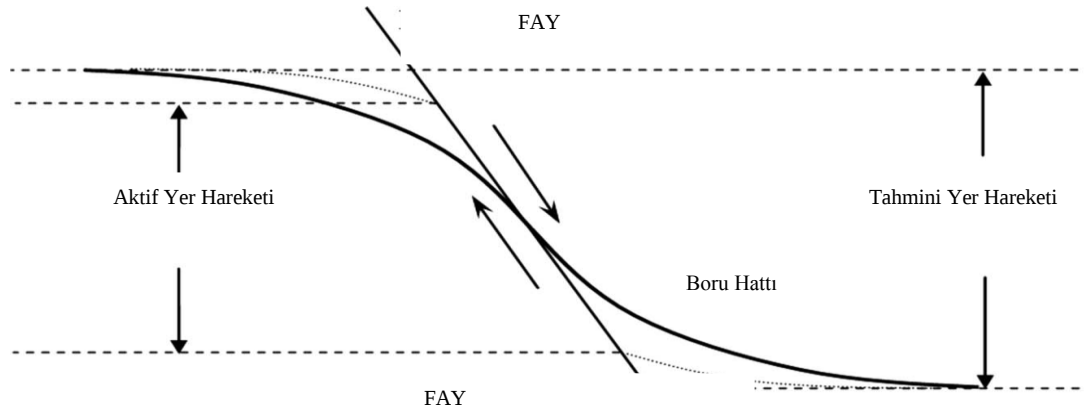
Yukarıda da belirtildiği geçici yer değiştirmeler sismik dalgalar sonucu oluşurken, kalıcı yer değiştirmeler bir önceki bölümde anlatılan yüzey faylanması, sıvılaşma, toprak kayması ve farklı oturmalar nedeni ile oluşmaktadır. Geçmişte karşılaşılan bir çok olayda yukarıda belirtilen tehlikelerin birçoğunun birarada meydana gelmesi

hasarları meydana getirmiştir. Yukarıda İzmit Depremi sonucu demiryolu hattında ortaya çıkan kalıcı yer değiştirme veirlemiştir (Şekil 4.7). Bu hasarlar bu tehlikelerin birarada olması ile oluşmuşsa da bazı olaylarda sadece dalga yayılımına bağlı hasarların görüldüğü gözlenmiştir. (Mexico City 1985 Michoacan Depremi). Örneğin, O'Rourke ve diğ. (1985), 1906 San Francisco Depreminde görülen boru kırılmalarının yarısının şehrin bir kısmında sivilaşma nedeni ile yan al yayılma bölgeleri sonucunda oluştuğu, diğ er yarısının ise daha büyük bir alanı kapsayan bölgede dalga yayılımı nedeni olduğunu belirtmişlerdir. Klasik kalıcı yer değiştirme hasarları zemin göçmesinden izole edilmiş alanlarda yüksek hasar oranı ile, dalga yayılımı hasarları ise saha geniş alanlarda fakat daha düşük hasar oranı ile gerçekleşir [49].

Depremler boyunca, kalıcı yer deformasyonu (KYD) yer altındaki su, gaz, benzin ve kanalizasyon boru hatlarını riske atabilir. Depremde kalıcı yer deformasyonu tarafından gaz ve su boru hatları hasarları meydana geldiği 1983 Nihonhai Chubu, 1994 Northridge, ve 1995 Hyogoken – Nambu depremleri gibi gerçekleşen önceki depremlere ait verilerde önemli kanıtları vardır. Yakın zamanda gerçekleşen 1999'daki Türkiye ve Taiwan Depremleri sayesinde de sivilaşmanın, fay yırtıklarının ve yer kaymalarının önemi altyapılardan olan otoban, elektrik, gaz ve su temin hatlarının davranışında çok önemli ilave kanıtların bulunmasını sağlamıştır. KYD genel olarak farklı yer hareketi içinde, yer her iki tarafa yataya ve dikeye, birbirlerine doğru kayarak veya yer düzlemine doğru hareketi kapsar. Eğer oluşan yer hareketi sonucu çekme ve basınçtaki boruya, faylanmanın yönüne ve çeşidine göre (Şekil 4.8a,b,c) fayda ve boruda rölatif yönelmeye dayandırılır. Vakalarda eksenel gerilme ve eğilme gerilmeleri nedeniyle KYD borunun içinde oluşur. Birçok fay deplasmanı yakın bir bölgeyi sınırlamasına rağmen, boru hatlarındaki potansiyel hasar borudaki bütün gerilmeleri büyük oranda etkiler [63] (Şekil 4.9).



Şekil 4.8 : Farklı zemin ayrılma modelleri



Şekil 4.9 : Boru deformasyonuna bağlı yer hareketi [63].

4.6 Boru Hatlarının Dünyada ve Türkiye’de Oluşan Büyük Depremlerdeki Sismik Davranışları

Yer altındaki boru hatlarında geçmiş depremlerin sonucunda bir dizi etkileri olmuş ve bunlarla birlikte sismik etkiler altında boru hatlarının davranışı üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Burada geçmişte karşılaşılan depremler sonrası tespitlere ve boru hatlarında oluşan hasarlar yer almaktadır.

4.6.1 Dünyadaki büyük depremler

Bu bölümde aşağıdaki tabloda yer alan depremlere ilişkin depremler hakkında bilgiler verilmiştir. (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1 : Hakkında Bilgi Verilen Büyük Depremler

Dünya’da Gerçekleşen Büyük Depremler	1900-1970 Arası Gerçekleşen Depremler	- San Francisco Depremi - Kanto Depremi - Anchorage Depremi - Niigata Depremi - Santa Rosa Depremi
	1970-1990 Arası Gerçekleşen Depremler	- San Fernando Depremi - Managua Depremi - Guatemala depremi - Cotabato Depremi - San Juan ve Mendoza Depremleri - Meksika Depremi - Nihonkai-Chubu - Napo Provience Depremi - Whittier Depremi - Spitak ve Leninakan Depremi - Loma Prieta Depremi
	1990 ve Sonrası Gerçekleşenler	- Limon Depremi - Kushiro-oki - Northridge Depremi - Kobe Depremi - Cariaco Depremi - Chi – chi Depremi
Türkiye’de gerçekleşen Büyük Depremler		- Erzincan Depremi - Adana-Ceyhan - Kocaeli Depremi - Düzce Depremi

4.6.1.1 1900-1970 arası gerçekleşen büyük depremler

San Francisco Depreminde (18 Nisan 1906, 7.8 (M)) deprem sonrası yumuşak zeminin oturması sonucunda şehrin ana su hattında kırıklar meydana gelmiştir. Şehrin güneyinde yer alan depolardan suyun teminini sağlayan büyük çaplı borular yumuşak zemin ile bataklık bölgesinde bulunmalarından ve fayla hattın kesişmesi sonucu olarak kırılmıştır. Çıkan yangınlara da şehre su taşıyan boru hattındaki bu hasarlar nedeniyle erken müdahale edilememiştir. Şehir içerisinde 16 farklı yangın alarmı gelmiştir. Yangınların öncelikli nedeni yağ lambaları ile yağ ve gaz sobalarının devrilmesidir. O zamanlarda çalışan yangın uzmanları her ne kadar onların su sisteminde bir aksaklık olmadığını ileri sürselerde birçok yangında verimli olarak çalışmamışlardır. Birçok yangın konut sakinleri tarafından söndürülmüştür, fakat deprem çok erken saatte meydana geldiğinden ötürü şehir merkezindeki binalara müdahalede geç kalınmıştır. 3 saat içerisinde 9 yangın büyük boyutlara ulaşmıştır. Sonraki 3 gün boyunca rüzgarın etkisi ile yangın batı yönüne sıçramıştır. En büyük kayıplar, depremin doğrudan etkisi ile değil, yangınlar nedeni ile oluşmuştur. San Francisco’da deprem sonrasında çıkan yangında, 1995 Hyogo-Ken Nanbu depreminde çıkan yangının verdiği hasara göre 10 kat daha fazla alan hasar

görmüştür [54]. Kanto Depreminde (Tokyo) (1923, 7.9 (M)) yeraltındaki 180 km civarındaki boru hattında 250 yerde hasarlar oluşmuştur. Bunlar birçoğu boruda çatlama ve kırılma olarak hafif hasarlı olarak görülmüştür Yamate ve şehir merkezi sınırı yakınlarında ise aşırı hasar olarak görülmüştür [65]. Anchorage Depreminde (Alaska) (1964, 8.3 (M)) ise gömülü boru hatlarının büyük kısmı toprak kayması sonucu büyük hasarlara uğramıştır. Farklı oturmalar, ana hat ve servis hatlarında kırılmalara neden olurken, doğrudan sismik kuvvetlere maruz kalan borular ezilmiş ve ayrılmıştır [7]. 1964 Niigata Depreminde (Niigata) (1964, 7.5 (M)) deprem sonucunda boru hattı üzerinde sivilaşmaya bağlı aşırı hasar, hat ve yan dallarda çok sayıda hasar, ek yerlerinde kırılma ve ayrılma olarak meydana gelmiştir. Ayrıca pompa istasyonlarında kısmi ve toplam göçmeler meydana gelmiştir [65]. 1969'da California'daki Santa Rosa Depreminde (California, USA) 1969, 5.7 (M) deprem sonucunda depolama tankları, pompa istasyonu ve barajlarda önemsiz boyutta hasarlar gözlenmiş, dağıtım borularında ise büyük çapta hasar meydana gelmiştir [66].

4.6.1.2 1970-1990 arası gerçekleşen büyük depremler

1970 ile 1990 arasında gerçekleşen depremlerin sismik performansları hakkında bilgiler verilmiştir. 1971 yılında San Fernando Depreminde (California, USA) (1971, 6.6 (M)) çeşitli boru hattı sistemlerinde 1400 kırık meydana gelmiştir. Şehrin su, gaz ve kanalizasyon servisleri geçici olarak servis dışı kalmıştır. Depreminin en büyük etkisi hidrolik yapıların tedarik kaynakları ve boruları üzerinde gördükleri hasardır. Kuyularda su seviyesinde belirgin bir değişiklik meydana gelmiştir. İçmesuyu sistemleri üzerindeki en önemli etki barajlar, rezervuarlar, su tankları, ana tanklar, borularda gözlenmiştir [66]. Hasarların çoğu sismik sarsıntı nedeni ile oluşmuş ve rijit bağlantı elemanlarının esnek bağlantı elemanlarına göre daha fazla hasara uğradığı gözlenmiştir. Ana göçme mekanizmaları ezilme, borularda eğilme göçmesi ile bağlantı elemanlarında oluşan sıyrılma ve kayma göçmeleridir. Deprem neticesinde basınç kuvvetleri fayı geçen boru hatlarında çoğunlukla burkulma göçmelerine neden olmuştur [67]. 1972 Managua Depreminde (Nikaragua) (1972, 6,25 (M)) dağıtım sistemi dökme demir borulardan oluşmaktadır. Küçük çaptaki borular ise PVC'dir. Şehrin altındaki alanda bulunan ana borularda yaklaşık 100 kırık rapor edilmiştir [67]. 1976'daki Guatemala depreminde (1976, 7.5 (M)) Motagua fayının kırılması ile 250 km boyunca ortalama 100 cm yanal yer değiştirme

meydana gelmiştir. Birçok teçhizatda hasarlar oluşmuş, ancak borularda hasar görülmemiştir [66]. Aynı yıl gerçekleşen Cotabato Depremi (Mindinao Adası Filipinler) (1976, 7.9 (M)) boru hattının 5,5 km'si 20 cm çapında borulardan, kalan 105 km si 26 cm çapında borulardan oluşmaktadır. Üzerine köprü kaplamasının düşmesinden dolayı 26 cm çapındaki borularda kırık oluşmuştur San Juan ve Mendoza Depremlerinde (Arjantin) (1977, 7.4 (M)) depremin hasar olduğu farklı büyüklüklerdeki hasarların en ciddileri Caucete, San Martin ve 25 de Mayo Bölgesindedir. Caucete şehrinin su dağıtım sistemi tüm hat boyunca kırılmıştır (Yaklaşık 40 km). Hasarın bu boyutta olmasının nedeni yüksek yer altı su seviyesi ve meydana gelen sıvılaşmadır. Meksika Depreminde (1977, 8.1 (M) Mexico şehrinde 72.000 km uzunluğunda boru hattı bulunmaktaydı. Boru çapları 5 cm ile 305 cm arasında değişmektedir. Gömülü borular yüzeydeki borulara göre daha büyük hasar uğramıştır. Büyük çaplı boruların çoğunluğu T-bağlantılar, çapraz bağlantılar, vanalar ve yapıların borulara bağlantılarında kullanılan bağlantı elemanları gibi rijit bağlantılar nedeni ile kırıkların bulunduğu yerler oldukça çabuk tespit edilmiştir. Hasarlı boruların toplam uzunluğu 80 km, yani toplam hat uzunluğunu %20 'si hasara uğramıştır. Kanalizasyon sisteminin yaklaşık %20'si olan 65 km'lik bölümü hasar görmüştür [66]. 1985' teki Nihonkai-Chubu (Noshiro) (1985, 7.7 (M)) Depreminde Akita ve Noshiro bölgelerinde boru hatlarında ve bacalarda hasarlara rastlanmıştır. Borularda kırılma, oturma ve ek yerlerinden ayrılma kırılma bacalarda ise çatlama ve kırılma gözlenmiştir. Bunlara sıvılaşmaya bağlı olarak oluşmuştur ve zemin yüzeyinde 20-40 cm seviyelerinde oturma gözlenmiştir [54]. California'daki Whittier Depreminde (California) (1987, 5.9 (M)) doğalgaz hattında, yüksek basınçlı gaz taşıma sistemi zarar görmemiştir. Dağıtım sisteminde tespit edilen 22 kırığın oluşmasındaki nedenin çoğunlukla korozyon etkisi olduğu gözlenmiştir. Depremden rapor edilen 5900 çatlağın, 2.000'inin deprem nedeni olduğu saptanmıştır. Gaz bağlantı elemanlarının yer değiştirmesi sonucunda hasarların %75'i meydana gelmiştir. 300 adet sızıntı şehir dağıtım şebekeleri ile kullanıcı sayaçları arasında meydana gelmiştir [54]. Ermenistan'da meydana gelen Spitak ve Leninakan Depreminde (Ermenistan) (1988, 6.8 (M)) Leninakan'ın su kaynağı şehrin 32 km kadar kuzeyinde bulunmakta ve su üç boru hattı ile şehre ulaştırılmaktadır. 500-600 mm çapındaki boruların biri çelik, diğerleri ise çelik ve dökme demir karışımıdır. Bu üç boru şehrin 7 km kadar kuzeyindeki bir şevden geçmektedir. Boruların yaklaşık 1 km'lik kısmı bu şevde gömülüdür. 4.5 km genişliğindeki bölgede kayalar

yuvarlanmış ve nehir boyunca bulunan borulara zarar vermiştir [66]. Yine California’da meydana gelen Loma Prieta Depreminde (California, USA) (1989, 7.1. (M)) Calaveras fayı kanallarının bulunduğu alandaki, 1950’lerde inşa edilmiş on, onbeş cm kalınlığındaki muflonlu bağlantılı dökme demir borulardan oluşan su şebekesi ciddi hasar görmüştür. Yerleşim bölgesindeki bağlantılarında birçok kırılma oluşmuştur. Sıkıştırılmamış dolgularda ve alüvyal zeminde bulunan boruların çoğu hasar görmüştür, bunun yanında sıkıştırılmış zeminlerdeki borularda ise daha az sıklıkla hasar oluşmuştur [66]. Loma Prieta depremi ile araştırmacıların dikkatini çeken bir olay ise, zeminlerde sıvılaşmanın meydana gelmesi sonucu oluşan büyütmedir. O’Rourke ve Pease (1995) sıvılaşmış zeminlerdeki geçici yanal kayma şekil değiştirmesinin, gömülü şebeke sistemlerindeki yatay yer değiştirmelerin ve sismik hasarların birincil sebebi olduğunu göstermişlerdir. Daha önceki çalışmalardan zemin titreşiminin, ciddi ölçüde deformasyona sebep olduğu bilinmekteydi. Loma Prieta depremi sonrasında Treasure Island’da doymuş kum alanlarında yapılan ölçümler bu çalışmaları doğrular nitelikte olup geçici yanal kayma şekil değiştirmelerinin büyüklüğünün tahmin edilmesi için nicel bir temel sağlamıştır [67].

4.6.1.3 1990 ve sonrası gerçekleşen büyük depremler

1990 sonrası dünyada gerçekleşen büyük depremlerde boru hatlarında meydana gelen hasarlar özetlenmiştir. 1993’teki Kushiro-oki (Kushiro) (1993, 7.8 (M)) Depreminde Kushiro kasabasında sıvılaşmaya bağlı olarak bacalar yaklaşık 1.5 m yüzeye çıkmıştır. Atıksu, yağmursuyu ve birleşim akımlı şebekelerdeki boru hatlarında genelde ek yerlerinde eğilme ve bükülme olarak ciddi hasarlar meydana gelmiştir. 1994 Los Angeles’ta meydana gelen Northridge Depreminde ((Los Angeles) 1994 (M)) Van Norman Complex’inin büyük bölümü ve Santa Susana Dağlarının güneydoğu sırtlarına komşu alanlar fayın yakınında bulunmaktadır. Buralardaki boru hatları çoğunlukla büyük S-dalgalarına maruz kalmıştır. Fayın yakınlarındaki bölgelerde kuvvetli yer hareketi yaklaşık 1 sn baskın periyotlu ve yüksek tanecik hızlı dalgalar oluşturmuştur. Bunun sonucu olarak oluşan büyük eksenel kuvvetler, hattın kaynaklı birleşimlerinde yönetmeliğin öngördüğü sınırların aşılmasına neden olmuştur. Bu deprem, çelik boruların fayın yakınlarında yer aldıkları takdirde daha çok hasar görebilir olduğunu göstermiştir. Çelik ana hat ve nakil hattı borularındaki hasarlar genelde bağlantı noktalarında bulunmaktadır. Bu

hasarlar; O-halka contalı muflonlu bağlantılarda burkulma ve Dresser manşonlarda eksenel basınç ve sıyrılma şeklinde ve kaynaklı muflonlu bağlantılarda kopma şeklinde olmuştur. Yanal atımlı alüvyal çökeltilerin bulunduğu Balboa Bulvarı Rinaldi Meydanı bölgelerinde olduğu gibi, çoğu bölgede de ana su boru hatlarında oluşan hasarlar zeminin kalıcı deformasyonuna bağlanmıştır. Diğer bölgelerdeki hasarlar ise, sismik dalga yayılımına, zemin-boru hattı etkileşimine bağlı olarak açıklanabilir. 54-77, 78- 85, 120 inçlik beton borularda kırılmalar meydana gelmiştir. Tünellerde ise boru hatlarının aksine Terminal Tepesi çevresindeki birkaç küçük çatlak haricinde önemli bir hasar rapor edilmemiştir. Terminal Tepesi'nin kuzeyindeki 77 inçlik çelik boruda basınç nedeni hasar gözlenmiştir. En çok hasar korozyon belirtileri gözlenen rijit bağlantılı çelik borularda meydana gelmiştir [54]. 1994'de gerçekleşen Kobe Depreminde ((Japonya) 7.2 (M)) deprem esnasında büyük bir sivilaşmanın beraberinde su boru hattındaki büyük hasarlara ve yer yer hattın kopmasına neden olarak farklı oturmalar ve yanal yer değiştirmeler görülmüştür. Su şehrin arkasındaki tepe ve dağlardaki depolarda cazibe ile sağlanmaktadır. 86 rezervuardan sadece birinde deprem sonrası yapısal hasar rapor edilmiştir. Özellikle su boru hatlarındaki kopmalar ve yer değiştirmeler nedeni ile ana depremden 24 saat sonra 86 rezervuarın tamamı boşalmıştır. Zeminin sivilaşması nedeni ile hasar gören su şebekesindeki su kaybı yüzünden yangınlara karşı konulamamış, Kobe şehrinin 0.6 km²'lik kısmı yangın sonucu yok olmuştur. Toprak kaymaları, farklı oturmalar, sivilaşma ve yanal yayılma kaynaktan su akışının durmasına, iki ana ve bir küçük su arıtma tesisinin hasar görmesine ve dağıtım hattının parçalanmasına neden olmuştur. Higashinada atıksu arıtma tesisi Kobe şehrinin arıtma kapasitesinin üçte birini oluşturmaktadır. Tesis arazisinde meydana gelen sivilaşma nedeni ile iskele duvarlarında 2-3 m'lik yanal hareket meydana gelmiş ve bu yüzden tüm bölgede ortalama 1m 'lik düşüş yaşanmıştır. Zemin göçmesinin sonuçları sadece su temini ve atıksu sistemlerine zarar vermekle kalmamış, yarma-dolgu bölgelerinde sivilaşma nedeni zemin hareketi ve farklı oturmalar nedeni ile telekomünikasyon ve elektrik üretim tesisleri de zarar görmüştür. Kobe şehrinde gaz dağıtım boru hattının vidalı çelik birleşimlerde kopmalar ve yerinden ayrılmalar ile oldukça büyük bir hasar gözlenmiştir [67]. Cariaco Depreminin (Venezuela) 6.9 (M) sonucunda El Pilarfayında 50 km'lik bir kopma ile sağa doğru 40 cm'lik yanal yer değiştirme meydana gelmiştir. Gömülü borular ve atıksu arıtma tesisleri hasarlar görülmüştür. Carioca'dan 5 km'lik uzaklıkta fayı fayı 30 ile 35,5 derece açı ile geçen bir içmesuyu

borusu eğilme basınç kuvvetlerinin etkisi sonucunda göçmüştür [66]. Taiwandaki Chi – Chi Depreminde (Taiwan) 7.3 (M) çok büyük fay kırılmalarına neden olmuştur. Fayın toplam uzunluğu 125 km civarında, maksimum düşey yer değiştirme ise 10 m civarındadır. Birçok bölgede su ve gaz boru hatlarında hasarlar rapor edilmiştir. Fay üzerindeki boru hatlarının, fay atımı ile oluşan kesme yüklemesine maruz kalmaları sonucunda hasar gördükleri düşünülmektedir [67].

4.6.2 Türkiye’de gerçekleşen büyük depremlerde boru hatlarının durumları

Türkiye’de 20. Yüzyılın ortalarında gerçekleşen büyük depremlere baktığımızda 1939-Erzincan, 1942-Erbaa, 1943-Kastamonu, 1944-Gerede, 1966-Varto, 1975-Lice, 1976-Çaldıran depremleri anımsanır. Son 30 yılına baktığımızda ise 1983-Erzurum-Kars, 1992-Erzincan, 1995-Dinar depremleri ve 1998 Adana-Ceyhan, 1999 İzmit ve 1999 Düzce depremleri anımsanır.

Bu depremlerin boru hatları üzerinde önemli etkileri olmuştur. Özellikle 1992 Erzincan Depreminde 6.9 büyüklüğünde, merkez üssü USGS’e göre 39.705N ve 39.549 E de, odak uzaklığı ise 28 km olarak belirtilmiştir. Bu depremle ilgili hazırlanan raporlarda, su dağıtım hattında hasarlar gözlemlendiği belirtilmiştir. Erzincan’ın güneyinde yer alan kuyulardan su şehirde yer alan depolara pompalanıp binalara şebeke hatlarıyla dağıtılmaktaydı. Kuyular hasar uğramış ve elektrik kaynağının çalışmaması sebebiyle şehir üç gün suya muhtaç kalmıştır. Aslında daha büyük hasarlar borularda meydana gelmiştir. Şebeke hattında Q600 mm dökme demir, Q80-Q120 mm PVC ve Q200-Q250 mm Asbest çimento borular vardı. Ana dökme demir borularda 4 adet, diğer alt kollarında 25 adet göçme saptanmıştır. Ancak bu sayılar kesin değildir, çünkü onarım çalışmasına katılan işçilerin birçoğu aralıksız çalışmış ve bu çalışmaların kaydı alınmamıştır. PVC ve asbest çimento boruların birleşim yerlerinde kırılmalar gözlemlenmiştir. Binalara bağlanan su borularının bağlantılarındaki hasarlar onarılmadığından şehrin büyük bir kısmına 1 hafta süre ile su verilememiştir. Depremden 2 hafta sonra su hattının %70’lik bir kısmı onarılmıştır. 60 su tankı acil durum kaynağı olarak kullanılmıştır. Erzincan’da bulunan kanalizasyon boru hattı 250 km uzunluğunda olmasına rağmen, deprem sonrasında yaklaşık %90’lık kısmında herhangi bir büyük sorun çıkmamıştır. Tanklarda ve pompalama istasyonlarında hasar gözlemlenmiş, fakat bu hasarlar işletimi etkilememiştir. 27 Haziran 1998 Ceyhan’da meydana gelen ve 6,3 büyüklüğündeki Adana-Ceyhan Depreminde de boru hatları büyük oranda etkilenmiştir. Deprem

şimdiye kadar Türkiye'de en yaygın sivilaşma yapmış depremlerden ilkinin temsil etmektedir. Boru hatları oldukça yoğun bir şekilde etkilenmiş özellikle Abdioğlu yakınlarında depremin etkisiyle su kanalları tahrip olmuştur. 17 Ağustos 1999'da merkezi İzmit Şehri ve Gölçük İlçesi arasında kalan 7.4 büyüklüğünde meydana gelen ve 45 saniye süren Marmara Depreminde bir çok yapı çökmüş, yollar, demiryolları ve boru hatları hasar görmüş, sivilaşma sebebiyle bir çok yapıda tilt, farklı oturmalar sebebiyle hasarlar oluşmuştur. Deprem sırasında kimi yerlerde 5 m' ye varan yatay ötelenme gözlenmiştir. 1999 Kocaeli Depremi Hasar Tespit Raporuna göre yer altındaki borularda hasarlar meydana gelmiştir [68]. Hasar gören bölgede daha çok faylanma sonucu oluşmuş kalıcı zemin yerdeğiştirmesi gözlenmiştir. Fayı geçen yer altındaki boru hatları ise ciddi hasarlara uğramıştır. Etkilenen bölgedeki ve genel olarak şehrin yaşadığı kıyı kesmindeki suyun servisi Thames Water adlı şirket tarafından inşaa edilip ve işletilmesi de kendisine ait olmak üzere yeni tamamlanmıştı. 60 milyon m³'lük rezervesi olan 40 m yüksekliğinde bir baraj inşaa edilmesiydi. Su arıtma tesisleri ve önemli dağıtım şebekeleri genelde iyi görünmesine rağmen hasarlar mevcuttu. Lokal dağıtım şebekeleri özellikle Gölçük, İzmit ve diğer alanlarda su dağıtımını İSU tarafından servis ediliyordu ve bunların birçoğunda borulardaki hasarların çokluğundan sıkıntılar yaşanmıştır. Dolayısıyla su tankerler vasıtasıyla şehre dağıtılmıştır. BOTAŞ kendi hatlarında hiçbir sorun yaşanmadığını belirtmiştir. İzmit Gaz Dağıtım İşletmesi ise ana şebekede sorun olmadığını fakat %15 kadar servis kutusunun evlerin çökmesi sebebiyle hasara uğradığını belirtmiştir. Doğalgaz kutularındaki hasarlar İstanbul'da da etkisini göstermiştir. 80 km uzunluğundaki Gölçük-Yalova boru hattı ve üzerindeki su depolarının bir çok noktasında hasarlar oluşmuştur. Dolayısıyla buralarda oluşan sivilaşma ve fay yırtılmaları sebebiyle bir çok yerde borular kırılmış ve uzunca bir süre su temini kesilmiştir. İzmit atıksu arıtma tesisi ise mekanik ekipmanlarda oluşan hasarlardan ötürü bir süre kapatılmıştır. Gölçük'ten geçen atıksu hatları çok ağır hasar uğramıştır [69].

Gerçekleşen bir olay örnek veilmek istenirse; Sapanca Gölü kıyısındaki 560 km'lik Arifiye Su hattının 360 km'sinde önemli hasarlar oluşmuştur. Yüzey kırığı sebebiyle kanalizasyon hatları ile telefon ve elektrik hatlarında da ciddi hasarlar tespit edilmiştir. Adapazarı Su Hattında ise 500 km'lik gömülü borunun neredeyse tamamında ağır hasarlar görülmüştür. Ağır hasarın en önemli sebebi tüm hattın %75'inin asbest çimentolu gevrek borulardan oluşmasıdır. Adapazarı atıksu

şebekesindeki borularda orta derecede hasar ortaya çıkmıştır. Sapanca kesiminde ise 90 km'lik asbest boruların bağlantı noktalarının 400'ünde hasar görülmüştür. Yalova-Gölcük kesiminde deprem sonrasında su ve kanalizasyon sisteminin büyük kesiminde hasar görülmesine rağmen, ana depremten 7-20 gün sonra oluşan artçı depremlerde de yeni hasarlar meydana gelmiştir. Benzer durumla, Değirmendere ve İzmit kent merkezinde de karşılaşılmıştır [70]. Acısu köyünde ise 28 inç çaplı su iletiminde kullanılan çelik boruların burkulması görülmektedir. Bu boru hattı ana fay çizgisini çaprazlama geçmektedir. Bu bölgenin yakınlarında bulunan kavak ağaçlarının bulunduğu alanda yapılan ölçümler sonucu 2.5m yanal atım olduğu saptanmıştır. 2m'den fazla bir düşey yer değiştirmeye neden olan ikincil bir ormal fayı geçen Kavaklı'daki boru hattının kırılması olmuştur. Şekil 4.9'da fay hattı boyunca borudaki yer değişme görülmektedir. Ayrıca Arifiye'deki kanalizasyon borusundaki kırılma görülmüştür. Bu boru hattı ana fayı dik olarak kesmektedir ve borunun ayrılması yaklaşık 3 m'dir. Kullar bölgesindeki su boru hattında 2.4 m çapındaki çelik borularda fay kırılması nedeni ile hasarlar meydana gelmiştir [70]. Nüfusu yaklaşık 20.000 olan Sapanca Şehri suyu yaklaşık 80 m derinlikteki kuyulardan sağlamakta ve dağıtım 185 km'lik bir boru hattı ile yapılmaktaydı. Toplam uzunluğun yaklaşık %80'i asbest-çimento borudan geri kalan kısmı ise PVC borudan oluşmaktaydı. Ana boru hattının çapı 400 mm idi. 7 Eylül 1999 tarihi itibari ile toplam 300 onarım tanımlanmıştır. Onarım oranı kırık adetinin toplam boru uzunluğuna bölümü olarak tanımlanmış ve bu değer 1.62 km'dir. Onarım işleri sonunda toplam onarım işlerinin %80'i tamamlanmıştır. Hasarların büyük çoğunluğu Sapanca Gölü ve nehirler çevresinde gömülü asbest-çimento boruların bağlantılarında meydana gelmiştir. Sıvılaşma ve/veya fay hareketi sonucu oluşan zemin deformasyonunun bu bölgede oluşması, boru hasarlarının ana nedeni olarak görülmüştür [71]. Kocaeli depreminden İstanbul'da etkilenmiştir ve depremin ardından Tuzla atıksu arıtma tesisinde ham atıksuyun tuzluluk oranında artış gözlenmiş burda deniz seviyesinin altında olan borulardaki hasarlardan dolayı ortaya çıktığı belirlenmiştir. Kocaeli Depremi'nde sonra gerçekleşen 1999 Düzce Depremi'nde Düzce ve Kaynaşlı'daki atıksu sistemleri bu yer hareketlerinden ötürü ağır hasarlara uğramışlardır [72].



Şekil 4.9 : İzmit Depreminden meydana gelen yer değiştirme [72]

4.7 Sonuç

Altyapılar diğer yer üstü yapılarından farklılıklar göstermektedir. Depremin yeraltı boru hatları üzerine olan zararı, geçici yer deformasyonlarıyla (GYD) ya da kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) olmaktadır. Geçici yer deformasyonları deprem dalgalarının geçişi esnasında oluşan, zeminin dinamik tepkisi iken kalıcı yer deformasyonları ise deprem sonrasında zeminde oluşan ve geri dönmeyen son yer değiştirmeler olup GYD bazen genelde yüzeysel etkilerde olsa küçük miktarda kalıcı deformasyonlar oluşturabilir. KYD genellikle büyük olmakta, örneğin fay hatlarının hareketlerini, şev kaymalarını, sıvılaşma sonucu oluşan yer değiştirmeleri ve kohezyonsuz zeminlerde oluşan farklı oturmalara neden olmaktadır. Geçmiş depremler sonucunda arazilerde yapılan çalışmalarda zemin koşullarının özellikleri (zayıf, ıslah edilen, gevşek kumlu zeminler, alüvyal zeminler, vs..), yerleştirme koşullarından dolayı (ana boru yan boru birleşim yerleri ile ana boru-bacaların birleşim yerleri) birçok çeşit hasar türü meydana gelmiştir. Boru hattının farklı noktaları arasındaki dalga yayılması ve faz farkı ile meydana gelen eksenel gerilme ve eğilme deformasyonları, fay hareketiyle kaynaklanan büyük yerdeğiştirmeler, toprak kaymaları, sıvılaşma nedeniyle boruların yüzmesi, boru baca birleşim yerlerinde çatlak ve kırılmalar boru ekseninin yer değiştirmesi, birleşim yerlerinde yer değiştirme, açılma ve kırılma gibi çok büyük hasarlar geçmişte meydana gelen büyük depremlerde depremlerde oluşmuştur.

5. PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE FARKLI ZEMİNLERDEKİ BORULARIN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

5.1 Giriş

Kocaeli Depreminde, özellikle Adapazarı'nda temiz ve atıksu şebekelerinde önemli hasarlar meydana gelmiştir. Boru hatlarında meydana gelen hasarlar genelde farklı özelliklere sahip zemin profillerinde farklı şekillerde gözlenmiştir. Ayrıca aynı zeminde farklı malzemeden üretilen borularda da farklı tepkiler verdiği belirlenmiştir. Bu durumu sonlu elemanlar yöntemiyle incelemek amacıyla; Adapazarı – Kocaeli – İstanbul Hattı üzerinde yer alan Dilovası Organize Sanayi Bölgesi içinden alınan iki farklı zemin kesitinde ve Adapazarı Tıgıcılar bölgesinden alınan bir zemin kesitinde gömülü olan boru hatları PLAXIS yazılımıyla analiz edilmiştir. Bu bölümde, PLAXIS bilgisayar programı yardımıyla farklı zemin koşullarındaki zeminlere gömülü boruların deprem yükleri altında davranışlarını inceleyebilmek amacıyla analizler yapılmıştır. PLAXIS bilgisayar programında modellenerek sayısal çözümler elde edilmistir.

5.2 Plaxis Sonlu Elemanlar Programının Tanıtılması

Son yıllarda, teknolojiye yaşanan gelişmelere paralel olarak teorik analizlerde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, en yaygın olarak kullanılan sayısal çözüm yöntemlerinden birisidir. Buna göre, sürekli ortamlardan oluşan sistemler üzerinde, sonlu eleman ağı ile hayali düğümler oluşturulur. Sisteme ait hareket denklemi kodlama tekniği ile sistem kütle ve rijitlik matrisleri oluşturularak elde edilir. Sistem hareket denklemi de uygun bir yöntem ile çözülerek, deplasmanlar ve gerilmeler hesaplanır. Bu yöntemle ağ modelindeki her eleman komşusu olan diğer elemanlara gerçekte sonsuz sayıda nokta ile bağlı olmasına rağmen, bu yöntemde sadece düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanır. Böylece, deplasmanların

uygunluğunun sadece bu noktalarda sağlanması yeterli olacaktır. Yöntemin sistematik olması ve her türlü yapıya aynı işlemlerle uygulanabilir olması en önemli özelliğidir. Son yıllarda, yeterince hassas sonuçlar veren ve bu tez kapsamında da kullanılan, PLAXIS gibi sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir çok paket programlar mevcuttur. Sonuç olarak; zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon taşıma gücü, akım ağı zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Plaxis programı 1987 yılından bu yana geoteknik mühendisliğinin her alanında başarıyla kullanılan bir sonlu elemanlar programıdır. INPUT, OUTPUT, CALCULATION ve CURVES ana başlıkları altında dört kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle INPUT bölümünde gerekli veriler bilgisayara girilir, OUTPUT komutuyla zemin davranışı belirlenir, CALCULATION komutuyla o anki durum için hesaplamalar yapılır ve CURVES komutuyla istenilen grafikler çizdirilir [32, 73, 74]. Programın kullanımında ilk olarak geometrinin oluşturulması gereklidir. Bu amaçla LINES komutu ile çizgisel elemanlar kullanılabilir ve çalışma alanının sınırları belirlenir. Çok tabakalı bir zemin profili üzerinde çalışıldığında yine çizgisel elemanlar yardımıyla arazi istenilen noktalardan ayrılarak farklı zemin bölgeleri tanımlanabilir. Geometrinin oluşturulmasından sonra projede kullanılacak yapısal elemanlar (temel, palplanş, geotekstil, yatay destek, ankraj) yerine göre BEAM, GEOTEXTILE, NODE TO NODE ve FIXED END ANCHOR komutları yardımıyla modellenir [32, 73, 74].

Tünel hesapları için ayrı bir komut olan TUNNEL komutu kullanılır. Tünel hesaplarında tünel üç farklı şekilde tanımlanabilir. (Sol yarım tünel kesiti, sağ yarım tünel kesiti ve tam tünel kesiti). Bu komut BEAM komutunun farklı bir kullanımı olduğundan, tünel hesaplarında kullanılacak parametreler BEAM komutu için kullanılanların aynısıdır. Tünel geometrisini belirlemek için TUNNEL DESIGNER komutu kullanılır. Burada tünelin yarıçapı ve her bir dilim için o dilimin merkez açısı belirlenir. Dairesel tünellerde bu açılar her bir dilim için aynı iken, değişik kesitli tüneller için bu açılar değiştirilerek farklı geometriler elde edilebilir [32, 73, 74].

Ayrıca bu komut altında tünel etrafındaki kaplama malzemesi ve zemin-yapı etkileşimini hesaba katmak için arayüzey elemanlar (INTERFACE ELEMENTS) tariflenebilir. Buna ilave olarak, fleksible yapılar için geçerli olan şekil değiştirebilme yüzdesi burada tünelin özelliklerine girilebilir.

PLAXIS programı önceden belirlenmiş yer değiştirmeler, çizgisel ve yayılı yükleri kullanmamıza olanak sağlar. Bu amaçla PRESCRIBED DISPLACEMENTS, POINT FORCES ve TRACTION LOADS komutları kullanılabilir. STANDART FIXITIES komutuyla sınır şartları belirlenir. Programda bu komutla otomatik olarak düşey yönde harekete izin verilir ve yatay hareketler sınırlandırılır. Ancak istenilen duruma göre müdahale edilerek gerekli düzenlemeler yapılabilir [32, 73, 74].

Plaxis programında MATERIAL PROPERTIES ana başlığı altında malzeme özellikleri SOIL&INTERFACE, BEAM, ANCHOR VE GEOTEXTILE elemanlar tanımlanır. Çubuk elemanlar için (BEAM ELEMENT), Normal rijitlik (EA), Eğilme rijitliği (EI), duvar kalınlığı (d), eleman ağırlığı (w) ve poisson oranı (ν); ankraj ve destek elemanlarını tanımlamakta kullanılan NODE TO NODE ANCHOR komutu için Normal rijitlik (EA), destek aralığı (L_s) ve maksimum kuvvet (F_{max}) değerleri; ankraj kökü ve geotekstile malzemesini tanımlamak için kullanılan GEOTEXTILE komutu için ise Normal rijitlik (EA) değerleri program girdileri kısmında verilmelidir. Programda zemin özelliklerini belirlemek amacıyla yer alan mevcut zemin modelleri Lineer elastik Model (LE), Mohr-Coulomb Modeli (MC), eklemlili Kaya Modeli (JR), Pekleşen Zemin Modeli (HS), Yumuşayan Zemin Modeli (SS), Yumuşak Zemin Krep Modeli (SSC) ve Kullanıcı Tanımlı Model (UD)'dir. Bu modellerden Mohr-Coulomb modeli gerçek zemin davranışını tahmin etmek açısından ilk olarak düşünülmesi gerekmektedir. Bu elastik tamamen plastik model birkaç temel zemin parametresini istemektedir: Young Modülü (E), Poisson Oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ), genleşme (Dilatasyon) açısı (ψ). bunlardan en önemlileridir. Bunlara ilaveten zeminin kuru ve doğal birim hacim ağırlıkları (λ_k ve λ_n), yatay ve düşey permeabilite katsayıları (k_v ve k_h) ve zeminin herhangi bir yapısal elemanla temasta olması durumunda arayüzey elemanlar tanımlanmaktadır. Tüm malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra her bir malzeme ilgili ortama atanarak sonlu elemanlar ağının oluşturulması safhasına geçilir. Sonlu elemanlar ağı, MESH komutu ile oluşturulur. Programın normal işleyişinde sonlu elemanlar ağı çok ince olarak oluşturulmaz, ancak istendiğinde tüm zemin ortamı ya da sadece incelenecek kısım için sonlu eleman ağı oluşturulur [32, 73, 74].

Sonlu elemanlar ağı da oluşturulduktan sonra başlangıç koşulları belirlemek amacıyla INITIAL CONDITIONS komutu verilir. Burada varsa yeraltı su seviyesi çizilir ve boşluk suyu basıncı hesaplanır. Ayrıca dinamik modülü kullanmak için bir

Output'a geçmeden önce MULTIPLIER kısmından Input değerleri girilerek Total Multiplier kısmında .smc formatında oluşturulan bir deprem kaydı ile ivme zaman dataları tanımlanır. Bu şekilde zemine deprem kaydı etki ettirilmiş olur. Daha sonra zemin, üzerinde herhangi bir yapısal eleman olmadığı ilk hale getirilir ve efektif gerilmeler belirlenir [32, 73, 74].

Bu adımdan sonra Calculation komutuyla ortam son haline getirilir ve hesaplamalara geçilir. Bu aşamada kademeli inşaat yapılması durumunda STAGED CONSTRUCTION, tekil ya da yayılı yük ya da bir deprem kaydı tanımlanması durumunda ise TOTAL MULTIPLIERS (toplam çarpanlar) komutuyla işlem yapılır. Tüm aşamalar tamamlanıp ortam son haline geldiğinde ise CALCULATE komutuyla zemin ve yapısal elemanların bu şartlar altındaki davranışı görülebilir. CURVES komutuyla istenilen grafikler çizdirilerek gerekli karşılaştırmalar yapılabilmektedir [73, 74].

Dinamik analizler yapılırken Plaxis 8.2 programının dinamik versiyonu ile yapılmıştır. Dinamik bir yük etkisi altında zamana bağlı olan temel eşitlik verilmiştir (5.1).

$$\underline{M}\ddot{u}'' + \underline{C}\dot{u}' + \underline{K}u = F \quad (5.1)$$

M Kütle matrisi, u yer değiştirme vektörü, C titreşim katsayısı, K rijitlik matrisi ve F yük vektörüdür. Yer değiştirme, u, hız, u', ivme, u'' zamanla değişebilir. Eşitliğin son iki terimi (Ku=F) statik yer değiştirmeye bağlıdır. Burada teoremin temeli linear elastik üzerine tanımlanır. Zemin davranışı sulu ve sulu olmamasıyla geçerlidir. Daha sonraki durum zemin suyunun hacimsel rijitliği statik hesaplarda rijitlik matrisine K eklenir.

M matrisi, malzemelerin ağırlığı (zemin+su+ diğer inşaatlar) hesaplamalarda alınır. Kümesel olan bu matris kütle matrisi olarak Plaxis'te kullanılır.

C matrisi, malzemelerin titreşimlerini ifade eder. Gerçekte, sürtünme veya geri çevrilemeyen deformasyonlar (plastisite veya viskozite) malzemelerde titreşime sebep olur. Daha fazla viskozite veya daha fazla plastisiteyle daha fazla vibrasyon enerjisi yayılabilir. Eğer elastisite düşünülürse c matrisi kullanılarak titreşim hesaplarında kullanılır. Titreşim matrisini tanımlamak için testlerle tanımlanması zor olan ekstra parametrelere ihtiyaç vardır. Sonlu elemanlar formüllerinde, C kütle ve rijitlik (Rayleigh damping) matrislerinin bir fonksiyonu olarak formüllendirilir (5.2).

$$C = \alpha_R M + \beta_R K \quad (5.2)$$

Rayleigh katsayılarından olan α_R ve β_R tanımlanılarak sınırlandırılır. M'nin hakim olduğu durumlarda (örneğin, $\alpha_R = 10^{-2}$, $\beta_R = 10^{-2}$), düşük frekanslı titreşimlerle salınır, K'nın hakim olduğu (örneğin, $\alpha_R = 10^{-3}$, $\beta_R = 10^{-3}$) durumlarda, bunun katkısıyla yüksek frekanslı titreşimlerle salınır. Plaxisin Standart hesaplamalarında ise $\alpha_R = 0$, $\beta_R = 0$ alınır.

Dinamik hesapların nümerik uygulamaları, zaman integrasyonunun formülizasyonunda, stabilite ve hesaplama proseslerinin hassaslığı için en önemli faktördür. Örtülü ve açık zaman entegrasyonu genelde kullanılan iki zaman entegrasyonudur. Örtülü zaman entegrasyonunu avantajı görece olarak kolay formüle edilmesidir. Fakat dezavantajı, sağlıklı hassa hesaplamaların olamayışı ve zaman aralıklarında ciddi sınırlamalara göre düzenlenebilmesidir. Açık metodta ise daha karmaşık ve daha güvenilir bir hesaplama prosesi vardır ve daha hassa sonuçlar verir. Kati zaman entegrasyonu Newmark teorisine göre sık sık kullanılan bir methodtur. Bu metodta, bir noktadaki yer değiştirme ve hız zamana bağlı olarak $t+\Delta t$ şu şekilde ifade edilir (5.3a, 5.3b).

$$U^{t+\Delta t} = u^t + u'^t \Delta t + ((0.5 - \alpha) u''^t + \alpha u''^{t+\Delta t}) \Delta t^2 \quad (5.3a)$$

$$U'^{t+\Delta t} = u'^t + ((1-\beta) u''^t + \beta u''^{t+\Delta t}) \Delta t \quad (5.3b)$$

Yukarıdaki eşitlikle; Δt zaman aralığı, α ve β katsayıları nümerik zaman entegrasyonunda hassaslığını tanımlar. Bu katsayılar Rayleigh titreşimindekiyle aynı değildir. Sabit çözüm elde edebilmek için, aşağıdaki şartlara başvurmak gerekir (5.4).

$$\beta \geq 0.5, \alpha > (0.25(0.5+\beta))^2 \quad (5.4)$$

Plaxis'te titreşim için Newmark Teorisi katsayıları kullanılır. $\alpha = 0.3025$, $\beta = 0.60$ kullanılır. Alternatif olarak, ortalama ivme hesaplarında $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.50$ 'de kullanılabilir.

Plaxis'te kullanılan entegrasyon planı uygulaması şu şekildedir. (5.5a, 5.5b)

$$u''^{t+\Delta t} = c_0 \Delta u - c_2 u'^t - c_3 u''^t \quad (5.5a)$$

$$u'^{t+\Delta t} = u'^t - c_6 u''^t + c_7 u''^{t+\Delta t}$$

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \Delta u$$

veya,

$$u''^{t+\Delta t} = c_0 \Delta u - c_2 u'^t - c_3 u''^t \quad (5.5b)$$

$$u'^{t+\Delta t} = c_1 \Delta u - c_4 u'^t - c_5 u''^t$$

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \Delta u$$

zaman aralığı ve entegrasyon parametreleri α ve β , $c_0, \dots, c_7$ katsayıları bu şekilde ifade edilirler. Bu yolla zaman aralığının sonundaki yer değiştirme, hız ve ivme zaman aralığının başından yer değiştirmenin artışıyla bulunur. Kesin integrasyon ise, 5.1 formülü kullanılarak zaman sonunda 5.6 eşitliği elde edilebilir.

$$\underline{\underline{M}} u''^{t+\Delta t} + \underline{\underline{C}} u'^{t+\Delta t} + \underline{\underline{K}} u^{t+\Delta t} = \underline{\underline{F}}^{t+\Delta t} \quad (5.6)$$

Bu kombinasyon 5.5'te ki ifadeler aşağıdaki yer değiştirme, hız ve ivme $t + \Delta t$ sonunda aşağıdaki 5.7 eşitliği şeklini alır.

$$(c_0 \underline{\underline{M}} + c_1 \underline{\underline{C}} + \underline{\underline{K}}) \Delta u = \underline{\underline{F}}^{t+\Delta t}_{int} + \underline{\underline{M}} (c_2 u'^t - c_3 u''^t) + \underline{\underline{C}} (c_4 u'^t - c_5 u''^t) - \underline{\underline{F}}^t_{int} \quad (5.7)$$

Bu formülle dinamik analizler yapılmaktadır. Statik analizlerden farkı ise, titreşimin ve kütle olması sebebiyle ekstra işlerin varlığı, hız ve ivmenin bu şekilde zamana bağlı hesabıdır.

5.9 eşitliğinde azaltılmış dalga hızı V_p , tek boyutlu bir zemin fonksiyonu olarak tanımlanan rijitlik E_{oed} ve kütle ρ ,

$$V_p = \sqrt{(E_{oed} / \rho)}, E_{oed} = ((1-\nu) E) / ((1+\nu) (1-2\nu)), \rho = \lambda / g \quad (5.8)$$

E , Young Modülü, ν , Poisson oranı, λ toplam birim hacim ağırlığı, g (9.8 m/s^2), yer çekimidir

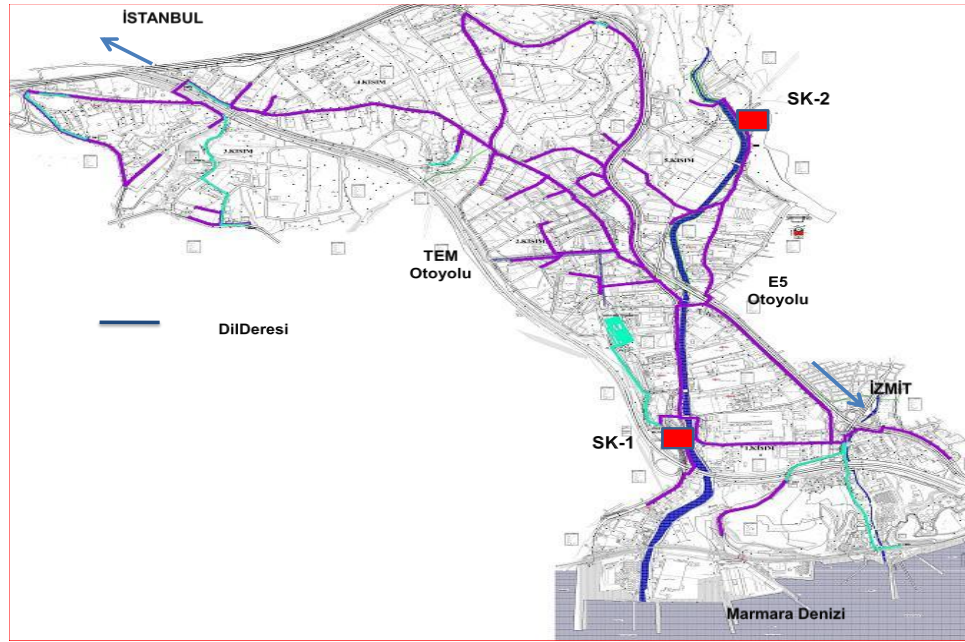
Benzer şekilde kayma dalga hızı V_s :

$$V_s = \sqrt{(G / \rho)}, G = E / 2(1+\nu), \quad (5.9)$$

Kritik zaman aralıkları hesaplanır. Sonra oluşturulan modelin sınır koşulları belirlenir. Oluşturulurken farklı durumlar dikkate alınır. Daha sonra Plaxis'in Lysmer ve Kuhmeyer in oluşturduğu teori üzerine dayandığı yutucu sınırlar kullanılır [75].

5.3 Vaka Analizi

Bu çalışma kapsamında, Dilovası Organize Sanayi Bölgesi içerisinde alınan iki adet sondaj kesiti ve Adapazarı Tıgıcılar Bölgesi'nden alınan bir sondaj kesiti kullanılmıştır. Şekil 5.1'te Dilovası Organize Sanayi Bölgesi içerisinde alınan sondaj kesitlerinin yerleri yer almaktadır.



Şekil 5.1 : Zemin Sondajlarının Yerleri (Dilovası Organize Sanayi Bölgesi)

5.3.1 Kullanılan boru özellikleri

Bu çalışmada kullanılacak boru tipi olarak Cam takviyeli plastik (CTP) , Betonarme ve HDPE Korige Borular seçilmiştir. Borulara ilişkin mühendislik özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Burada E, borunun elastisite modülü, EA, normal rijitliği, EI, eğilme rijitliği, ν , poisson oranı, t, et kalınlığıdır.

Çizelge 5.1 : Boruların Mühendislik Özellikleri

Boru Tipi / Boru Özellikleri	Betonarme Boru	CTP Boru	HDPE Korige Boru
Boru Çapı	1000 mm	1000 mm	1000 mm
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^5$
EA (kN/m)	$5.47 \cdot 10^7$	$1.12 \cdot 10^6$	$5.72 \cdot 10^3$
EI (kNm ² /m)	$7.63 \cdot 10^6$	$1.43 \cdot 10^5$	$7.33 \cdot 10^2$
ν	0.15	0.29	0.40
t (mm)	110	26	24

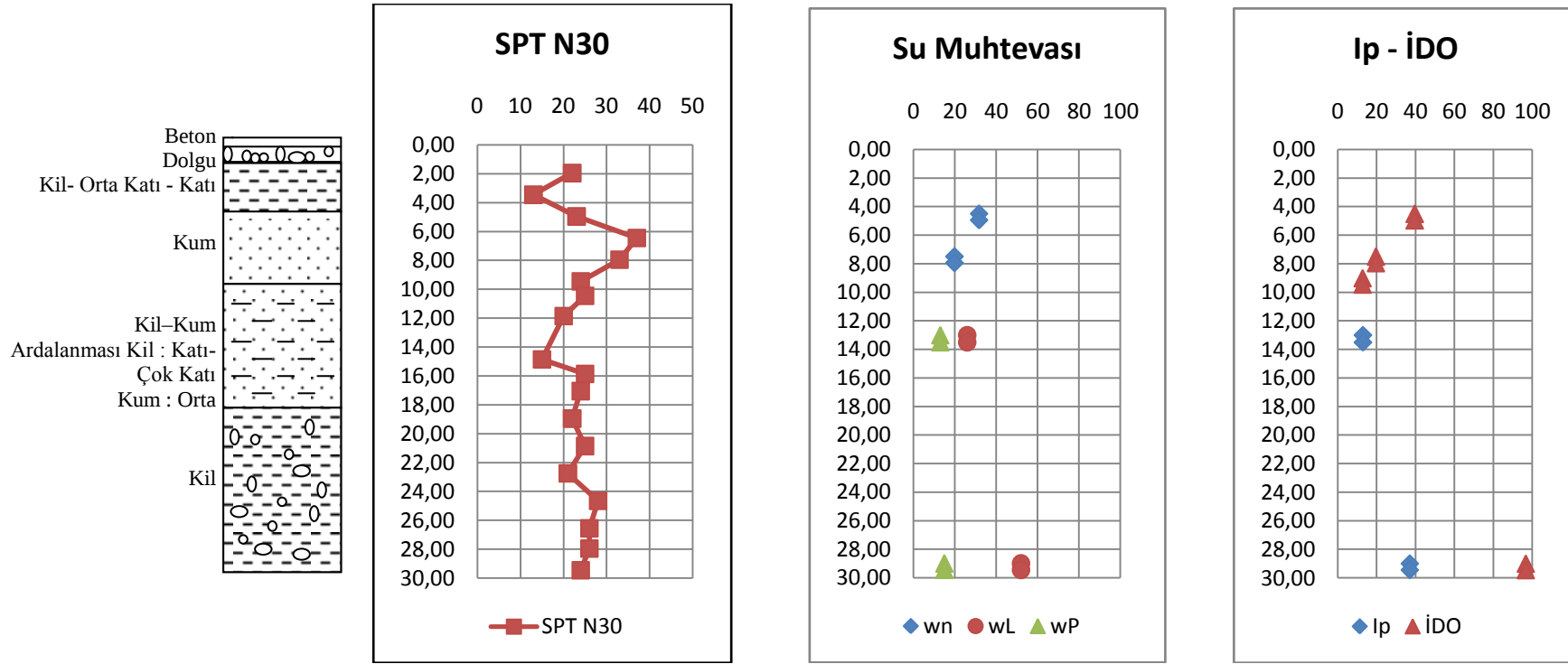
Analizlerle aynı dinamik yük altında $D=1000$ mm çapındaki üç farklı malzemeden yapılmış betonarme, CTP ve HDPE korige borunun farklı zeminlerdeki davranışların görülebilmesi amaçlanmıştır. Birbirinden farklı üç zemin profilinin aynı tip malzemelerle dolgu yapılarak aynı şartlar altında hesaplamaları yapılmıştır. Bu amaçla 9 adet model oluşturulmuş ve aynı yerleştirme şartları altında üç farklı boru malzemesi için farklı üç zemindeki tüm analiz sonuçları incelenmiştir.

5.3.2 Çalışma alanında yer alan zemin koşulları

Dilovası Organize Sanayi Bölgesi içerisinde yapımı devam eden kanalizasyon hattındaki 2 farklı noktadan alınan sondaj kesitleri Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir. Ayrıca çalışma alanının dışında ve 1999 İzmit Depreminde oldukça fazla etkilenen bir bölge olan Adapazarı Tığcılar Mahallesi'nden de bir zemin kesiti alınmıştır. Buna ait zemin profili ve endeks özellikleri de Şekil 5.4'te verilmiştir. 1 numaralı zemin kesiti (SK-1) bulunduğu bölge geneline uygun şekilde yer altı seviyesi yüzeye yakındır ve doğal zemin kildir. Şekil 5.2'de yer alan SK-1 kesitinde sondaj derinliği 30 m'dir. Y.A.S.S. derinliği 1,60 m'dir. Zeminin 1,50 metrelik kısmı dolgu zemindir. Daha sonra 2.80 m kalınlığında yer yer kumlu, ince daneli katı-çok katı killi bir zemin tabakası bulunmaktadır. Devamında 4,50 m çakıllı, az killi, ince-orta daneli orta sıkı-sıkı bir kum tabakası yer alır. Daha sonra 8,40 m ince orta daneli kumdan oluşan killeri katı-orta katı, kumları sıkı bir kil-kum ardalanması vardır. En alt kısımda ise 11,80 m'de yer yer çakıllı ve kumlu bir kil tabakasından oluşmaktadır. SPT N_{30} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri zemin sondaj raporundan alınarak Çizelge 5.2'de sunulmuştur. Burada W_n , doğal su muhtevasını, W_L , likit limiti, W_p , plastisite limitini, I_p , plastisite indisini, İDO, ince dane oranını göstermektedir. SK-1 kesitine ait zemin profili ve SPT N_{30} değerleri, doğal su muhtevası (%), plastisite indisi (%) ve ince dane oranları (%) gibi endeks özellikleri derinliğe bağlı olarak grafikler halinde Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : SK-1 derinliğe göre SPT N_{30} , W_n , W_L , W_P , I_p ve İDO değerleri

Derinlik	N_{30}	W_n (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_p (%)	İDO (%)
1.95	22					
3.45	13	31.70				39.61
4.95	23	31.70				39.61
6.45	37	19.90				19.60
7.95	33	19.90				12.75
9.45	24					12.75
10.45	25					
11.85	20		26	13	13	
14.85	15		26	13	13	
15.85	25					
17.05	24					
18.95	22					
20.85	25					
22.75	21					
24.65	28					
26.55	26					
27.95	26		52	15	37	96.66
29.45	24		52	15	37	96.66

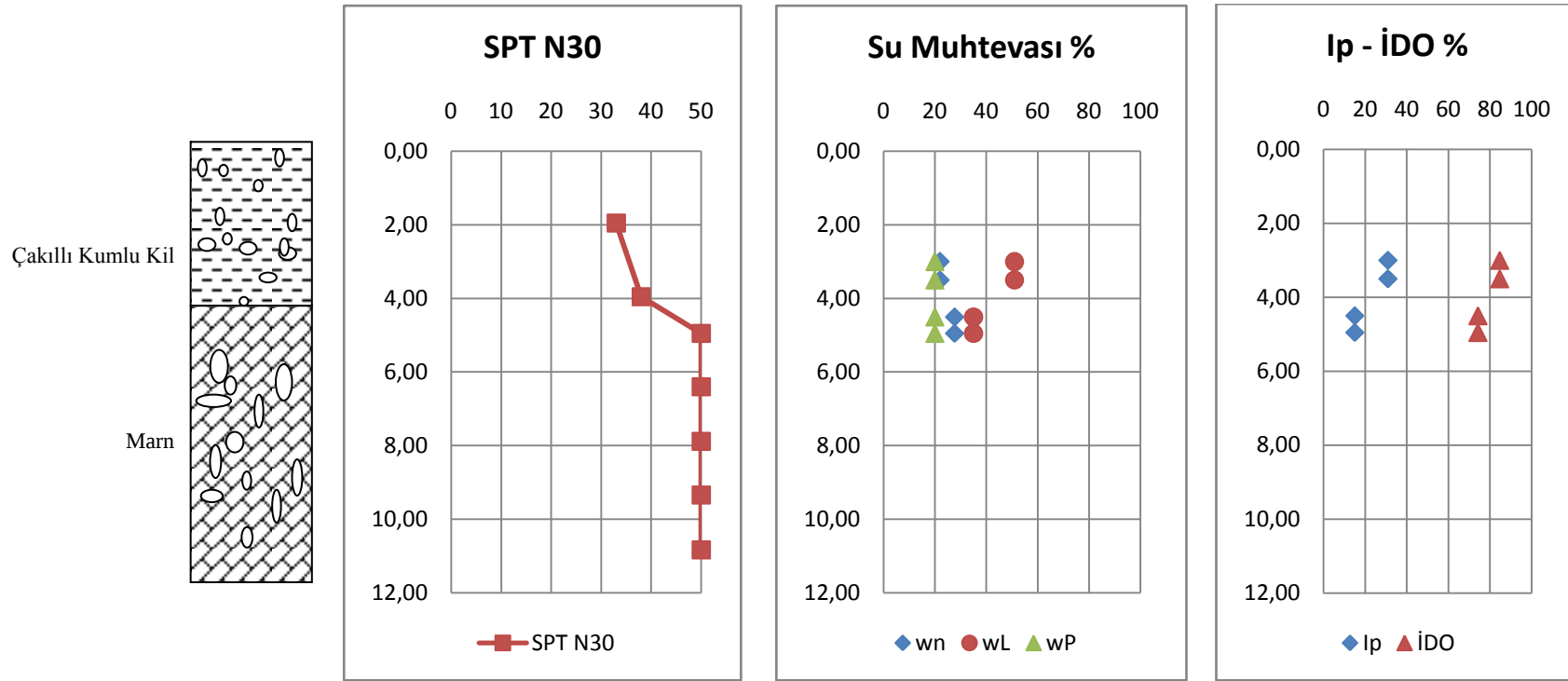


Şekil 5.2 : SK-1 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri

Dilovası Organize Sanayi Bölgesinin kuzeyinden 2 numaralı sondaj kesiti (SK-2) alınmıştır. SK-2 zemin kesitinde sondaj derinliği 10.83 m'dir. Zemininin 0 - 4.00 m'sinde çakıllı kum bir kil tabakası yer almaktadır. Zeminin 4.00 m'den 10.83 m'ye kadar olan kısım ise ileri derecede ayrılmış, siltleşmiş ve killeşmiş yumuşak tortul kayaktan oluşmuş bir marn tabakasıdır (Şekil 5.3). SPT N_{30} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri zemin sondaj raporundan alınarak Çizelge 5.3'de sunulmuştur.

Çizelge 5.3 : SK-2 derinliğe göre SPT N_{30} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri

Derinlik (m)	N_{30}	W_n (%)	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	İDO (%)
3.95	38	22	51	20	31	84.6
4.95	50	27.7	35	20	15	74.2
6.4	50					
7.88	50					
9.34	50					
10.83	50					



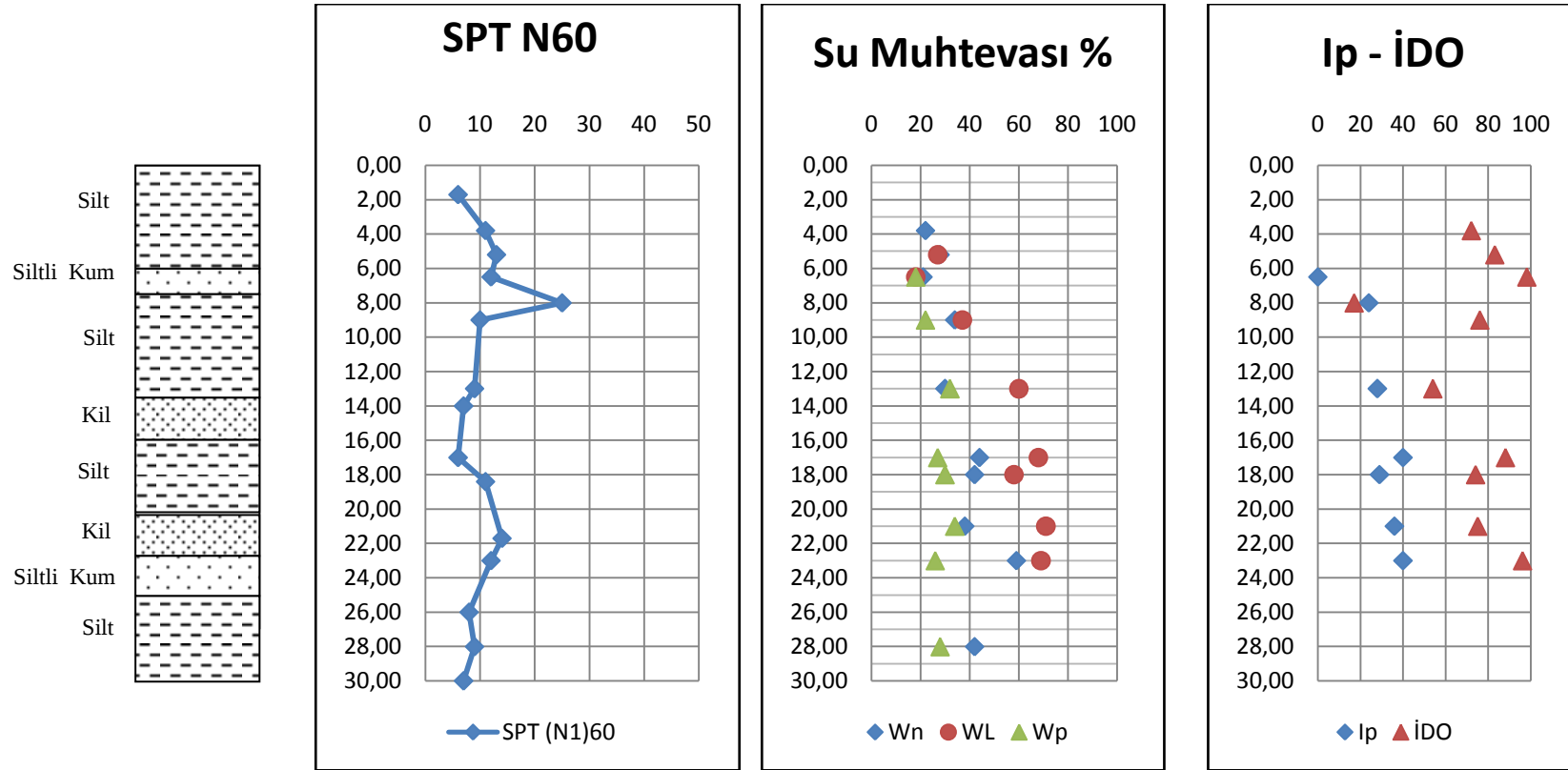
Şekil 5.3 : SK-2 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri

3 numaralı kesit (SK-3) ise Adapazarı Tıg cılar Mahallesinde yapılan bir sondaja aittir. Zemin kesitinde sondaj derinliği 30 m’dir. Y.A.S.S. yüzeye oldukça yakındır. Sondajda 14 m derinliğe kadar 2 m kalınlığında siltli kum bandı içeren silt tabakası bulunmaktadır. Bu tabakadan sonra sırasıyla 4m kalınlığında olan kil ve silt tabakaları sonrasında yaklaşık olarak ikişer metre kalınlıklarında kil ile siltli kum tabakası bulunmaktadır. En altta ise 5 m kalınlığında silt tabakası yer almaktadır SK-3 ‘e ait zemin profili ve endeks özellikleri verilmiştir ( ekil 5.4).

SPT N_{60} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri zemin sondaj raporundan alınarak  izelge 5.4’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4 : SK-3 derinliğe göre SPT N_{60} , W_n , W_L , W_p , I_p ve İDO değerleri

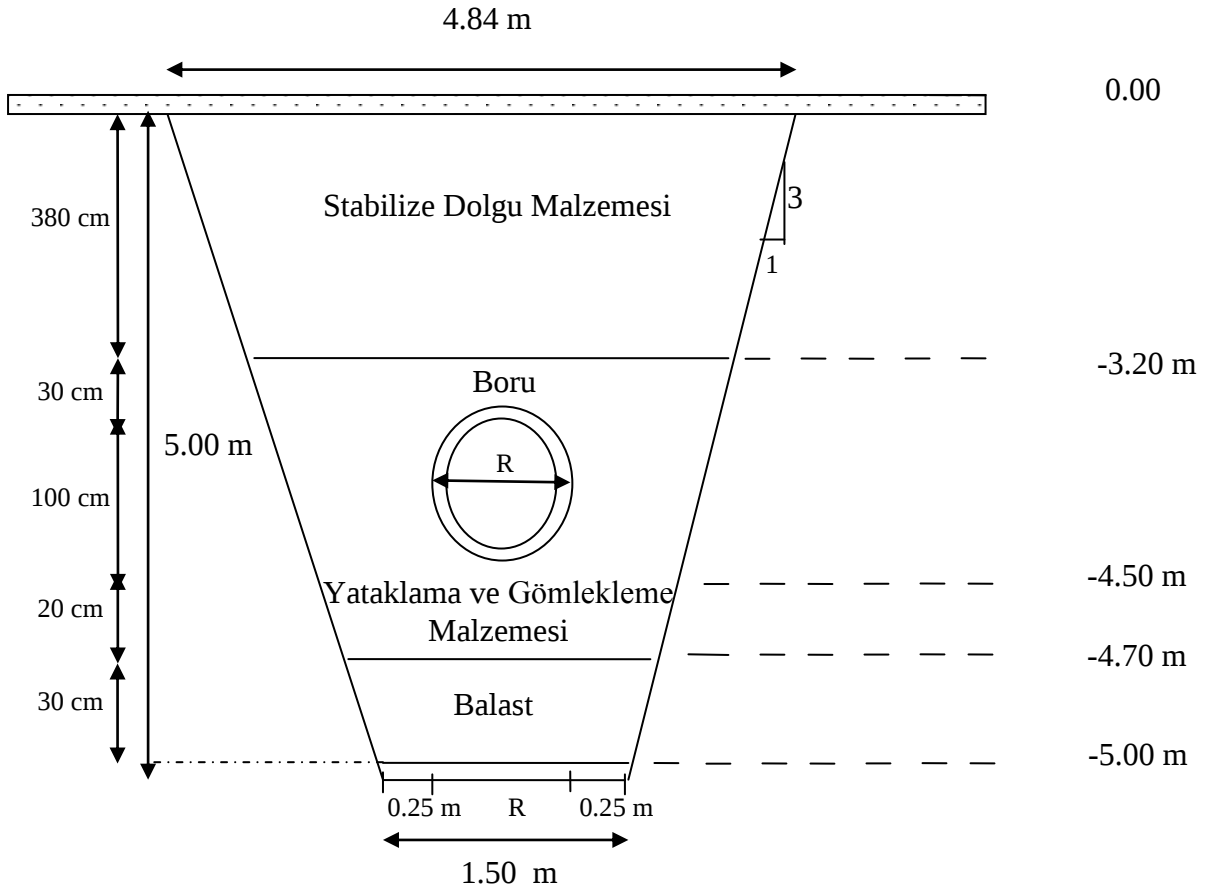
Derinlik (m)	N_{60}	W_n	W_L	W_p	I_p	İDO
1.70	6					
3.80	11	22				72
5.20	13	28	27			83
6.50	12	21	18	18	0	98
8.00	25	34			24	17
9.00	10	30	37	22		76
13.00	9		60	32	28	54
14.00	7	44		27	40	88
17.00	6	42	68	30	29	74
18.40	11	38	58	34	36	75
21.70	14		71			
23.00	12	59	69	26	40	96
26.00	8					
28.00	9	42		28	20	74
30.00	7	41		30	8	67



Şekil 5.4 : SK-3 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri

5.3.3 Boru döşeme uygulaması

Her üç zemin kesitinde de hendekler (tranşeler) İller Bankası Kanalizasyon Şartnamesi'ne uygun olacak şekilde açılmış, alt kısmı 30 cm balast malzemeyle zemin iyileştirilmiş akabinde yaklaşık 20 cm kumlu malzemeyle yataklaması yapılarak $\Phi 1000$ mm çapındaki boru zemine gömülmüştür. Daha sonra 30 cm kumlu malzeme ile gömlekenip sıkıştırılarak muhafaza altına alınmıştır. Gömleklemeden sonra zemin kotuna kadar stabilize dolgu malzeme ile hendek (tranşe) kapatılmıştır. İller Bankası Kanalizasyon Özel Teknik Şartnamesi'ne göre oluşturulan tipik hendek kesiti Şekil 5.4 verilmiştir.



Y.A.S.S.'nin yüzeye yakın olması sebebiyle kazı sırasında hendek kenarları iksalar veya çelik palplanşlarla desteklenmiş ve boru hendek içerisine gömüldükten sonra gerekli dolgu malzemeleriyle doldurularak sonlu elemanlar analizi Şekil 5.5'de verilen tipik hendek kesitine göre yapılmıştır. Ayrıca kesiti verilen hendekte kullanılan dolgu malzemelere parametreler

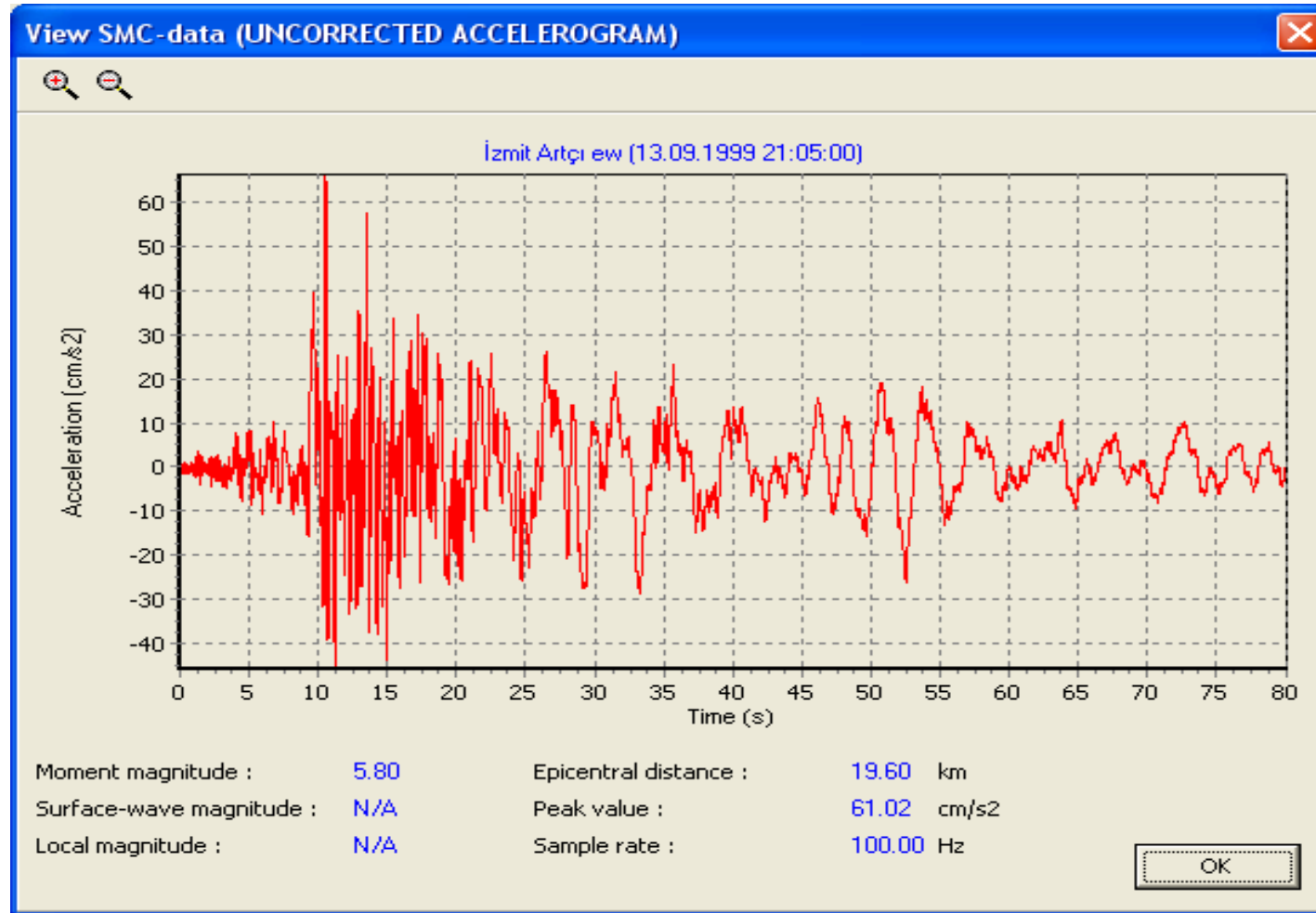
Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Burada E, başlangıç elastisite modülü, γ_n , doğal birim ağırlığı, Φ , zemin içsel sürtünme açısı, c, kohezyon katsayısı, v, poisson oranıdır.

Çizelge 5.5 : Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Malzeme Cinsi	E (kN/m ²)	γ_n (kN/m ²)	ϕ (°)	c (kN/m ²)	v
Stabilize Dolgu Malzemesi	2. 10 ⁶	23	36	0	0,15
Yataklama ve Gömlekleme Malzemesi	3. 10 ⁴	19	34	0	0,30
Balast	2. 10 ⁵	21	36	0	0,30

5.3.4 Kullanılan deprem kaydı

Programa dinamik analiz yapmak için hesap çeşidi kısmından seçilerek işaretlenir. Deprem için istenilen data dosyası yani ivme-zaman değerleri .smc formatında istenildiği için, alınan veriler .smc formatına getirilerek sisteme tanıtılmıştır. Bu vakada belirlenen zemin profillerinin ve boruların davranışlarını öğrenebilmek amacıyla 13.09.1999 tarihinde M=5.8 büyüklüğündeki Adapazarı'ndaki bir hastanede ölçülen İzmit E-W Artçı depreminin kaydı alınarak her üç zemin profilinin böyle bir dinamik etki altında nasıl bir davranış gösterebileceği incelenmiştir. Kullanılan deprem kaydının şiddetli genlikler bölgesini kapsayan yaklaşık 80 sn'lik ivme-zaman kaydı Şekil 5.6'da verilmiştir. Maksimum ivme 0.06g'dir. Ayrıca daha fazla analiz yapabilmek ve daha fazla sonuca ulaşabilmek amacıyla bu kayıt, maksimum ivmesine göre orantısal olarak büyütülmüştür. Bu amaçla maksimum ivmesi olan 0.06g olan kayıt ilk olarak 1.48 ile çarpılarak maksimum ivmesi 0.1g olan deprem kaydı elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu kayıt orantısal olarak 2,3 ve 4 ile çarpılarak maksimum ivmesi 0.2g, 0.3g ve 0.4g olan deprem kayıtları elde edilmiştir. Programlama yapılırken model ortamında eleman sayısı 250 ve /veya 500 tutulmuştur.



Şekil 5.6 : İzmit E-W artçı depremi hastane kaydı ivme-zaman grafiği

5.3.5 SK-1 kesitinin plaxis programıyla modellenmesi

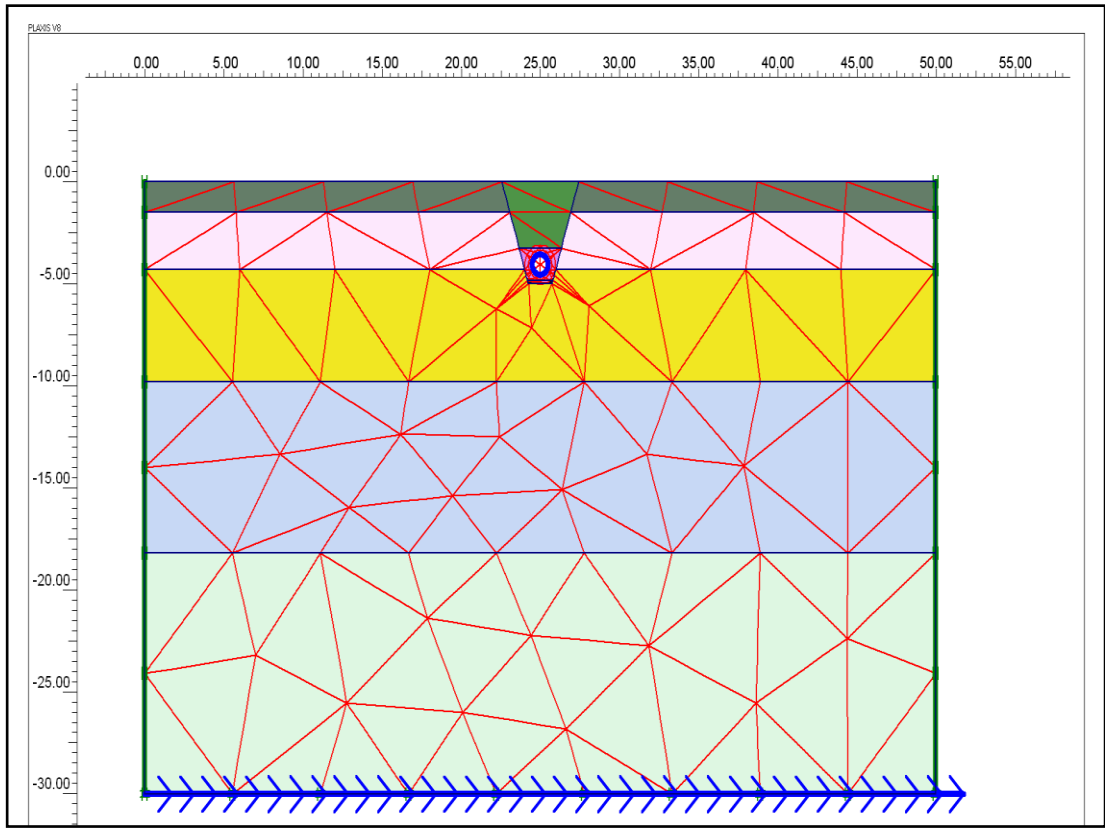
İlk olarak 50 m genişliğinde ve 30 m derinliğinde zemin profili çizilir. Daha sonra kesitin içerisine Dilovası Organize Sanayi Bölgesi'nden alınan 1 no'lu sondaj kesitine (SK-1) ait zemin tabakaları derinliklerine göre profile çizilir. Daha sonra Şekil 5.5'te boyutları da verilen tipik hendek kesiti zemin profiline her iki yanı ortalayacak şekilde (yani simetrik olarak) yerleştirilir. Daha sonra zemin kesitine ve hendek kesitine ait tüm parametreler plaxis programına girilir. Plaxis programında kullanılmak amacıyla SK-1 zemin kesitine ait başlangıç elastisite modülü, doğal birim hacim ağırlığı, kohezyon katsayısı, iç sürtünme açısı, poisson oranı ve SPT N30 değerleri (E , γ_n , c , Φ , ν ve N_{30}) Çizelge 5.6'da verilmiştir. Ayrıca tipik hendek kesitinde yer alan dolgu malzemelerine ait parametrelerde Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Daha sonra oluşturulan zemin profiline yerleştirilen üç farklı tip boruya sırasıyla (Betonarme, CTP ve HDPE) aynı deprem kaydı ettirilerek plaxis sonlu elemanlar modeli programıyla analizleri yapılmıştır. Borulara ait malzeme özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.6 : SK-1'deki (1 No'lu Kesitteki) Zemin Parametreleri

Sondaj Kesit No	Tabaka Derinliği (m)	Malzeme Cinsi	E (kN/m ²)	γ_n (kN/m ²)	ϕ	c (kN/m ²)	ν
SK-1	0-0,25	Beton	3.10^7	25	-	-	0,15
	0,25-1,50	Dolgu	5.10^4	18	30	0	0,30
	1,50-4,30	Kil	6.10^3	18	0	70	0,25
	4,30-9,80	Kum	$7.5.10^3$	18	35	0	0,30
	9,80-18,20	Kil-Kum Ardalanması	9.10^3	18,30	0	100	0,30
	18,20-30,00	Kil-Çok Katı	1.10^4	17	0	100	0,25

Veriler Plaxis programına girildikten sonra zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetlenir. Problemin sonlu elemanlar yöntemiyle

modellenmesi için ortamın deprem sırasında lineer-elastik davrandığı kabul edilmiştir ve dinamik analize başlamadan önce zemin gerilmeleri ve su basınçları oluşturulmuştur. Depreme zemine en alt noktadan etkitilir. SK-1 profiline ait analizlerde, Mohr-Coulomb (MC) zemin modeli ile kurulan sonlu elemanlar ağı Şekil 5.7’de verilmektedir. Analizlerde SK-1 zemin kesitine aynı çapta 3 farklı boru malzemesi yerleştirilmiştir. Seçilen boru tipleri betonarme, CTP ve HDPE borulardır. Yapılan üç analiz sonucunda da oluşturulan zemin profilinde oluşan gerilmeler, toplam yer değiştirme, maksimum yatay ve düşey deplasman, maksimum yatay ve düşey efektif gerilmeler aynı değerde bulunmuştur.

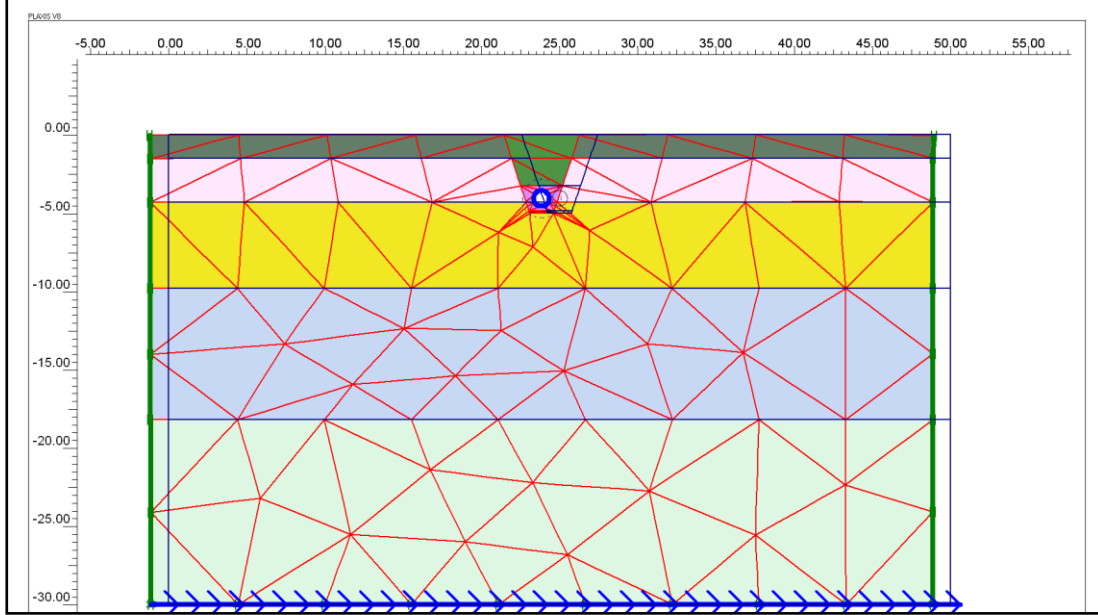


Şekil 5.7 : Sonlu Elemanlar Ağı - SK1

5.3.5.1 Betonarme boru

Analizlerde ilk olarak SK-1 Zemin kesitine daha önce Şekil 5.5’te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 110 mm et kalınlığındaki betonarme boru yerleştirilmiştir. Daha sonra deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etki ettirilmiştir. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.8’de verilmiştir. Toplam yer değiştirme ise 0.24 m olarak hesaplanmıştır. Zeminde yatayda meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.239 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.9). Düşeyde ise 0.012 m’lik bir düşey yerdeğiştirme görülmüştür

(Şekil 5.10). Deprem sonrası zeminde oluşan yatay ve düşey gerilmeler Şekil A.1 ve Şekil A.2’de verilmiştir. Oluşan maksimum efektif gerilmeler düşeyde 287.25 kN/m², yatayda ise 287.02 kN/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8 : Dinamik yük sonrası zeminde oluşan gerilmeler (SK-1)
(Toplam maksimum yer değiştirme: 0.24 m)

Deprem ivme kaydına bağlı olarak boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler ise Şekil A.3 ve Şekil A.4’de verilmiştir. Deprem sonrası boruda yatayda oluşan yer değiştirme 0,23093 m, düşeyde ise 0,00254 m yer değiştirme oluşmuştur. Oluşan maksimum toplam deplasmanda 0,23094 m olmuştur (Şekil 5.12).

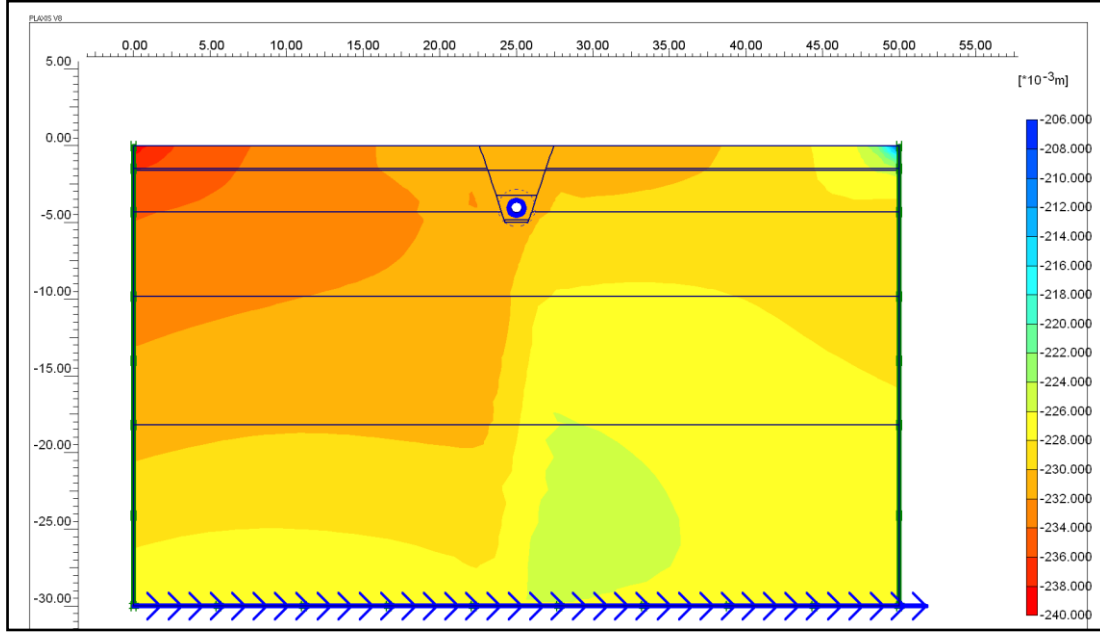
Dinamik yükleme sonucu boruda oluşan aksenal kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri Şekil A.5, Şekil A.6 ve Şekil A.7’ de verilmektedir. Oluşan Maksimum değerler Çizelge 5.7’ de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

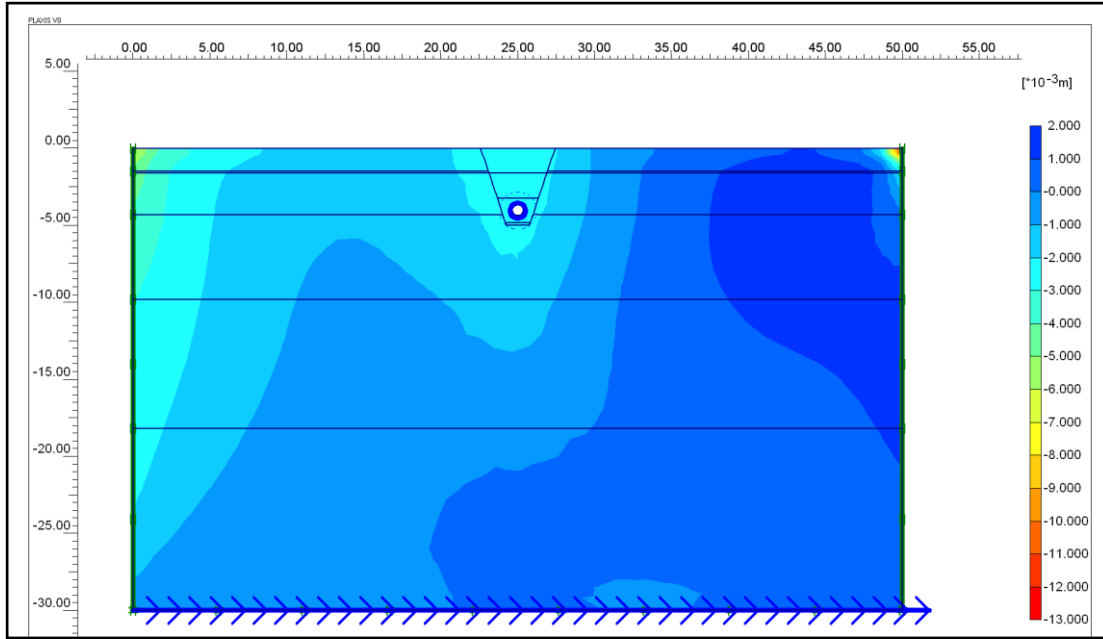
Boru Tipi / Kuvvetler	Betonarme Boru
Eksenel Kuvvet (kN/m)	30.56
Kayma Kuvveti (kN/m)	5.82
Eğilme Momenti (kNm/m)	7.92
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.23093
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00254

Dinamik yük altında boruya gelen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti değerleri plaxis programıyla hesaplanmıştır. TSE 821 standardı incelendiğinde (seçilen donatıya göre 65-85 kN/m) betonarme borunun dayanım değerinin yüksek olmasından dolayı dinamik yük altında kırılması mümkün gözükmemektedir. Fakat borunun yapmış olduğu yatayda 23,1 cm'lik ötelenme düşünüldüğünde boruda böyle bir yük altında kırılma, eğilme ve burkulmanın tamamının oluşması olası gözükmemektedir. Özellikle betonarme boruların birleşim noktalarında yatay ötelenmelerden ve oturmalarından dolayı ayrılmalar oluşabilecektir.

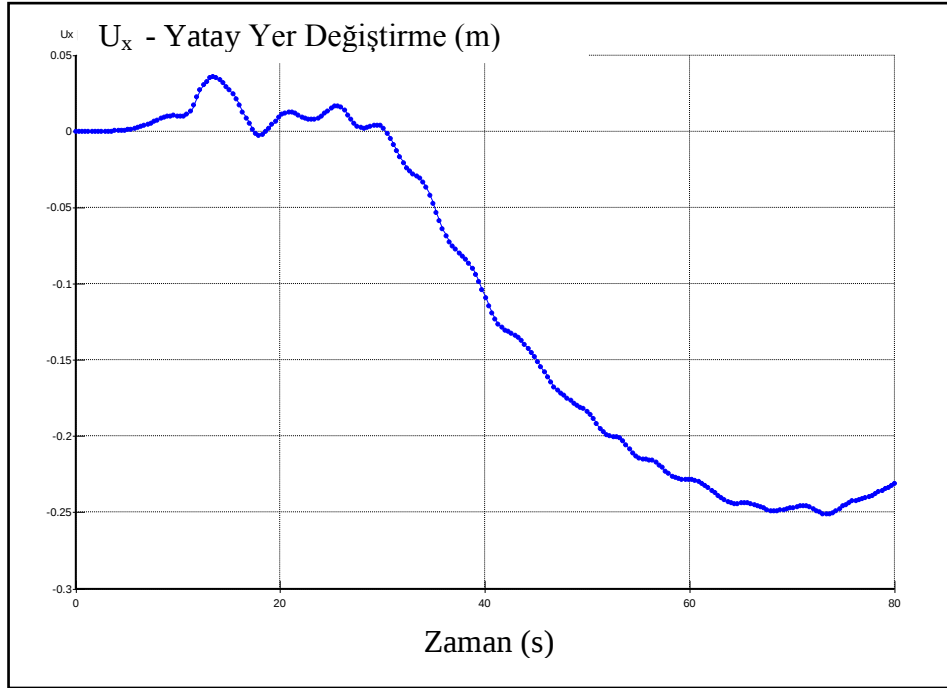
Sonlu elemanlar analizinde düzlem deformasyon durumunun geçerli olması koşuluna bağlı hesap yapıldığından, betonarme borunun boyuna doğrultusu boyunca aynı zemin koşullarının devam ettiği ve borunun kırılmadan deprem sırasında zeminin o andaki hareketine bağlı olarak hareket edebildiği kabul edilmektedir. Ayrıca, yapılan sonlu elemanlar analizinde zeminde deprem sebebiyle oluşabilecek sıvılaşma dikkate alınmamıştır. SK-1 no'lu kesitte yerleştirilen bu boru yatay yönde komşu iki zemin tabakası arasına döşenmiştir. İki zemin tabakasının rijitliğindeki farklılıktan dolayı hasar oluşabileceği kanısı da oluşmuştur.



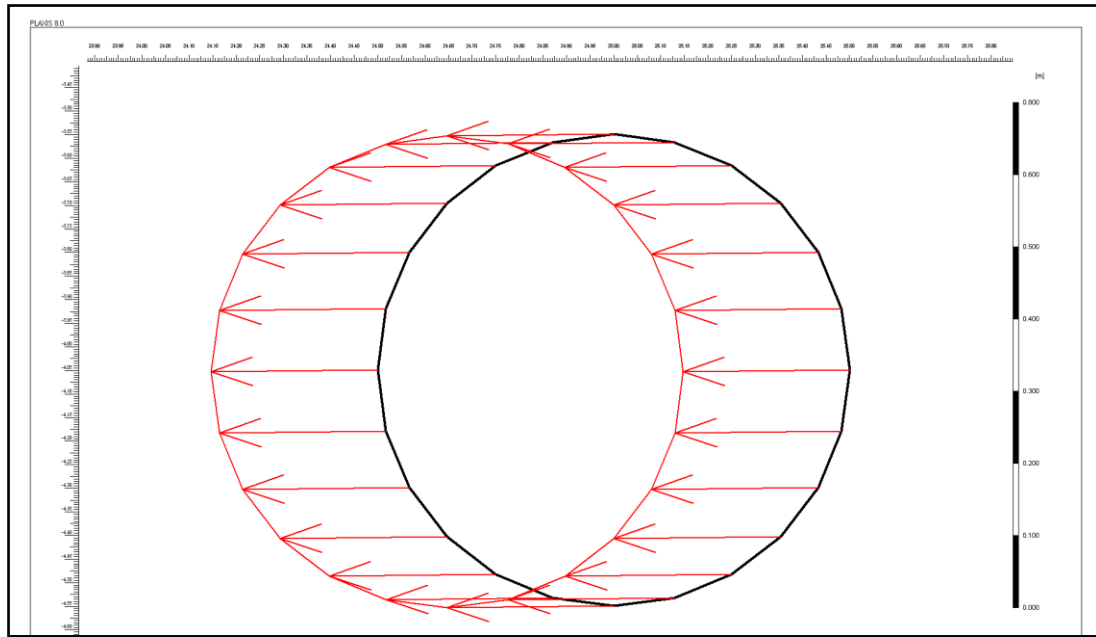
Şekil 5.9 : SK-1 Zemin Profilinde yatay yer değiştirme (0,239m)



Şekil 5.10 : SK-1 Zemin Profilinde düşey yer değiştirme (0,013m)



Şekil 5.11 : Boruda Meydana Gelen Yatay Yer değiştirme hareketi (SK-1)



Şekil 5.12 : SK-1 zemin kesitindeki beton boruda meydana gelen toplam yer değiştirme (0,23m)

5.3.5.2 CTP boru

İkinci olarak SK-1 zemin kesitine daha önce Şekil 5.5'te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 26 mm et kalınlığındaki CTP boru yerleştirilmiştir. Aynı şekilde daha sonra deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etki ettirilmiştir. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.8'de verilmiştir. Zemindeki toplam yer değiştirme ise betonarme borudaki gibi 0.24 m olarak hesaplanmıştır. Zeminde yatayda meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.24 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.9). Düşeyde aynı miktarda yer değiştirme hesaplanmıştır (Şekil 5.10). Deprem sonrası zeminde oluşan yatay ve düşey gerilmeler Şekil A.1 ve Şekil A.2'de verilmiştir.

Deprem ivme kaydına bağlı olarak boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler Şekil A.3 ve Şekil A.4'de verilmiştir. Boruda yatayda oluşan yer değiştirme 0,23093 m, düşeyde de 0,00254 m oluşmuştur. Oluşan maksimum deplasmanda 0,23094 m olmuştur. (Şekil 5.12)

Dinamik yükleme sonucu boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvvet ve eğilme momenti değerleri betonarme borudan %1'in altında olsa bile daha küçük değerler elde edilmiştir. Deprem sonrası boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmelerde değişiklik olmamıştır. Boruda oluşan eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momentleri Şekil A.7, Şekil A.8 ve Şekil A.9' da verilmektedir. Oluşan maksimum değerler Çizelge 5.8' de verilmiştir. CTP borunun betonarme boruya göre daha esnek olduğu düşünüldüğünde burada borunun üzerine gelen yükün bir kısmını zemine ilettiği düşünülebilir.

Çizelge 5.8 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

Boru Tipi / Kuvvetler	CTP Boru
Eksenel Kuvvet (kN/m)	30.45
Kayma Kuvveti (kN/m)	4.79
Eğilme Momenti (kNm/m)	7.31
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.23093
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00254

5.3.5.3 HDPE korige boru

Son olarak SK-1 Zemin kesitine daha önce Şekil 5.5'te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 24 mm et kalınlığındaki HDPE boru yerleştirilmiştir. Deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etki ettirilerek, dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.8'de verilmiştir. Zeminde 0.24 m maksimum toplam yer değiştirme hesaplanmıştır. Zeminde yatayda meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.2398 m, (Şekil 5.9) düşeyde ise 0.1265 m yer değiştirme hesaplanmıştır (Şekil 5.10). Zeminde oluşan maksimum efektif gerilmelerde diğer iki boru için yapılan analizlerle aynı değerlerde hesaplanmıştır. (Şekil A.1, Şekil A.2)

Boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler Şekil A.3 ve Şekil A.4'de verilmiştir. Boruda deprem sonrasında toplam 0,23123 m toplam yer değiştirme meydana gelmiştir. (Şekil 5.12). Boru yatayda 0.23121 m ötelenmiş, düşeyde ise 0,00301 m oturma yapmıştır.

Boruda oluşan aksenal kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri betonarme ve CTP boruya gelen tesirlerin neredeyse yarısı mertebesinde hesaplanmıştır. Boruda oluşan tesir kuvvetleri Şekil A.10, Şekil A.11 ve Şekil A.12' de verilmektedir. Deprem sonrası borudaki maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti, eğilme momenti ve boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler Çizelge 5.9' de verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Boruda oluşan maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

Boru Tipi / Kuvvetler	HDPE Boru
Eksenal Kuvvet (kN/m)	19.59
Kayma Kuvveti (kN/m)	2.34
Eğilme Momenti (kNm/m)	4.34
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.23121
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00301

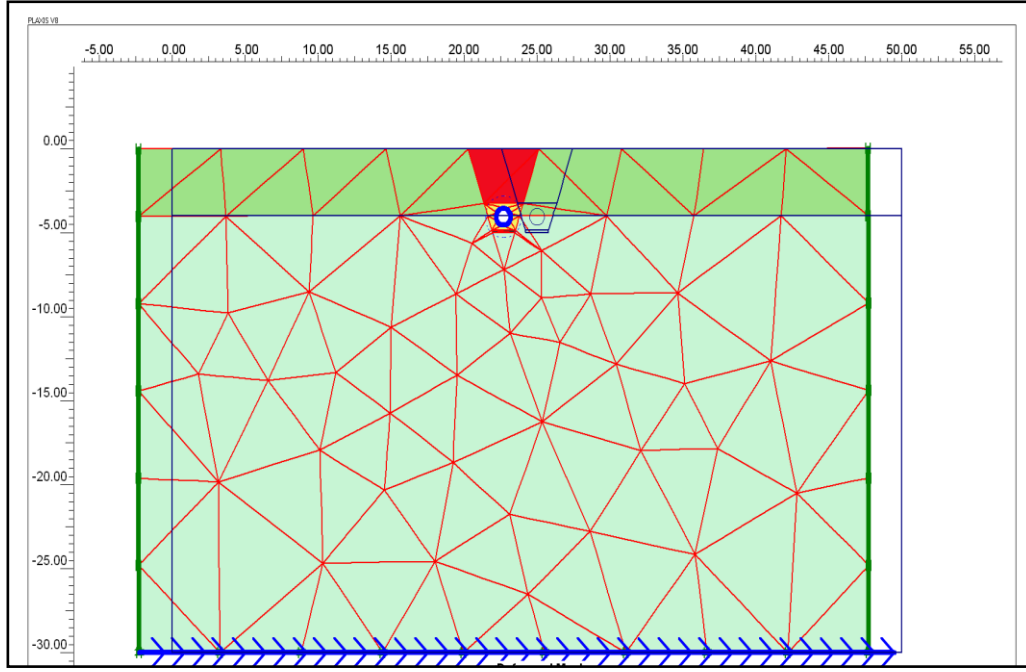
5.3.6 SK-2 kesitinin plaxis programıyla modellenmesi

Aynı şekilde SK-1 kesitinin modellendiği şekilde ilk olarak 50 m genişliğinde ve 30 m derinliğinde zemin profili çizilmiştir. Daha sonra Dilovası Organize Sanayi Bölgesi'nden alınan iyi bir zemine ait 2 no'lu sondaj kesitine (SK-2) ait zemin tabakaları derinliklerine göre profile çizilmiştir. Devamında Şekil 5.5'te boyutları da verilen tipik hendek kesiti zemin profiline her iki yanı ortalayacak şekilde (yani simetrik olarak) yerleştirilir. Daha sonra zemin kesitine ve hendek kesitine ait tüm parametreler plaxis programına girilir. Plaxis programında kullanılmak amacıyla SK-2 zemin kesitine ait başlangıç elastisite modülü, doğal birim hacim ağırlığı, kohezyon katsayısı, iç sürtünme açısı, poisson oranı ve SPT N30 değerleri (E , λ_n , c , Φ , ν ve N_{30}) Çizelge 5.10'da verilmiştir. Ayrıca tipik hendek kesitinde yer alan dolgu malzemelerine ait parametrelerde Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Daha sonra oluşturulan zemin profiline yerleştirilen üç farklı tip boruya sırasıyla (Betonarme, CTP ve HDPE) aynı deprem kaydı ettirilerek plaxis sonlu elemanlar modeli programıyla analizleri yapılmıştır. Borulara ait malzeme özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.10 : SK-2'deki (2 No'lu Kesitteki) Zemin Parametreleri

Sondaj Kesit No	Tabaka Derinliği (m)	Malzeme Cinsi	E (kN/m ²)	γ_n (kN/m ²)	ϕ	c (kN/m ²)	ν
SK-2	0.00 - 4,00	Çakıllı Kumlu Kil	$2 \cdot 10^4$	19	5	50	0,30
	4.00 - 30.00	Marn	$1.5 \cdot 10^4$	21	40	100	0,15

Bütün bu veriler Plaxis programına girildikten sonra zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetlenir. Problemin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi için ortamın deprem sırasında lineer-elastik davrandığı kabul edilmiştir ve dinamik analize başlamadan önce zemin gerilmeleri ve su basınçları oluşturulmuştur. Deprem zemin profilinin en alt noktasından etkililir. Şekil 5.13'de ise SK-2 profiline ait analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Aynı çaptaki üç farklı boru zemin profilindeki yer alan hendek içerisine yerleştirilerek analizler yapılmıştır. Bunlar sırasıyla betonarme, CTP ve HDPE



Şekil 5.14 : Dinamik yük sonrası zeminde oluşan gerilmeler
(SK-2) (Toplam yer değiştirme : 0.115m)

Deprem ivme kaydına bağlı olarak boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de verilmiştir. Deprem sonrasında boruda yatayda oluşan yer değiştirme 0,11445 m, düşeyde oluşan yer değiştirme ise 0,00005 m’dir. Oluşan toplam deplasmanda 0,11445 m olarak hesaplanmıştır. (Şekil 5.18)

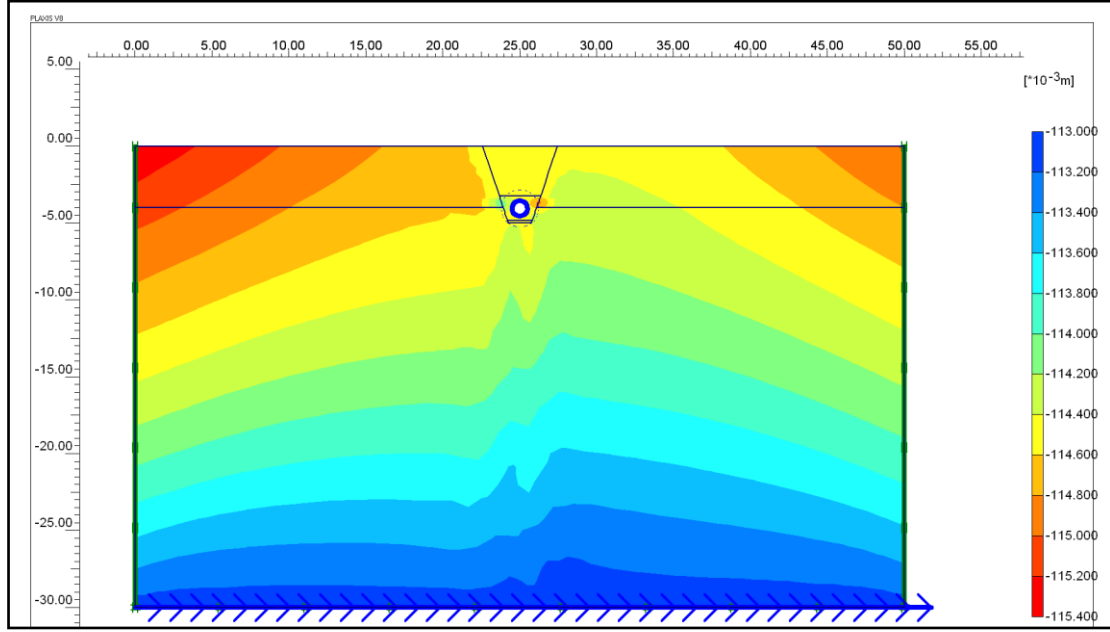
Dinamik yükleme sonucu boruda oluşan aksenal kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri Şekil A.16, Şekil A.17 ve Şekil A.18’ de verilmektedir. Boruda meydana gelen maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti, eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme değerleri ise Çizelge 5.11’ de verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti yatay ve düşey yer değiştirme

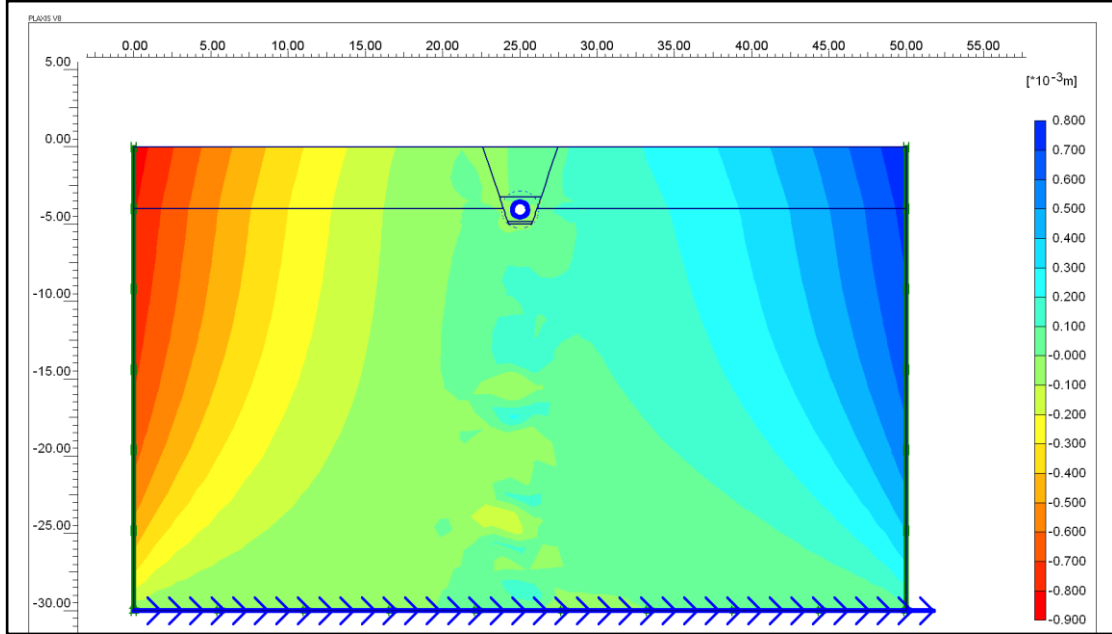
Boru Tipi / Kuvvetler	Betonarme Boru
Eksenel Kuvvet (kN/m)	41.56
Kayma Kuvveti (kN/m)	9.4
Eğilme Momenti (kNm/m)	10.30
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.11445
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00005

Deprem kaydı sonunda boruya gelen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti değerleri plaxis programıyla hesaplanmıştır. TSE 821 standardı incelendiğinde betonarme borunun dayanım değerinin yüksek olmasından dolayı bu dinamik yük altında kırılması mümkün gözükmemektedir. Borunun yatayda 11,47 cm 'lik öteleme yapacağı düşünüldüğünde boruda oluşabilecek böyle bir hareket sonucunda boruların birleşim noktalarında yatay ötelenmelerden dolayı kırılmalar, çatlamlar ve ayrılmalar oluşabileceği düşünülmektedir.

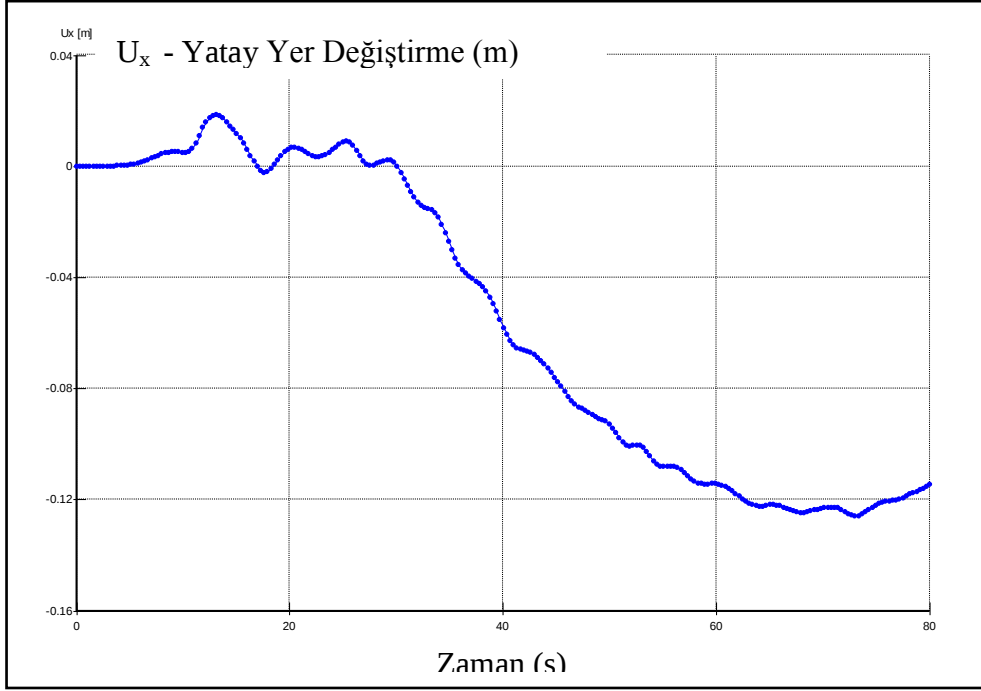
Sonlu elemanlar analizinde düzlem deformasyon durumunun geçerli olması koşuluna bağlı hesap yapıldığından, betonarme borunun boyuna doğrultusu boyunca aynı zemin koşullarının devam ettiği ve borunun kırılmadan deprem sırasında zeminin o andaki hareketine bağlı olarak hareket edebildiği kabul edilmektedir. Ayrıca, yapılan sonlu elemanlar analizinde zeminde deprem sebebiyle oluşabilecek sıvılaşma dikkate alınmamıştır. SK-2 no'lu kesitte yerleştirilen betonarme boru yatay yönde komşu iki zemin tabakası arasına döşenmiştir. İki zemin tabakasının rijitliğindeki farklılıktan dolayıda hasarlar oluşabileceği fikri oluşmuştur.



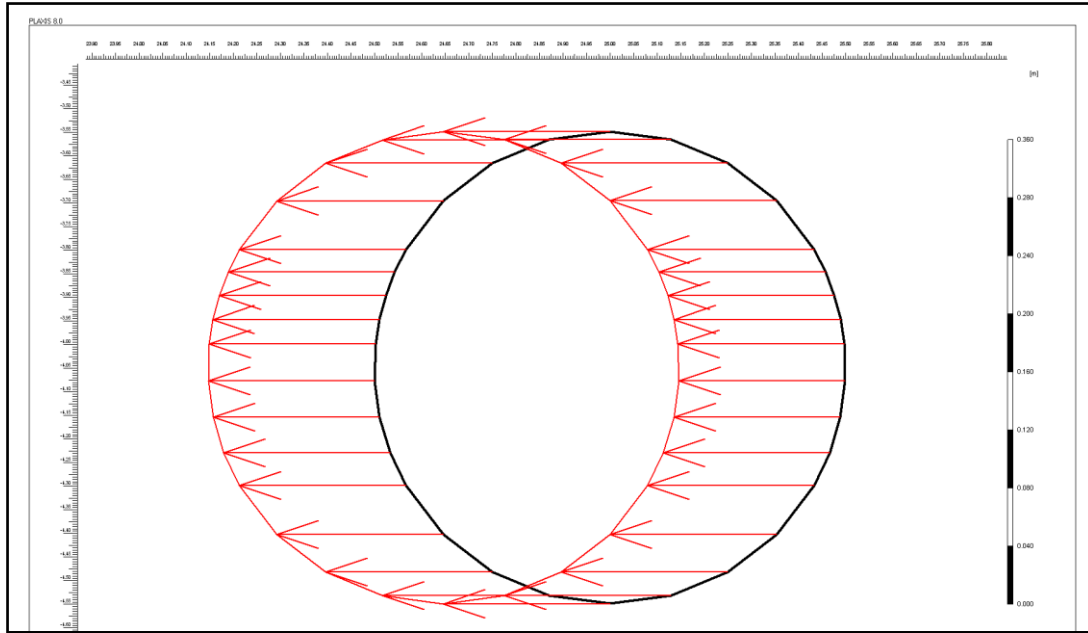
Şekil 5.15 : SK-2 Zemin Profilindeki yatay yer değiştirmeler (0,115m)



Şekil 5.16 : SK-2 Zemin Profilindeki düşey yer değiştirmeler (0,001m)



Şekil 5.17: Boruda Meydana Gelen Yatay Yer değışirme hareketi (SK-2)



Şekil 5.18: SK-2 zemin kesitindeki beton boruda meydana gelen toplam yer değışirme (0,114m)

5.3.6.2 CTP boru

İkinci olarak SK-2 zemin kesitine daha önce verilen tip hendek kesitine $\Phi 1000$ mm $\varnothing$ 26 mm et kalınlığındaki CTP boru yerleştirilmiştir. Deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etki ettirilmiştir. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.14’de verilmiştir. Betonarme boruda toplam 0.11445 m yerdeğiştirme olmuştur. Deprem sonrası yatayda meydana gelen yer değiştirme 0,11445 m (Şekil 5.15) ve düşeydeki yer değiştirme ise 0,00005 m’dir (Şekil 5.16). Deprem sonrası zeminde oluşan yatay ve düşey efektif gerilmeler Şekil A.13 ve Şekil A.14’de verilmiştir.

Dinamik yükleme sonucu boruya etkileyen aksenal kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri Şekil A.19, Şekil A.20 ve Şekil A.21’ de verilmektedir. Deprem sonrası boruda meydana gelen maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti, eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme değerleri Çizelge 5.12’ de verilmiştir.

Çizelge 5.12 : Boruda oluşan maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

Boru Tipi / Kuvvetler	CTP Boru
Eksenal Kuvvet (kN/m)	41.41
Kayma Kuvveti (kN/m)	9.34
Eğilme Momenti (kNm/m)	10.22
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.11445
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00005

5.3.6.3 HDPE korige boru

Son olarak SK-2 Zemin kesitine daha önce Şekil 5.5'te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 24 mm et kalınlığındaki HDPE boru yerleştirilmiştir. Deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etki ettirilerek, dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.14'de verilmiştir. Zeminde 0.1153 m olarak hesaplanan maksimum toplam yer değiştirmenin tamamı yatayda meydana gelen (Şekil 5.15) yer değiştirmeye meydana gelmiştir. Düşeyde ise 0.00097 m yerdeğiştirme hesaplanmıştır (Şekil 5.16). Zeminde oluşan maksimum efektif gerilmelerde diğer iki boru için yapılan analizlerle aynı değerlerde hesaplanmıştır. (Şekil A.13, Şekil A.14)

Boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de verilmiştir. Boruda deprem sonrasında toplam 0.11474 m toplam yer değiştirme meydana gelmiştir. (Şekil 5.17). Boru yatayda 0.11474 m ötelenmiş, düşeyde ise zeminin oldukça düşük bir oturma görülmüştür (0.00097 m).

Boruda oluşan aksenal kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri betonarme ve CTP boruya gelen tesirlerden farklı olarak diğer borularda meydana gelen maksimum aksenal kuvvetin yaklaşık %62'si, kayma kuvvetinin %44'ü ve eğilme momentlerinin %55'i gibi oranlarda daha küçük olarak hesaplanmıştır. Boruda oluşan tesir kuvvetleri Şekil A.22, Şekil A.23 ve Şekil A.24' de verilmektedir. Çizelge 5.13' de boruda oluşan maksimum değerler verilmiştir.

Çizelge 5.13 : Boruda oluşan maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

Boru Tipi / Kuvvetler	HDPE Korige Boru
Eksenal Kuvvet (kN/m)	25.50
Kayma Kuvveti (kN/m)	4.08
Eğilme Momenti (kNm/m)	5.67
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.11474
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00097

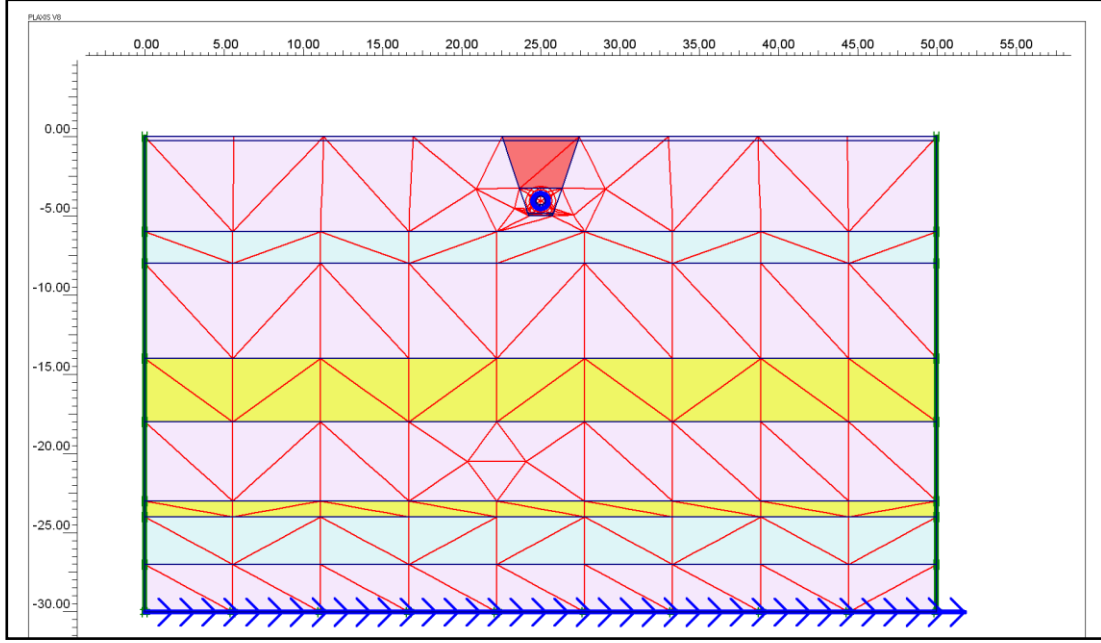
5.3.7 SK-3 kesitinin plaxis programıyla modellenmesi

Son olarak Adapazarı Tığcılar Mahallesi'nde alınan çok kötü bir zemine ait sondaj kesitini (SK-3) modellemek amacıyla, aynı diğer zemin profillerindeki gibi 50 m genişliğinde ve 30 m derinliğinde zemin profili çizilir. Daha sonra kesitin içerisine 3 no'lu sondaj kesitine (SK-3) ait zemin tabakaları derinliklerine göre profile çizilir. Daha sonra Şekil 5.5'te boyutları da verilen tipik hendek kesiti zemin profiline her iki yanı ortalayacak şekilde (yani simetrik olarak) yerleştirilir. Daha sonra zemin kesitine ve hendek kesitine ait tüm parametreler plaxis programına girilir. Plaxis programında kullanılmak amacıyla SK-3 zemin kesitine ait başlangıç elastisite modülü, doğal birim hacim ağırlığı, kohezyon katsayısı, iç sürtünme açısı, poisson oranı ve SPT N30 değerleri (E , λ_n , c , Φ , v ve N_{30}) Çizelge 5.14'de verilmiştir. Ayrıca tipik hendek kesitinde yer alan dolgu malzemelerine ait parametrelerde Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Daha sonra oluşturulan zemin profiline yerleştirilen üç farklı tip boruya sırasıyla (Betonarme, CTP ve HDPE) aynı deprem kaydı ettirilerek plaxis sonlu elemanlar modeli programıyla analizleri yapılmıştır. Borulara ait malzeme özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.14 : SK-3'deki (3 No'lu Kesitteki) Zemin Parametreleri

Sondaj Kesit No	Tabaka Derinliği (m)	Malzeme Cinsi	E (kN/m ²)	γ_n (kN/m ²)	ϕ	c (kN/m ²)	ν
SK-3	0-8,00	Silt	4.10^3	16	0	40	0,35
	8,00 - 10,00	Siltli Kum	$7.5.10^3$	17	30	0	0,30
	10,00 - 14,00	Silt	4.10^3	16	0	40	0,35
	14,00 - 18,00	Kil	3.10^3	18	0	40	0,35
	18,00 – 23,00	Silt	4.10^3	16	0	40	0,35
	23,00 – 24,00	Kil	3.10^3	18	0	40	0,35
	24,00 – 27,00	Siltli Kum	$7.5.10^3$	17	30	0	0,30
	27,00 – 30,00	Silt	4.10^3	16	0	40	0,35

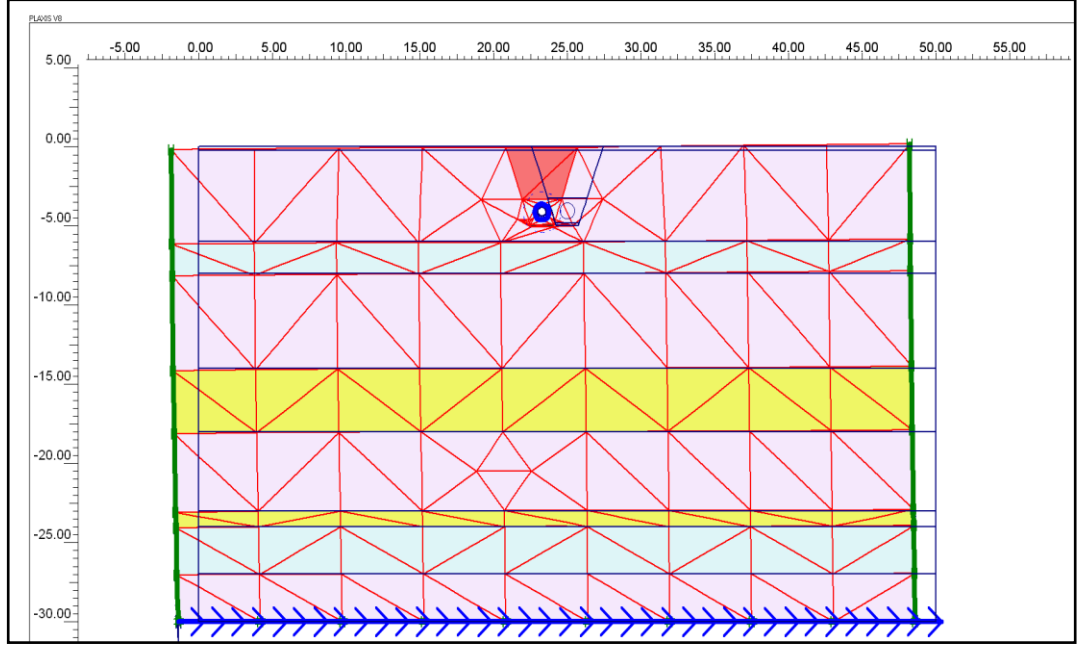
Bütün bu veriler Plaxis programına girildikten sonra zemin yarlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetlenir. Problemin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi için ortamın deprem sırasında lineer-elastik davrandığı kabul edilmiştir ve dinamik analize başlamadan önce zemin gerilmeleri ve su basınçları oluşturulmuştur. Deprem zeminin profilinin en alt noktasından etkitilir. Şekil 5.19'da ise SK-3 profiline ait analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Analizlerde aynı zemin kesitine aynı çapta 3 farklı boru malzemesi yerleştirilmiştir. Bunlar betonarme, CTP ve HDPE borulardır.



Şekil 5.19 : Sonlu Elemanlar Ağı – Kesit-3

5.3.7.1 Betonarme boru

Son olarak Adapazarı Tıgıcılar Mahallesinden alınan SK-3 Zemin kesitine daha önce Şekil 5.5'te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 110 mm et kalınlığındaki betonarme boru yerleştirilmiştir. Daha sonra deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etki ettirilmiştir. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.20'de verilmiştir. Toplam yer değiştirme ise 0.3747 m olarak hesaplanmıştır. Zeminde yatayda meydana gelen maksimum yer değiştirme 0.3743 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.21). Düşeyde ise 0.0371 m'lik bir oturma hesaplanmıştır (Şekil 5.22). Deprem sonrası zeminde oluşan yatay ve düşey gerilmeler şekil A.25 ve A.26'de verilmiştir. Oluşan maksimum efektif gerilmeler düşeyde 293.08 kN/m^2 , yatayda ise 287.02 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.20 : Dinamik yük sonrası zeminde oluşan gerilmeler
(SK-3) (Toplam yer değıştirme: 0.374m)

Deprem ivme kaydına bağı olarak boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değıştirmeler ise Şekil 5.23 ve Şekil A.27’de verilmiştir. Deprem sonrası boruda yatayda oluşan yer değıştirme 0,34485 m, düşeyde ise 0,01692 m oturma oluşmuştur. Deprem sonrası oluşan toplam deplasmanda 0.34523 m olmuştur (Şekil 5.24).

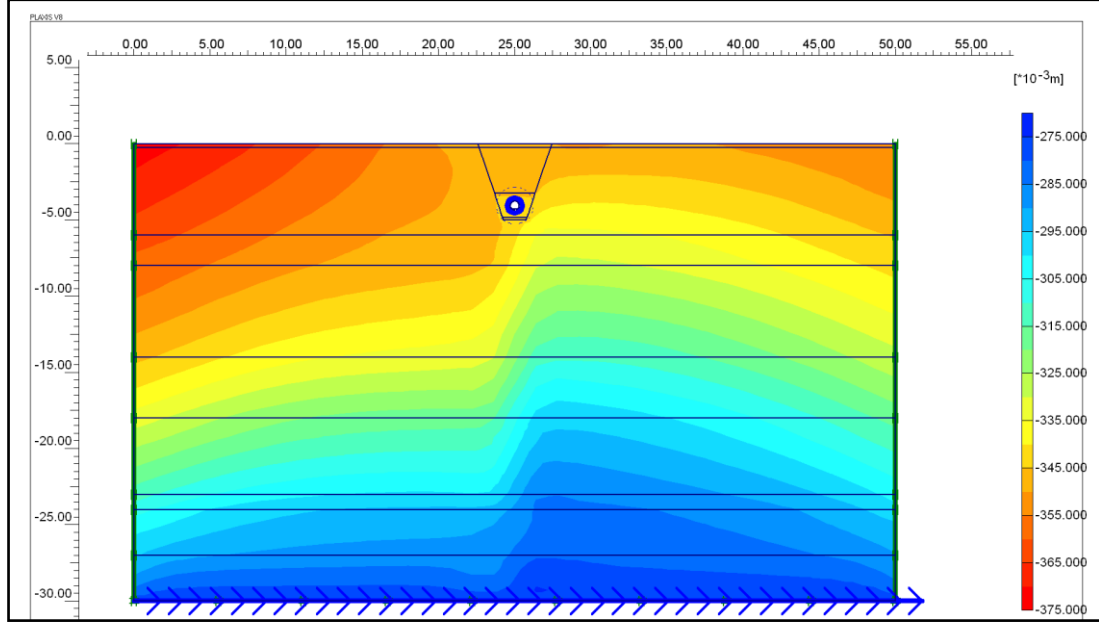
Dinamik yükleme sonucu boruda oluşan eksenel kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri Şekil A.28, Şekil A.29 ve Şekil A.30’ da verilmektedir. Dinamik yükleme sonunda boruda meydana gelen yatay ve düşey yerdeğıştirmeler, maksimum eksenel kuvvet, maksimum kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti değeri Çizelge 5.15’ de verilmiştir.

Çizelge 5.15 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

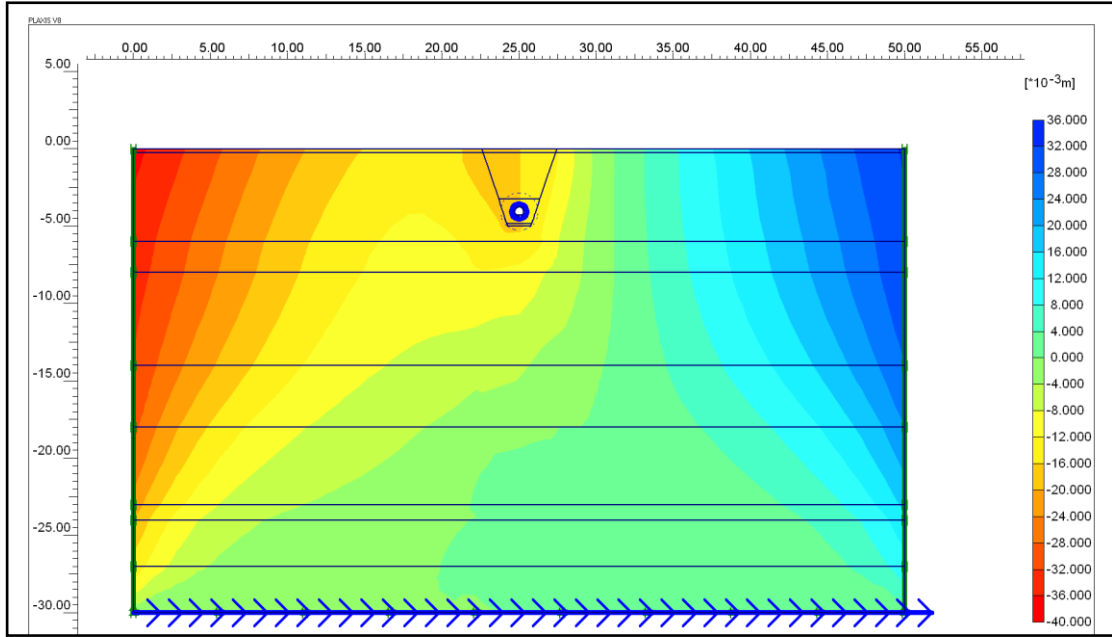
Boru Tipi / Kuvvetler	Betonarme Boru
Eksenel Kuvvet (kN/m)	24.81
Kayma Kuvveti (kN/m)	4.07
Eğilme Momenti (kNm/m)	5.98
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.34485
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.01692

Dinamik yük altında boruya gelen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti değerleri plaxis programıyla hesaplanmıştır. TSE 821 standardı incelendiğinde (seçilen donatıya göre 65-85 kN/m) betonarme borunun dayanım değerinin yüksek olmasından dolayı dinamik yük altında kırılması mümkün gözükmemektedir. Fakat borunun yapmış olduğu yatayda 34.5 cm’lik ötelenme ve düşeydeki 1.7 cm’lik oturma düşünüldüğünde boruda böyle bir yük altında kırılma, eğilme ve burkulmanın tamamının oluşması olası gözükmemektedir. Özellikle betonarme boruların birleşim noktalarında yatay ötelenmelerden ve oturmalarından dolayı ayrılmalar oluşabilecektir.

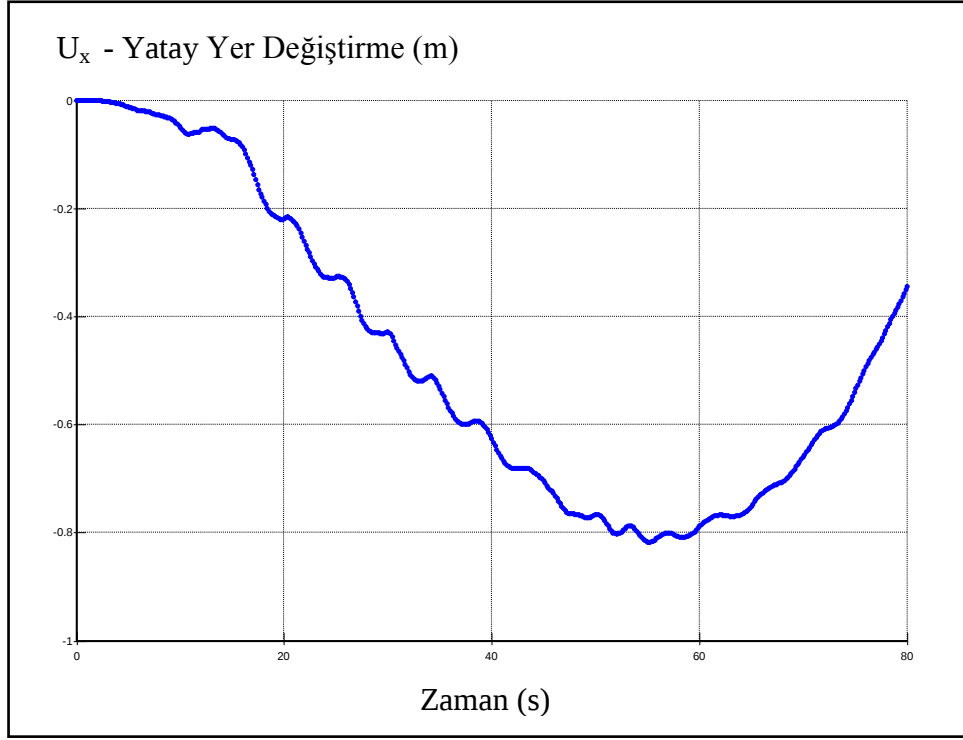
Sonlu elemanlar analizinde düzlem deformasyon durumunun geçerli olması koşuluna bağlı hesap yapıldığından, betonarme borunun boyuna doğrultusu boyunca aynı zemin koşullarının devam ettiği ve borunun kırılmadan deprem sırasında zeminin o andaki hareketine bağlı olarak hareket edebildiği kabul edilmektedir. Ayrıca, yapılan sonlu elemanlar analizinde zeminde deprem sebebiyle oluşabilecek sıvılaşma dikkate alınmamıştır. SK-3 no’lu kesitte yerleştirilen bu boru siltli bir tabaka içerisinde yerleştirilmiştir. Gömülü boru hatlarında sismik hareketler sonucu oluşan hasarlar daha çok siltli kumlu zeminlerin sıvılaşması ya da yatay yönde komşu iki zemin tabakasının rijitliğindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır burada farklı herhangi iki tabaka olmamasına rağmen siltli tabakadan ötürü bunun oluşabileceği fikrini ortaya çıkarmıştır.



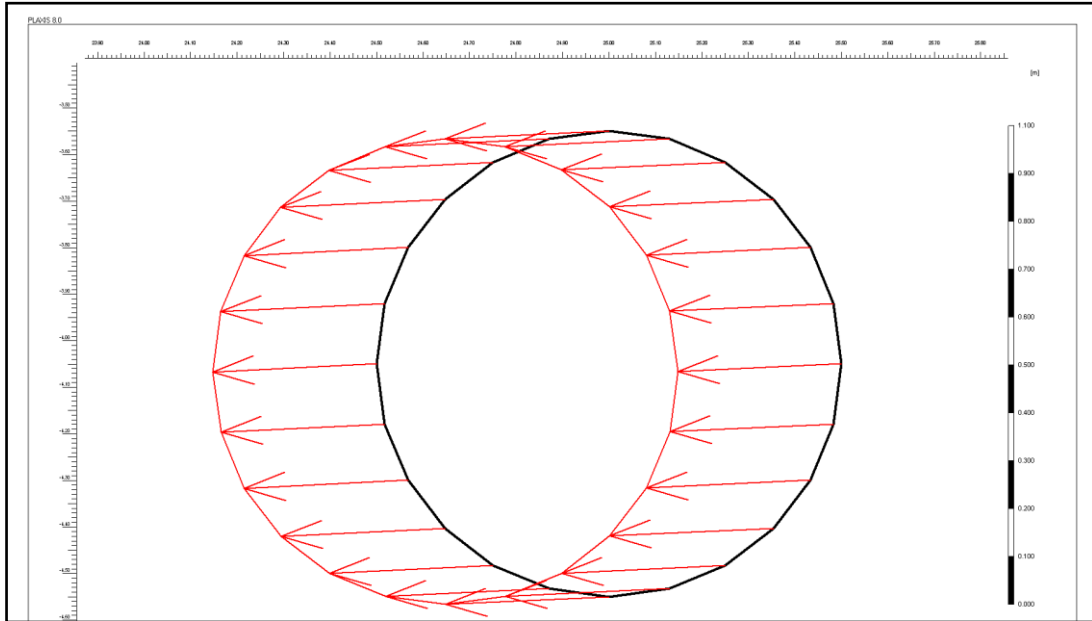
Şekil 5.21: SK-3 Zemin Profilinde yatay yer değiştirme (0.372m)



Şekil 5.22: SK-3 Zemin Profilinde düşey yer değiştirme (0.037m)



Şekil 5.23 : Boruda Meydana Gelen Yatay Yer değiştirme hareketi (SK-3)



Şekil 5.24 : SK-3 zemin kesitindeki beton boruda meydana gelen toplam yer değiştirme (0.345m)

5.3.7.2 CTP boru

İkinci olarak SK-3 zemin kesitine daha önce Şekil 5.5'te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 26 mm et kalınlığındaki CTP boru yerleştirilmiştir. Deprem kaydı 80 sn boyunca zemin profiline etkilmiştir. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.20'de verilmiştir. Aynen betonarme boru için yapılan analizde hesaplandığı gibi zemindeki maksimum deplasman, yatay ve düşey meydana gelen yer değiştirmeler aynı değerler hesaplanmıştır (Şekil 5.21, Şekil 5.22). Deprem sonrası zeminde oluşan yatay ve düşey gerilmeler Şekil A.25 ve A.26'da verilmiştir. Zeminde meydana gelen maksimum efektif gerilmeler düşeyde $293,08 \text{ kN/m}^2$, yatayda ise $278,22 \text{ kN/m}^2$ 'dir.

Deprem ivme kaydına bağlı olarak boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler Şekil 5.23 ve Şekil A.27'de verilmiştir. Boruda yatayda oluşan yer değiştirme $0,34485 \text{ m}$, düşeyde de $0,01692 \text{ m}$ oluşmuştur. Oluşan maksimum deplasmanda $0,34523 \text{ m}$ olmuştur. (Şekil 5.24)

Dinamik yükleme sonucu boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvvet ve eğilme momenti değerleri betonarme borudan %1'in altında olsa bile daha küçük değerler elde edilmiştir. Deprem sonrası boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmelerde değişiklik olmamıştır. Boruda oluşan tesir kuvvetleri Şekil A.31, Şekil A.32 ve Şekil A.33' de verilmektedir. Boruda dinamik yükleme sonrası hesaplanan değerler Çizelge 5.16' de verilmiştir. CTP borunun betonarme boruya göre daha esnek olduğu düşünüldüğünde burada borunun üzerine gelen yükün bir kısmını zemine ilettiği düşünülebilir.

Çizelge 5.16 : Boruda oluşan maksimum eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

Boru Tipi / Kuvvetler	CTP Boru
Eksenel Kuvvet (kN/m)	24.74
Kayma Kuvveti (kN/m)	4.05
Eğilme Momenti (kNm/m)	5.94
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.34485
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.01692

5.3.7.3 HDPE korige boru

Son olarak, SK-3 Zemin kesitine daha önce Şekil 5.5'te verilen tip hendek kesiti içerisine $\Phi 1000$ mm çapında 24 mm et kalınlığındaki HDPE Korige boru yerleştirilmiştir. Şekil 5.6'da kaydı verilen deprem 80 sn boyunca zemin profiline etkilmiştir. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşan gerilmeler Şekil 5.20'de verilmiştir. Yapılan üç analiz sonucunda da zeminde oluşan gerilmeler, toplam yer değiştirme, maksimum yatay ve düşey deplasman, maksimum yatay ve düşey efektif gerilmeler aynı değerde bulunmuştur. Zeminde yatayda maksimum yer değiştirme 0,3725 m, düşeyde ise 0,0371 m, toplamda ise 0,3744 m toplam yer değiştirme hesaplanmıştır (Şekil 5.21, Şekil 5.22). Deprem sonrası zeminde oluşan yatay ve düşey gerilmeler betonarme ve CTP boru için yapılan analizlerde elde edilen değerlerle aynı hesaplanmıştır (Şekil A.25, Şekil A.26).

HDPE Boruda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler çok küçük bir farkla da olsa betonarme ve CTP borudan fazla hesaplanmıştır (Şekil 5.23, Şekil A.27). Boruda yatayda oluşan yer değiştirme 0,34444 m, düşeyde ise 0,01696 m düşey yer değiştirme oluşmuştur. 0,34533 m toplam yer değiştirme hesaplanmıştır (Şekil 5.24).

Dinamik yükleme sonucu boruda oluşan aksenal kuvvetler, kayma kuvvetleri ve eğilme momentleri Şekil A.34, Şekil A.35 ve Şekil A.36' da verilmektedir. Boruda dinamik yükleme sonrası hesaplanan değerler Çizelge 5.17' de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : Boruda oluşan maksimum aksenal kuvvet, kayma kuvveti ve maksimum eğilme momenti, yatay ve düşey yer değiştirme

Boru Tipi / Kuvvetler	HDPE Korige Boru
Eksenal Kuvvet (kN/m)	16.58
Kayma Kuvveti (kN/m)	2.14
Eğilme Momenti (kNm/m)	3.65
Yatay Yer Değiştirme (m)	0.34494
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.01696

Sonlu elemanlar analizinde düzlem deformasyon durumunun geçerli olması koşuluna bağlı hesap yapıldığından, betonarme borunun boyuna doğrultusu boyunca aynı zemin koşullarının devam ettiği ve borunun kırılmadan deprem sırasında zeminin o andaki hareketine bağlı olarak hareket edebildiği kabul edilmektedir. Bu sebeple, boruda yüksek yer değiştirme hesaplanmıştır. Ayrıca, yapılan sonlu elemanlar analizinde zeminde deprem sebebiyle oluşabilecek sıvılaşma dikkate alınmamıştır. Gömülü boru hatlarında sismik hareketler sonucu oluşan hasarlar daha çok siltli kumlu zeminlerin sıvılaşması ya da yatay yönde komşu iki zemin tabakasının rijitliğindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır burada sıvılaşma olabileceği kanısı oluşmuştur.

5.4 Yapılan Analizlerin Karşılaştırılması

Aynı dinamik yükler altında farklı 3 zemin profilinin her biri için 3 farklı boru malzemesi kullanılarak toplam 9 adet analiz Plaxis programı ile yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda SK-3 zeminin (Tıgçılar Mah.) SK-1 (Dilovası) ve SK-2'ye (Dilovası) oranla daha kötü zemin olduğu, SK-2 'nin ise iyi bir zemin olduğu görülmüştür. Zeminlerde oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler birbirinden farklıdır. En büyük yer değiştirme SK-3'te meydana gelmiştir. Zeminlerde meydana gelen yer değiştirmeler Çizelge 5.19'de verilmiştir. Aynı zemin profilinde her üç boru için de zemine etkiyen yer değiştirmeler, gerilmeler ve borularda meydana gelen yer değiştirmeler aynı bulunmuştur.

Aynı zemin profili içerisine 3 farklı malzemeden yapılmış aynı çapta boru yerleştirilerek aynı dinamik yük etkisi altında boruda meydana gelen tesirler hesaplanmıştır. Çizelge 5.6, Çizelge 5.10, Çizelge 5.14'te özellikleri verilen her üç zeminde ve hesaplanan üç farklı boruda, boruya gelen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti değerleri birbirinde farklıdır (Çizelge 5.18).

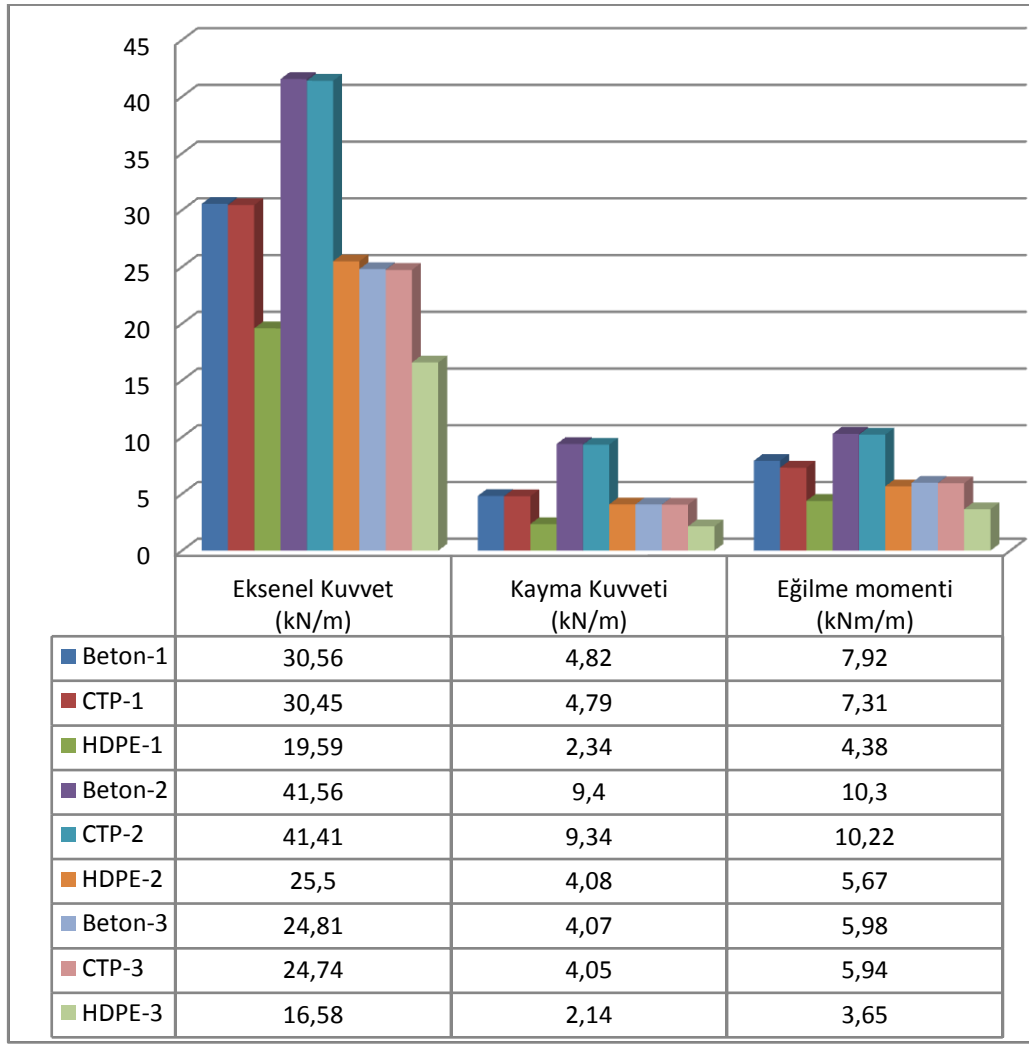
Fakat her bir zeminde farklı borulara etkiyen normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momentleri farklı bulunmuştur. (Çizelge 5.19) Burada borulara gelen yükler boru özelliklere bağlı olarak gelen yükleri zemine aktardığı görülmüştür. Elde edilen verilere göre esnek bir boru olan HDPE boru daha rijit olan betonarme ve CTP boruya oranla daha az bir kuvvete maruz kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca sağlam zeminlerde deprem yüklerinden dolayı borulara daha fazla eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme kuvveti geldiği görülmüştür. (Şekil 5.25).

Çizelge 5.18: Deprem sonrası her üç zemin profilinde meydana gelen maksimum yatay ve düşey deplasman değerleri ve deprem sonrası borudaki yer değiştirmeler

Zemin Cinsi	Zemin Profili-1	Zemin Profili-2 (İyi Zemin)	Zemin Profili-3 (Kötü Zemin)
Zemindeki Maksimum Yatay Deplasman (m)	0,2397	0,1153	0,3725
Zemindeki Maksimum Düşey Deplasman (m)	0,0127	0,0008	0,0379
Boruda meydana gelen yatay yer değiştirme (m)	0,2393	0,1144	0,3448
Boruda meydana gelen düşey yer değiştirme (m)	0,0025	0,0001	0.0169

Çizelge 5.19 : Dinamik yük sonrası borulara etkiyen tesir kuvvetleri

Zemin Tipi	1 No'lu Zemin Profili			2 No'lu Zemin Profili			3 No'lu Zemin Profili		
Boru Tipi / Kuvvetler	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
Düşey Yer Değiştirme (m)	0.00254	0.00254	0.00301	0.00005	0.00005	0.00097	0.01692	0.01692	0.01696



Şekil 5.25: Dinamik yükleme sonrası her üç zeminde meydana gelen tesirleri karşılaştırılması

Yapılan analizlerde veriler Plaxis programına girildikten sonra zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetlenmiştir. Ayrıca deprem dalgalarının yatay hareketlerinin sınırlandırılması için yatayda deprem dalgaları sönümleme katsayısı kullanılmıştır. Alınan katsayılar $c_1=1.00$, $c_2=0.25$ 'dir. Ayrıca hesaplarda deprem Rayleigh dalgası katsayıları α 0.3025, β 0.6000 alınmıştır. Problemin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi için ortamın deprem sırasında lineer-elastik davrandığı kabul edilmiştir ve dinamik analize başlamadan önce zemin gerilmeleri ve su basınçları oluşturulmuştur. Ayrıca yapılan analizlerde 50 m uzunluğuna ve sondaj derinliği olan 30 m arasında kalan bir alan alınıp boru hendek içerisine her iki taraftan simetrik olacak şekilde yerleştirilerek analizler yapılarak sonuçlarına ulaşılmıştır. Sonuçları yukarıdaki bölümlerde verilen bu analizlerin dışında Tığcılar'dan alınan 3 numaralı kesite ait zemin profilinde zemin uzunluğu, deprem etki yeri, kullanılan deprem dalga sönümleyici katsayısı gibi sınırları

belirleyen faktörlerin bir kısmı birer birer değiştirilerek analizler yapılmıştır. Ayrıca alınan deprem kaydı, maksimum ivmesine göre orantısal olarak büyütülerek farklı koşullarda analizleri yapılmıştır. Bu amaçla alınan deprem kaydının maksimum ivmesi olan 0.06g orantısal olarak büyütülerek maksimum ivmeleri 0.1g, 0.2g, 0.3g ve 0.4g olan deprem kayıtları elde edilmiştir. Çizelge 5.20 incelendiğinde görülecektir ki; zeminin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, deprem dalgaları için sınırlarda sönümleyicininde olmadığı durumlarda, depremde en alt noktadan etkitildiğinde (30 m aşağıdan), zeminin optimum mesafe olarak kabul edilen 50 m alındığında, deprem sonrası borunun yatayda oldukça az bir ötelenme yapabildiği görülmüştür (2.23 cm). Seçilen zemin uzunluğu artırıldığında zeminde ve deprem sonrası borudaki maksimum yer değiştirmeler artmıştır. Ayrıca 50 m zemin uzunluğu olarak alınan zeminlerde, elde edilen farklı maksimum ivmelere sahip depremlere göre yapılan analizlerin sonuçlarında zeminde ve deprem sonrası boruda deprem ivmesinin artışıyla paralel olarak maksimum deplasmanlar oldukça artmıştır. Zeminin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, zeminin yanlarında dalga sönümleyiciler yerleştirildiği ($c_1=1.00$, $c_2=0.25$) 2. Grup sınır koşullarında da analizler yapılmıştır. 1. Grup sınır koşullarında elde edilen sonuçların aksine deprem dalgalarının sönümlenmesi sebebiyle zemin mesafesi açıldığında zeminde ve deprem sonrası borudaki yer değiştirmelerin azaldığı ama yine aynı şekilde depremlerin büyümesiyle birlikte oluşan yer değiştirmelerin oldukça arttığı gözlenmiştir. Büyük depremlerde yani en fazla maksimum ivmeye sahip deprem kayıtlarında oldukça fazla ötelenmelerin oluşabildiği belirlenmiştir. Maksimum ivmenin 0.03g olduğu depremin sonunda deprem sonrası boruda 1.53 m, 0.04g olduğunda ise 2.02 m gibi büyük yer değiştirmeler meydana gelmiştir. 3. Grup analizlerde ise, aynı ikinci analiz grubundaki sınır koşullarındaki gibi zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetlenmiş, Zeminin yanlarında deprem dalgaları için sönümleyici katsayılar kullanılmıştır ($c_1=1.00$, $c_2=0.25$). Bu grup analizlerde deprem zemin yüzeyinden etkitilmiştir. Oluşan maksimum yer değiştirmeler yüzeyde oluşmuş, fakat aynı koşullarda olup depremin 30 m aşağıdan etkitildiği analizlere oranla düşük ivmeli depremler sonucunda zeminde ve deprem sonrası boruda yaklaşık olarak aynı yer değiştirmeler elde edilmiştir. Fakat deprem kaydı büyüdükçe yüzeyden etkitilen depremde zeminde oluşan maksimum yer değiştirmeler ve deprem sonrası boruda oluşan yerdeğiştirmeler 2.grup analiz sonuçlarına göre azalmıştır. 4. Grup analizlerde

ise aynı birinci grup analizlerindeki sınır koşulları geçerli olup sadece deprem zemin yüzeyinden etkitilmiştir. Bu durumda oluşan maksimum ivmeler zemin yüzeyinde meydana gelmiş ve 1. Grup analizlere göre zemin uzunluğu 50 m ve altında seçilen zemin aralıklarında zeminde ve borudaki yer değiştirmelerde daha fazla ötelenmeler elde edilmiştir. Fakat depremin ivmesinin artırılmasıyla yerdeğiştirmeler artmış ayrıca 1.grup analizlere göre daha fazla yer değiştirmeler hesaplanmıştır. 150 m ve 250 m olarak alınan zemin uzunluklarında zemin yüzeyden etkitildiğinde 1. Gruptaki değerler göre oldukça düşük olduğu görülmüştür. Son olarak 5. Grup analizlerde ise zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetlenmiş, zeminin soldaki sınırında dalga sönümleyici katsayılar kullanılmamış fakat sağ tarafa ise dalga sönümleyici katsayılar kullanılmıştır ($c_1=1.00$, $c_2=0.25$). Deprem ise 30 m aşağıdan etkitilmiştir. Sonuç olarak optimum mesafe olan 50 m’de 0.06g maksimum ivmeye sahip deprem kaydı etkitildiği 1. Gruptaki aynı koşullardaki analize göre deprem sonrasında borudaki yerdeğiştirme her ne kadar bir miktar fazla olsa büyük farklar oluşmamıştır (4.42 cm). Her iki tarafında deprem dalgaları için sönümleyici katsayısı kullanılan 2. Grup analizlere göre ise zemindeki maksimum deplasman ve deprem sonrası boruda oluşan yer değiştirmelere göre daha düşük değerler elde edilmiştir.

Sonuç olarak; aynı kesit için yapılan 40 adet farklı analizin sonucunda görülmüştür ki yapılan analizlerle farklı koşulları analiz edip, karşılaştırmak plaxis sonlu elemanı yöntemi programı ile mümkündür. Sonunda elde edilen verilerden de yararlanılarak bir takım karşılaştırmalar yapılabilmektedir. Bunlar sayesinde boruda ve farklı zeminlerde, farklı koşullarda dinamik yük etkisi altında yapacağı davranışları önceden tahmin edebilmek ve çözümüne yönelik tahminler yapılabilmektedir.

Çizelge 5.20 : Kesit-3 Tıgçılar'dan alınan kesitte sınır koşulları, depremin etki yeri, seçilen zemin uzunluğu, maksimum ivmeye göre artırılmış deprem kayıtları değiştirilerek yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar

Grup	Sınır Koşulları	Depremin Etki Yeri	Seçilen Zemin Uzunluğu	Maximum İvme	Zemindeki Maximum Yer Değiştirme (cm)	Boruda deprem sonrası Yer Değiştirme (cm)
Grup -1	Zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, Deprem dalgaları için sınırlarda sönümleyici yok	30 m Derinlikten	50 m	0.06 g	27.59	2.23
			150 m	0.06g	113.00	87.59
			250 m	0.06g	113.00	103.00
			10 m	0.06g	27.59	0.15
			50 m	0.10g	40.86	2.46
			50 m	0.20g	81.78	4.78
			50 m	0.30g	123.00	7.65
			50 m	0.40g	163.00	10.97
Grup -2	Zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, Zeminin yanlarında deprem dalgaları için sönümleme katsayısı kullanılmıştır. ($c_1=1.00$, $c_2=0.25$)	30 m Derinlikten	50 m	0.06g	37.43	34.52
			150 m	0.06g	33.96	29.48
			250 m	0.06g	34.53	24.74
			10 m	0.06g	57.27	54.34
			50 m	0.10g	55.66	51.09
			50 m	0.20g	117.00	102.00
			50 m	0.30g	189.00	153.00
			50 m	0.40g	272.00	202.00
Grup -3	Zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, Zeminin yanlarında deprem dalgaları için sönümleme katsayısı kullanılmıştır. ($c_1=1.00$, $c_2=0.25$)	Zemin Yüzeyinden	50 m	0.06g	31.57	17.17
			150 m	0.06g	33.97	29.48
			250 m	0.06g	34.52	24.73
			10 m	0.06g	57.26	54.32
			50 m	0.10g	49.15	21.74
			50 m	0.20g	107.00	41.88
			50 m	0.30g	173.00	58.18
			50 m	0.40g	241.00	72.22

	Sınır Koşulları	Deprem Etki Yeri	Seçilen Zemin Uzunluğu	Maximum İvme	Zemindeki Maximum Yer Değiştirme	Boruda deprem sonrası Yer Değiştirme
Grup -4	Zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, Deprem dalgaları için sınırlarda sönümleyici yok	Zemin Yüzeyinden	50 m	0.06g	27.59	18.74
			150 m	0.06g	27.59	12.16
			250 m	0.06g	29.22	15.94
			10 m	0.06g	33.78	19.18
			50 m	0.10g	40.86	23.67
			50 m	0.20g	81.78	28.10
			50 m	0.30g	123.00	45.56
			50 m	0.40g	163.00	74.10
Grup -5	Zemin yanlardan yatay, alttan ise yatay ve düşey yüklere göre mesnetli, Zeminin Soldaki Sınırı Serbest bırakılmış, sağa ise deprem dalgaları için sönümleme katsayısı kullanılmıştır. ($c_1=1.00$, $c_2=0.25$)	30 m Derinlikten	50 m	0.06g	27.59	4.04
			150 m	0.06g	28.70	23.96
			250 m	0.06g	28.96	20.09
			10 m	0.06g	27.59	10.21
			50 m	0.10g	40.86	4.67
			50 m	0.20g	81.78	31.28
			50 m	0.30g	123.00	55.65
			50 m	0.40g	163.00	73.55

5.5 Sonuç

Yapılan modellemelerin sonucunda plaxis sonlu elemanlar yöntemi programıyla farklı zeminlere yerleştirilen farklı tip boruların aynı dinamik yük altında analizleri yapılmıştır. Daha sonra ise bunlara ilave olarak alınan deprem kaydı büyütülerek daha büyük deprem kayıtları elde edilmiş. Daha önce analizi yapılan 3 nolu kesitte farklı sınır koşullarında farklı noktalardan farklı büyüklükte deprem kayıtları etkilmiştir. Bütün bu yapılan analizlerde göstermiştir ki yapılan analizlerde elde edilen sonuçlarla birçok bulguya erişmek mümkündür. Sağlam ve zayıf zeminlerdeki deprem davranışlarının oldukça farklı olduğu aynı şekilde, boruların rijitliğinin boru davranışında çok önemli faktör olduğu görülmüştür. Ayrıca sınır koşulları değiştirilerek yapılan analizlerin sonucunda da depremin etki yeri, sınırlarda kullanılan yutucu parametreler ve seçilen zemin aralıklarının önemli bir rol oynadığı gözlenmiştir. Ayrıca depremin ivmesinin büyümesi tüm zeminlerde borular oluşan kalıcı deplasmanların oldukça artmasına rol açmıştır.

Sonuç olarak; plaxis programıyla farklı zeminlere yerleştirilen altyapı elemanların farklı koşullarda dinamik yükler altında davranışları tahmin edilebilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada altyapı kavramı ve altyapının en önemli iletim aracı olan doğalgaz, su ve kanalizasyon boru hatları gibi günlük hayatın vazgeçilmez parçaları olduğu anlatılmıştır. Boru hatlarının tasarımında zemin özellikleri ve boru malzemesinin rijit veya esnekliği oldukça önemli olduğu görülmüştür. Farklı borulardaki yük aktarımı ve boruların yük altındaki davranışları değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır. Yeraltı yapılarında zemin-yapı etkileşimi yapı rijitliğine ve boyutlarına, yapının etrafının çevreleyen toprak dolgu malzemesinin rijitliğine ve sonrasında uygulanan statik ve dinamik yüklere bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Sonuç olarak; inşaat sonrasında yeraltındaki borunun ne miktarda deformasyona maruz kalabileceğini hesaplayabilmek için tüm etkenlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bütün bunlar göstermiştir ki depremde her ne kadar gömülü borular gibi yeraltı yapılarının, üst yapı elemanlarından daha dayanıklı olduğu düşünülse de yakın zamandaki büyük depremlerde, gömülü borularda büyük hasarlar olduğu bilinmektedir. Yeraltı boru hatlarının, özellikle zemin koşullarında keskin değişimlerin görüldüğü yerlerde, sınırlama olasılığı olan zayıf zeminlerde, boru hatlarının diğer yapılarla bağlandığı yerlerde, büyük yer hareketlerinin meydana geldiği fay zonlarında, zemin kayma düzlemleri veya geçiş bölgeleri gibi borunun yapıya girdiği yerlerde büyük hasar gördüğü gözlenmektedir. Yeraltı yapılarının deprem sırasındaki davranışını öngörmek için yapılan çalışmalarda, üst yapıların sismik davranışına benzer yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, gömülü boruların sismik davranışı diğer üst yapılardan farklıdır. Üst yapı gibi projelendirilen, boru hattını çevreleyen zemin koşullarını ve boru malzeme niteliklerini dikkate alınarak projelendirme yapmak gerekmektedir.

Deprem bölgelerinde inşa edilecek yer altındaki boruların projelendirilmesinde, depremde oluşacakları öngörmek ve gerektiği takdirde önlem almak için zemin problemleri için geliştirilen sonlu elemanlar yazılımlarıyla analizler yapmak faydalı olmaktadır. Seçilen deprem kaydı vasıtasıyla zemin koşulları ve boru hattının niteliklerini dikkate alan iki ve üç

boyutlu analizler yapabilen yazılımlarla gömülü boruların sismik davranışı modellenenilmektedir. Bu tezde, Dilovası Organize Sanayi Bölgesi içinde bulunduğu kabul edilen farklı iki zemine aynı çaptaki üç farklı boru malzemesi yerleştirilmiş boru hattına 1999 Marmara Depremindeki artçı bir deprem kaydı etkililerek boru hattının ve zeminlerin dinamik davranışı incelenmiştir.

Sonlu elemanlar analizi sonucunda, dinamik yüklemelerin ardından farklı zeminlerde borular birbirinden farklı davranışlar sergilediği bulunmuştur. Zayıf zeminlerde (SK-3) dinamik yükleme sonucunda daha fazla ötelenme ve oturma gözlenmiştir. Aynı şekilde sağlam zeminlerde (SK-2)'de dinamik yükleme sonrası depreme bağlı olarak daha fazla eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti borularda oluştuğu belirlenmiştir. Dinamik yükleme sonucunda borularda meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmelerle, borularda meydana gelebilecek hasarlar hakkında fikirler edinilebilmektedir. Ayrıca farklı malzeme özelliklerine sahip borular deprem sonrasında farklı yer değiştirmeler yaptığı gözlenmiştir. Esnek borularda yani HDPE ve CTP borularda deprem sonucu yer değiştirmeler daha fazla çıkmış ve borulara etkiyen eksenel kuvvet, kayma kuvveti ve eğilme momenti değerleri beton boruya göre daha az olmuştur. Buradan esnek boruların zeminle etkileşimin daha iyi olduğu ve gelen yükleri zemine aktarabildiği kanısı oluşmuştur. Ayrıca her bir borunun kendine ait malzeme özellikleri düşünülerek borularda oluşabilecek tesir kuvvetlerine boruların dayanım limitlerine göre borularda meydana gelebilecek hasar tahminleri yapılabilecektir.

Sonuç olarak; deprem bölgelerinde inşa edilecek gömülü boruların projelendirilmesinde, depremde hasar oluşup oluşmayacağını öngörmek ve gerektiği takdirde önlem almak için zemin problemleri için geliştirilen sonlu elemanlar yazılımlarıyla analizler yapmak faydalı olmaktadır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda, söz konusu zayıf zemin koşullarında imal edilen ve rijit malzemeden oluşan gömülü borunun büyük miktarda yer değiştirme yapacağı ve büyük orandaki yer değiştirmeler sebebiyle boru hattı bağlantı noktalarında ayrılma, oturmaya bağlı olarak kırılma ve çatlama olması beklenebileceği belirlenmiştir.

Analiz sonuçları incelendiğinde deprem bölgelerinde depreme dayanıklı boru hatları projelendirilirken sağlam zeminler tercih edilmelidir. Ayrıca deprem bölgelerinde projelendirme yapılırken rijit boruların yerine esnek boruların daha fazla tercih edilebilmesi gerektiği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ansal, A., Erken, A., Yildirim, H.**, 1984. "Zeminlerin Deprem Yükleri Altında Davranışlarının İncelenmesi", *Türkiye'de İnşaat Mühendisliği Alanındaki Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, Cilt 2, sf.75-86.
- [2] **Ansal, A ve Erken, A.**, 1987. "Depremlerde Yerel Zemin Şartlarının Önemi", *Türkiye İnşaat Mühendisliği 9.Teknik Kongresi*, Cilt 1, sf.165-182.
- [3] **Erken, A., Yildirim, H., Sancar, T. Kiliç, C. ve Ansal, A.**, 1995. "Erzincan Ekisi'nda Siltli Zeminlerin Dinamik Davranışı", *3.Ulusal Deprem Mühendisliği Konf.*, IMO, sf.607-614.
- [4] **Ansal A, Tünük G.**, 2007. "Zeminin Doğrusal Olmayan Davranışına Vaka Analizleri İle Bakış", *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.
- [5] **Erken, A., Lav, M.A., Uysal, H., Taylan, Z.N.**, 2007. "Sıvılaşma ve Taşıma Gücü Kaybı Sonucu Oluşan Oturmaları Kapsayan Vaka Analizi", *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.
- [6] **Newmark, N.M., Hall, W.J.**, 1975. "Pipeline design to resist large fault displacement" *Proc. US Natl. Conf. Earthquake Eng. Res. Inst.*, pp. 2416–2425.
- [7] **Datta, T.K.**, 1999. "Seismic response of buried pipeline: a state-of-the-art review", *Nuclear Engineering and Design Elsevier*, pp. 271-284.
- [8] **Ogawa, Y., Koike T.**, 2001. "Structural design of buried pipelines for severe earthquakes". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.21, pp 199-209.
- [9] **Toprak, S., Yoshizaki K.**, 2003. "Boru Hatlarına Deprem Yüklerinin Etkisi", *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 23-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- [10] **Yüzügülü, Ç., Birgören G.**, 2003. "Depremlerde Altyapı Davranışı ve Oluşan Hasarlar", *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 23-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- [11] **Sağlam, A., Balkaya, M.**, 2003. "Gömülü Boru Davranışları", *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- [12] **Jamieason, G., Milheizler J.**, 1997. "The Use of GIS in Loss Estimation and Risk Assessment", pp. 466.
- [13] **Vaslestad, J.**, 1991. "Load Reduction on Buried Rigid Pipes", *10th European Conference on SMFE*, Florence, pp 771-774.
- [14] **Spangler, M.G.**, 1948. "Underground Conduit An appraisal of Modern Research", *ASCE*, 113, 316-374.
- [15] **Moser, A.P.**, 1990. "Buried Pipe Design", *Mc Graw Hill*, New York.
- [16] **Balkaya, N.** 2001. "Çevre Mühendisleri için Yapı Teknolojisi", Samsun.

- [17] **Babbitt, H.E., Baumann, E.B.**, 1958. "Sewerage and Sewage Treatment", John Wilwy & Sons Inc., New York.
- [18] **Linsley, R.K., Franzini J.B.**, 1955. "Elements of Hydraulic Engineering", Mc-Graw Hill Book Comp. Inc., New York.
- [19] **Firat Pen**, 2008. Korige Boru Teknik Şartnamesi.
- [20] <http://www.iston.com.tr/ndCMS/page3.aspx>.12.05.2009.
- [21] **Muslu, Y.**, 1998. "Çözümlü Problemlerle Su Temini ve Çevre Sağlığı", Su Vakfı, İstanbul.
- [22] **Süperlit**, 2008. CTP Boru Teknik Şartnamesi.
- [23] **FEMA**, 1999. "Earthquake Loss Estimation Methodology", HAZUS 99 Technical Manual, National Institute of Building Science, Washington, D.C..
- [24] **C.P. Chemical Company L.P.**, 2003. The performance pipe engineering manual.
- [25] **Moser, A.P.**, 2001. "Buried Pipe Design", McGraw-Hill, New York, 2nd Edition.
- [26] **Spangler, M.G.** 1966. "Soil Engineering", International Textbook Company, Scranton.
- [27] <http://www.astm.org/Standards/D2487.htm>.10.04.2009.
- [28] **Balkaya N., Balkaya M.**, 2005. "Atıksu Arıtma Tesislerinde Yapı Malzemeleri ve Ekipmanlar"
- [29] <http://www.attogroup.com/altkat-1-YY-S-Nedir.html>.15.03.2009.
- [30] <http://www.attogroup.com/altkat-7-Boru-yenileme-nedir.html>.15.03.2009.
- [31] <http://www.resmi-gazete.org/sayi/3848/alt-yapilar-icin-afet-yonetmeli.html>.22.03.2009.
- [32] **Şendir S.**, 2005. "Zemine Gömülü Boruların Sismik Etkiler Altındaki Davranışları" Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [33] **Japan Society of Civil Engineers**, 2000. Earthquake Resistant Design Codes in Japan.
- [34] **Hamada, M.**, 2002. Revision of Seismic Design Guidelines after Hyokoken Nanbu Earthquake , *Journal of the Society of Civil Engineers*, Vol. **87**, pp. 2-4.
- [35] **Bull, J.W.**, 1994. "Soil Structure Interaction", *Numerical Analyses and Modelling*, Chapman&Hall, London.
- [36] **Uslu, M.**, 1979. "Prefabrike Kanalizasyon Kanalları ve Boru Hatlarının Döşenmesine Ait Talimatlar", Alman Normları DIN 4033, İller Bankası, Ankara.
- [37] **Bulson, P.S.**,1985. "Buried structures: static and dynamic strength" London : Chapman and Hall.
- [38] **Ren-peng, C., Yun-min, C., Dao-shen, L.**, 2000. "Analysis Of Vertical Pressure On Buried Pipeline With Case Study". *Journal of Zhejiang University Science*, 1(4), pp 414–420.
- [39] **Masada, T.** 2000. "Modified Iowa Formula For Vertical Deflection Of Buried Flexible Pipe". *Journal of Transportation Engineering*, **126** (5), 440–446.
- [40] **Unutmaz B., Çetin K.Ö, Gökyay M.C.**, 2008. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya.

- [41] **Miura, K.**, 2003. "Dynamic soil-structure interaction", International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Lecture Note.
- [42] **Sarıkaya, H.Z. ve Koyuncu, I.**, 1999. "Evaluation of Kocaeli Earthquake on Water and Wasterwater Systems", *ITU-IAHS International Conference on the Earthquake*, İstanbul.
- [43] **Arıman T., Muleski, G.E.**, 1981. "A Review Of The Response Of Buried Pipelines Under Seismic Excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, Vol.1, 133-151.
- [44] **Toprak, S.** 1998. "Earthquake Effects on Buried Lifeline Systems". Ph.D.Thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- [45] **O'Rourke, T.D., Toprak, S., Jeon, S.S.** 1998. "Factors Affexting Water Supply Damage Caused by the Northridge Earthquake", *Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, WA, June, pp. 1-12.
- [46] **Datta, T.K., Mashalyi E.A.**, 1986. "Pipeline Response To Random Ground Motion By Discrete Model", *Earthquake Engineering an Structural Dynamics*, 14, No.4 559-572.
- [47] **Mohri, Y., Yasanuka, M. Tani, S.** 1995. "Damage to Buried Pipeline Due to Liquefaction Induced Performance At The Ground By The Hokkaido-Oki Earthquake In 1993", *Earthquake Geotechnical Engineering*, ed. K. Ishihara, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.31-36.
- [48] **O'rourke, M. J.**, 2008. "Wave Propagation Effects on Buried Pipe at Treatment Plants" *Earthquake Spectra* Vol.24, Issue 3, pp. 725-749
- [49] **O'rourke, M. J.**, 1995. "Seismic behaviour of buried pipeline components: a state-of-the-art review", *10th European Conference on Earthquake Engineering*, ed. Duma, Balkema, Rotterdam.
- [50] **Eidinger, J.** 1998. "Lifelines, water distribution system in the Loma Prieta earthquake, Performance of the built environment-lifelines", *US Geological Survey Professional Paper* 1552-A, ed. Shiff, pp.A63-A83
- [51] **Abdoun T. , O'Rourke, M.J. , Gadicherla V.**, 2002. "Centrifuge Modelling of Buried Pipelines". pp. 757-768.
- [52] **G&E Engineering Systems Inc.**, 2001. "Seismic fragility formulations for water systems", Web site report, pp. 27-59.
- [53] **Toprak, S.**, 2004. "Gömülü boru sistemlerinde deprem zararlarının tahmini", *Altıncı Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, sf. 823-832.
- [54] **ASCE-25 Task Committee on Earthquake Safety Issues for Gas Systems**, 2002. "Improving Natural Gas Safety in Earthquakes", *California Seismic Safety Commission*, SSC-02-03, State of California, Gray Davis Governor.
- [55] **Seed H.B., Peacock W.H.**, 1971. "Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.97, pp. 1099-1119.

- [56] **Finn W.D.L., Emery J.J., Gupta Y.P.**, 1971. "Liquefaction of Large Samples of Saturated Sand on a Shaking Table", *Proceedings of the 1st Canadian Conference on Earthquake Engineering*, pp. 97-110.
- [57] **Ishihara, K., Li, S.**, 1972. "Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsional Shear Test, Soils and Foundations", *ICSMFE*, Vol. 1.
- [58] **Tsukamoto, Y., Ishihara, K. and Nakazawa, H.**, 2001. "Soil Properties of the Deposits in Adapazari from Laboratory Tests", *XV ICSMGE TC4 Satellite Conference*, Istanbul, pp. 275-280.
- [59] **Erken, A., Ansal, A.M.**, 1994. "Liquefaction characteristics of undisturbed sands, performance of ground and soil structure during earthquakes", *13th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp 165-175.
- [60] **Erken A., Kaya Z., Ülker M.B.C.**, 2004. "Liquefaction in Adapazari during 1999 Kocaeli Earthquake", *6th International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University*, Istanbul, Turkey, 6-8 October, 1525-1534.
- [61] **Erken A., Gülerce Ü., Balkaya M., Hatipoğlu M., Dündar S., Kaya Z.**, 2004. "An Example for the Effects of Local Soil Conditions on Structural Behaviour in Adapazari", *6th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Bogazici University, Istanbul, Turkey, 6-8 October, 1514-1523.
- [62] **Damgaard, J.S.**, 2004. "Soil liquefaction around and its implications for pipelines" LIMAS, End-User Workshop to Present State-of-the-Art Knowledge, 5-6 April, 2004, Pau, France.
- [63] **Toprak S., Yoshizaki K.**, 2003. "Boru Hatlarına Deprem Yüklerinin Etkisi", *5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 23-30 Mayıs, İstanbul.
- [64] **Arpat E.**, 2005. "Kocaeli 1999 Depreminde, Ana Fay Kırığının Dışında Meydana Gelmiş Olan Deformasyonların Nedenleri", *Deprem Sempozyumu*, 23-25 Mart, Kocaeli.
- [65] **Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., and Emoto, K.**, 1986. "Study on Liquefaction-Induced Ground Displacement," *Research Committee, Association for the Development of Earthquake Prediction*, Tokyo, Japan, Nov. 1986, pp. 20-35.
- [66] **PAHO**, 1998. "Natural disaster mitigation in drinking water and sewerage systems, Guidelines for Vulnerability Analyses", Washington, D.C., pp. 59-64.
- [67] **North America-Japan Workshop (on the Geotechnical Aspects of the Kobe, Loma Prieta and Northridge Earthquakes)**, 1997. "Lifelines, Report to National Science Foundation", *Air Force Office of Scientific Research & Japanese Geotechnical Society*, Osaka, Japan, pp. 54-65.
- [68] **Özmen B.**, 2000. "17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi'nin Hasar Durumu. (Rakamsal Verilerle)" *TDV/DR 010-53*, Türkiye Deprem Vakfı, Ankara.
- [69] **Kawashima K., Shoji G.**, 2001. "Damage of transportation facility in the 1999 Kocaeli and Duzce, Turkey earthquakes and the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake", *Proceedings of the Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects*, 439-462.

[70] **Tang, A.K.**, 2000. "İzmit (Kocaeli), Turkey, Earthquake of August 17, 1999 Lifeline Performance", *ASCE Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering Monograph* No.17, p.190, ASCE, Virginia.

[71] **Yasuda, S., Sutani, Y., Suzuki, N. and Isoyama, R.**, 2002. "Countermeasures of buried steel pipes against surface fault rupture", *US-Japan Seminar on Seismic Disaster Mitigation Urban Area by Geotechnical Engineering*, Alaska, June 26th -27th.

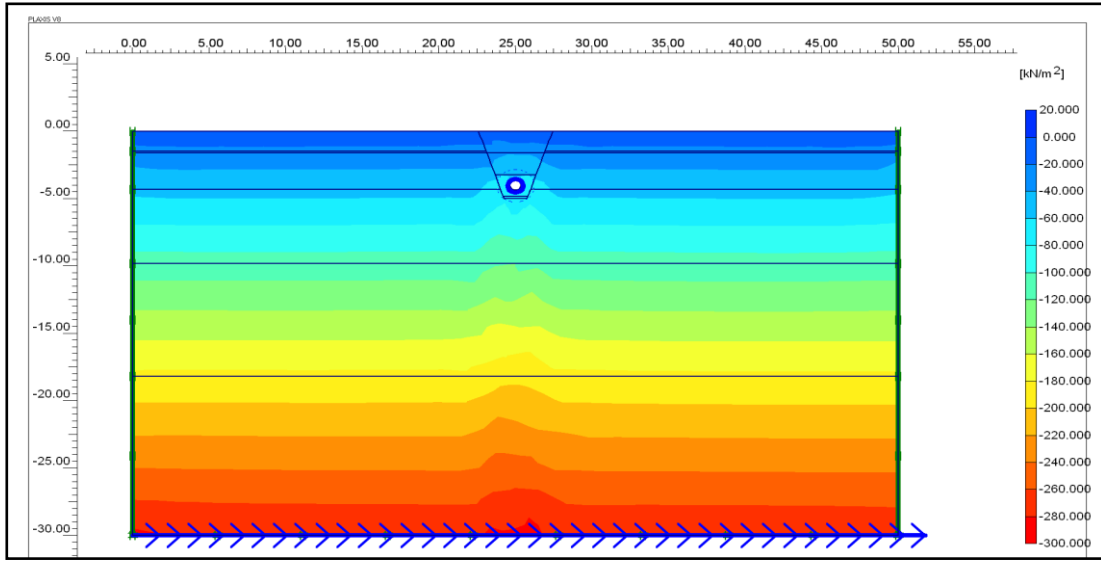
[72] <http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/turkey8-17-9/ScawPrelim.pdf>. 16.04.2009.

[73] **Birimkgreve, R.B.J.**, 2002. "Plaxis Version 8 Dynamic Manual", Delfth University of Technology & Plaxis B.V., The Netherlands.

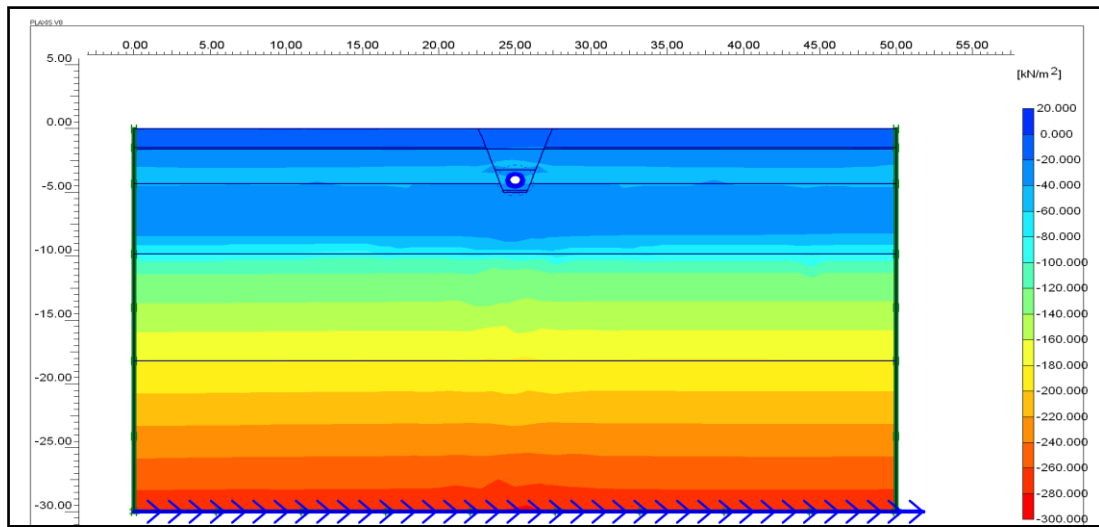
[74] **Hughes, T.J.R.**, 1987. "The Finite Element Method, linear static and dynamic analyses, Prentice Hall Int."

[75] **Lysmer, J., Kuhlmeyer, R.L.**, 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media. *ASCE J. Of the Eng. Mech. Division* pp. 859- 877.

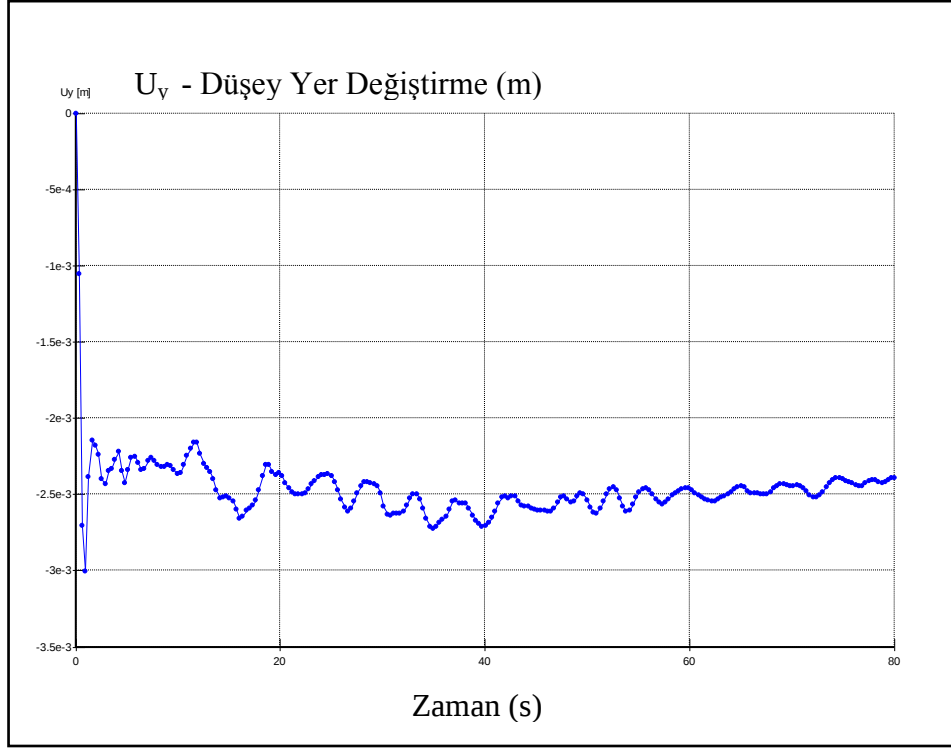
EKLER



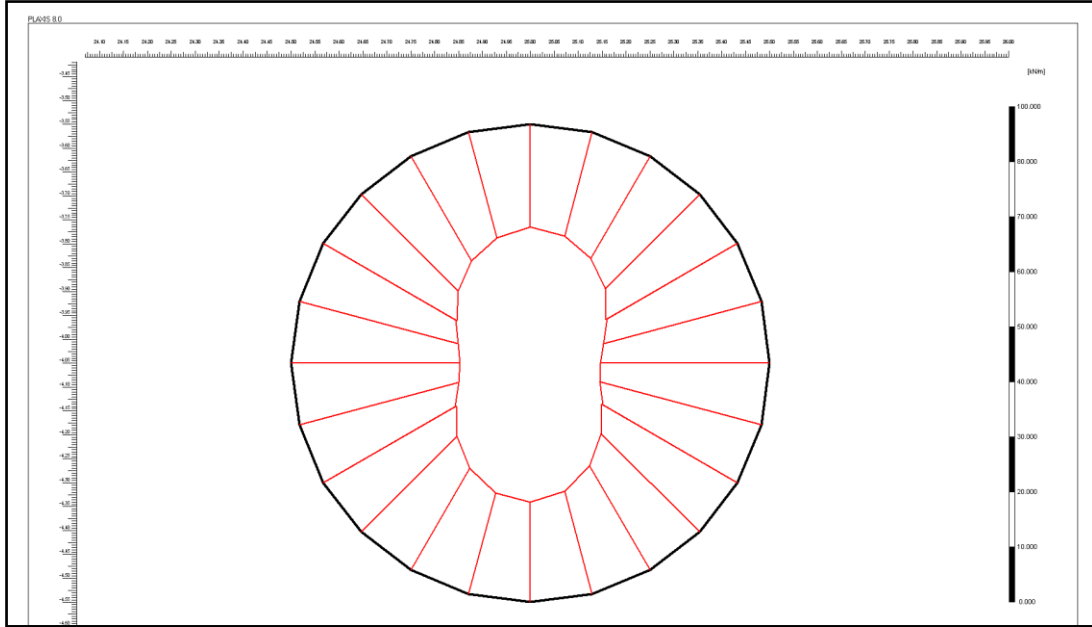
Şekil A.1 : Zeminde oluşan düşey efektif gerilmeler
(Maks. düşey efektif gerilme : $287,25 \text{ kN/m}^2$)



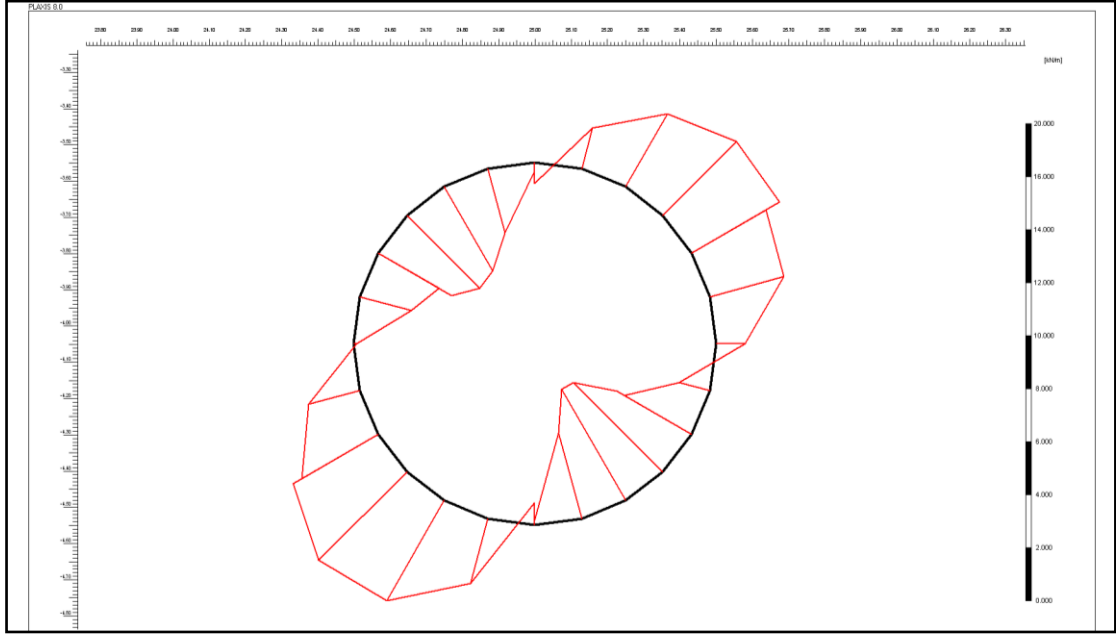
Şekil A.2 : Zeminde oluşan yatay efektif gerilmeler
(Maks. yatay efektif gerilme : $287,02 \text{ kN/m}^2$)



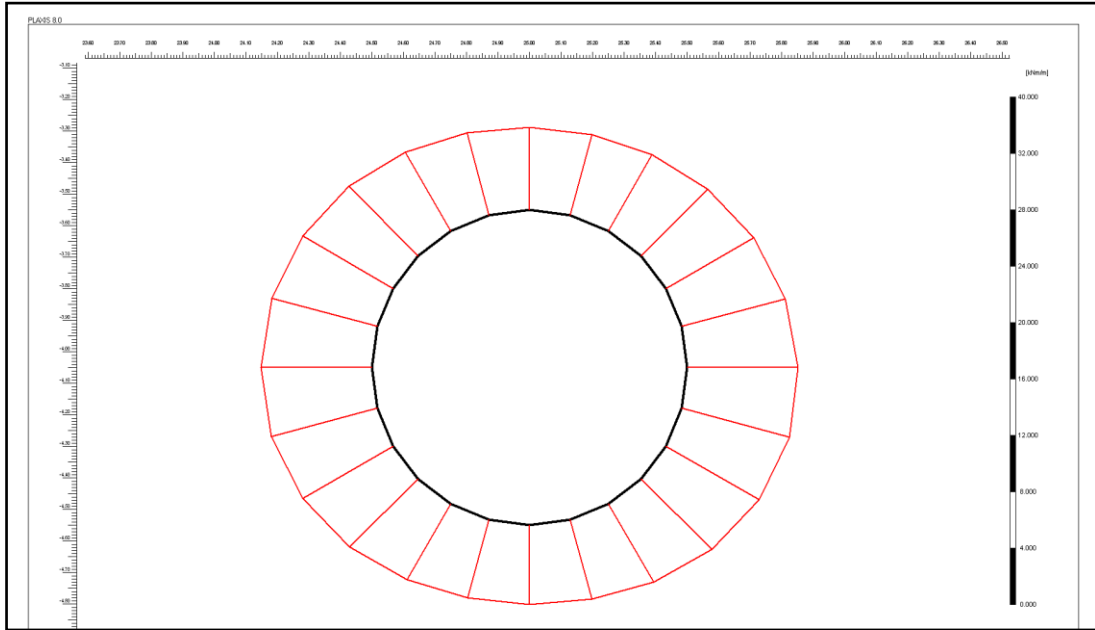
Şekil A.3 : Boruda Meydana Gelen Düşey Yer değıştirme hareketi (SK-1)



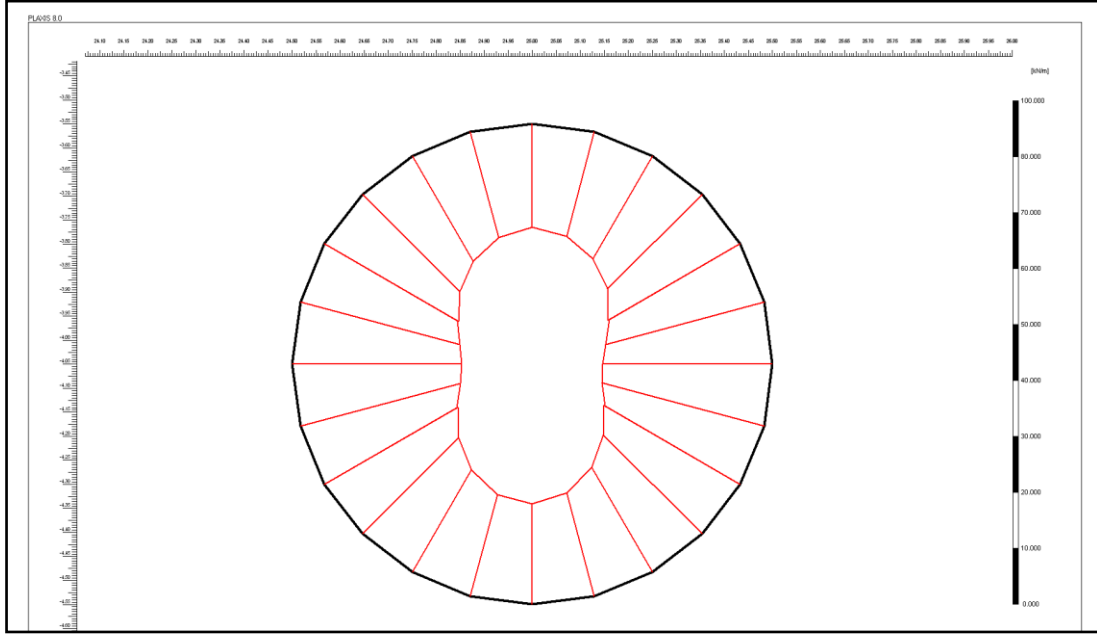
Şekil A.4 : SK-1 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eksenel kuvvetler (30.56 kN/m)



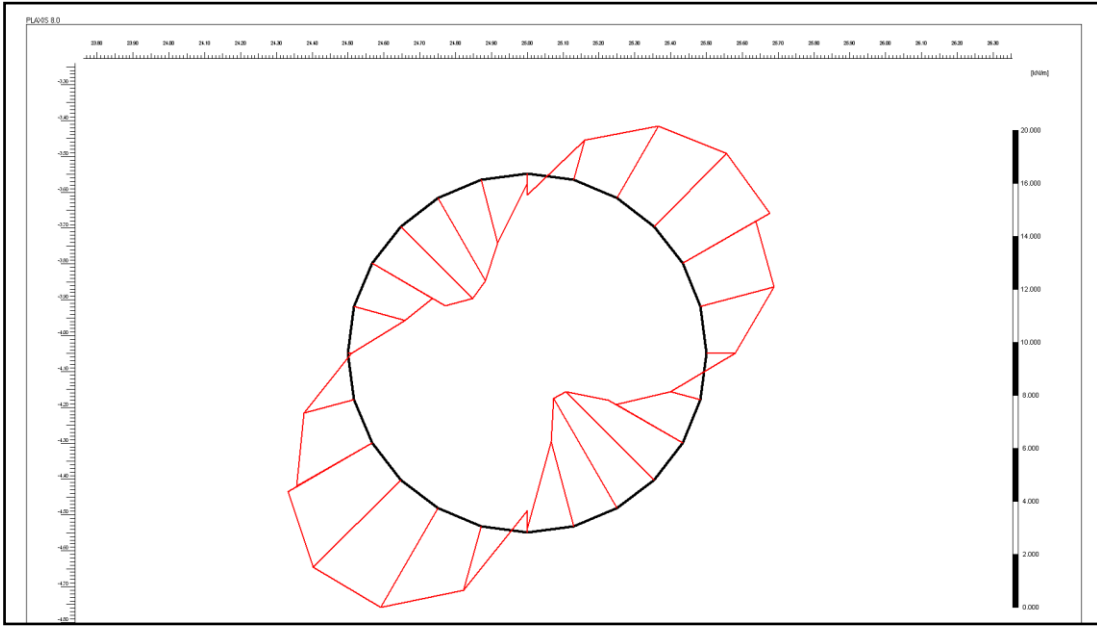
Şekil A.5 : SK-1 kesitinde yer alan beton boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.82 kN/m)



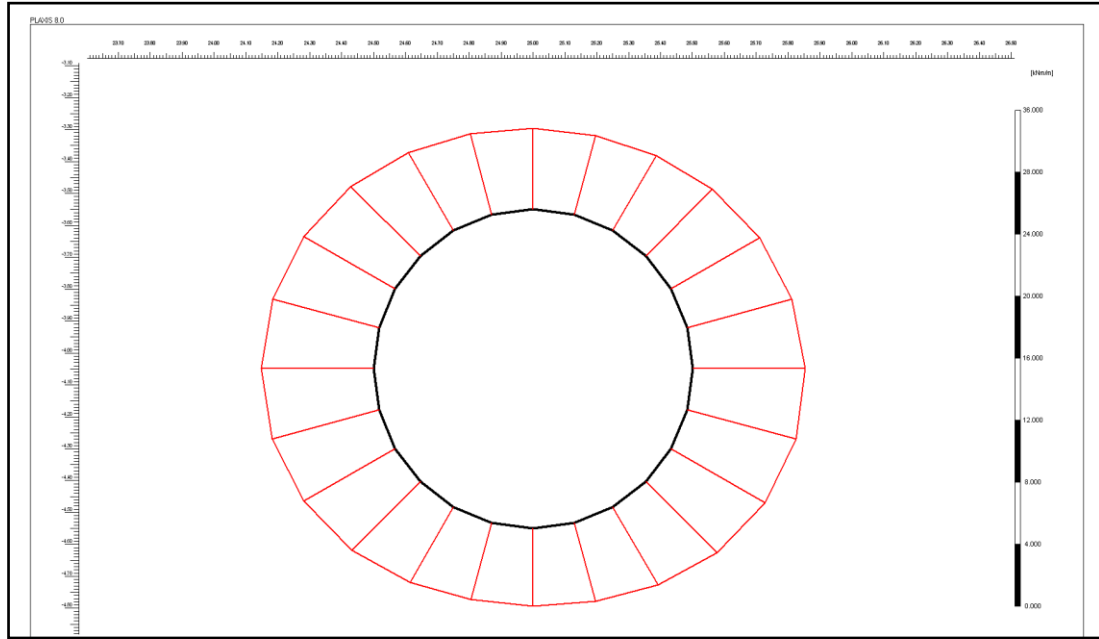
Şekil A.6 : SK-1 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eğilme momentleri (7.92 kNm/m)



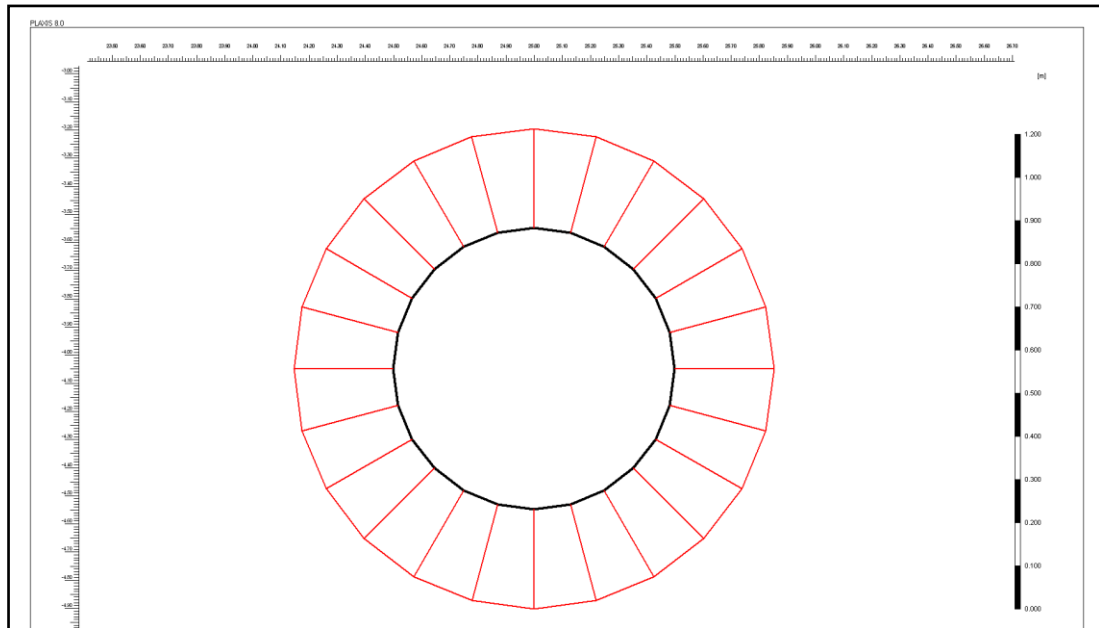
Şekil A.7 : SK-1 kesitinde CTP boruda oluşan aksenal kuvvetler (30.45 kN/m)



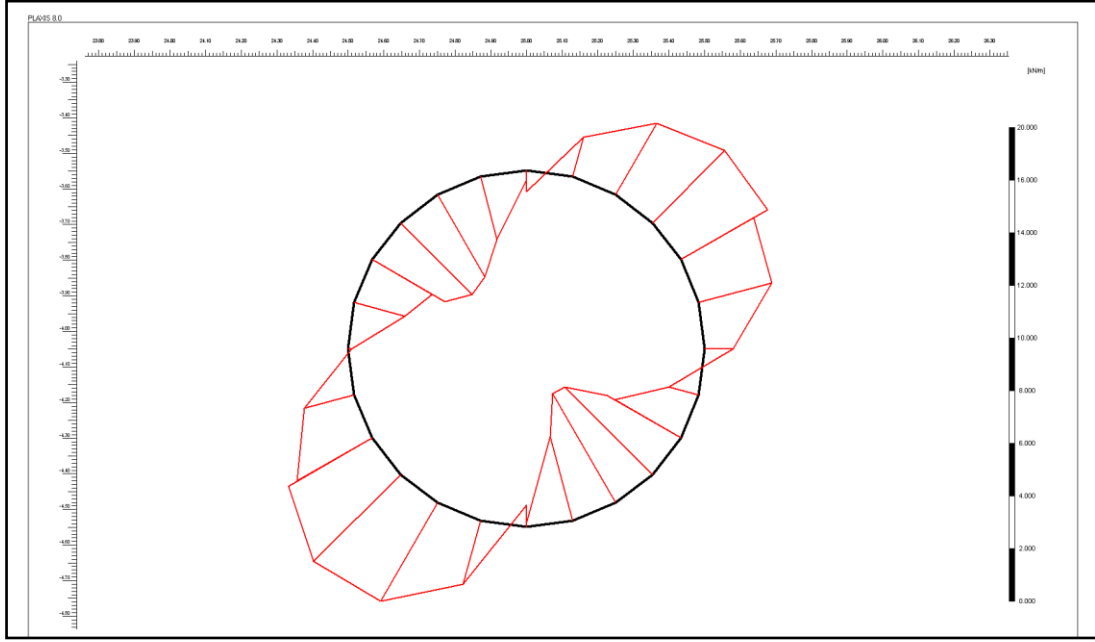
Şekil A.8 : SK-1 kesitinde CTP boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.79 kN/m)



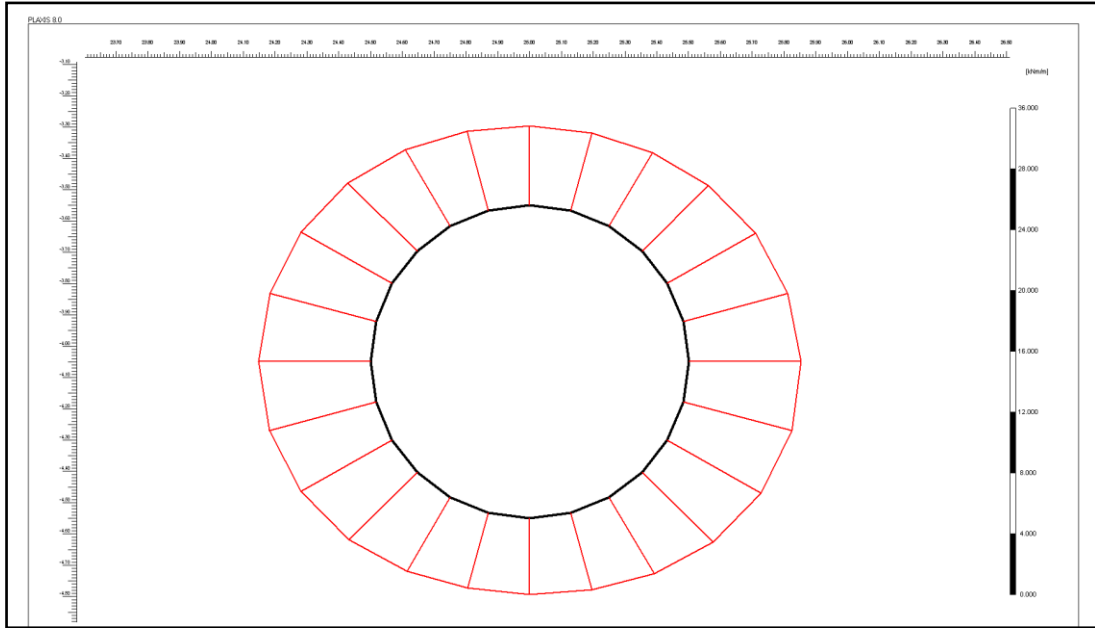
Şekil A.9 : SK-1 Kesitinde CTP boruda oluşan eğilme momentleri (7.31 kN.m/m)



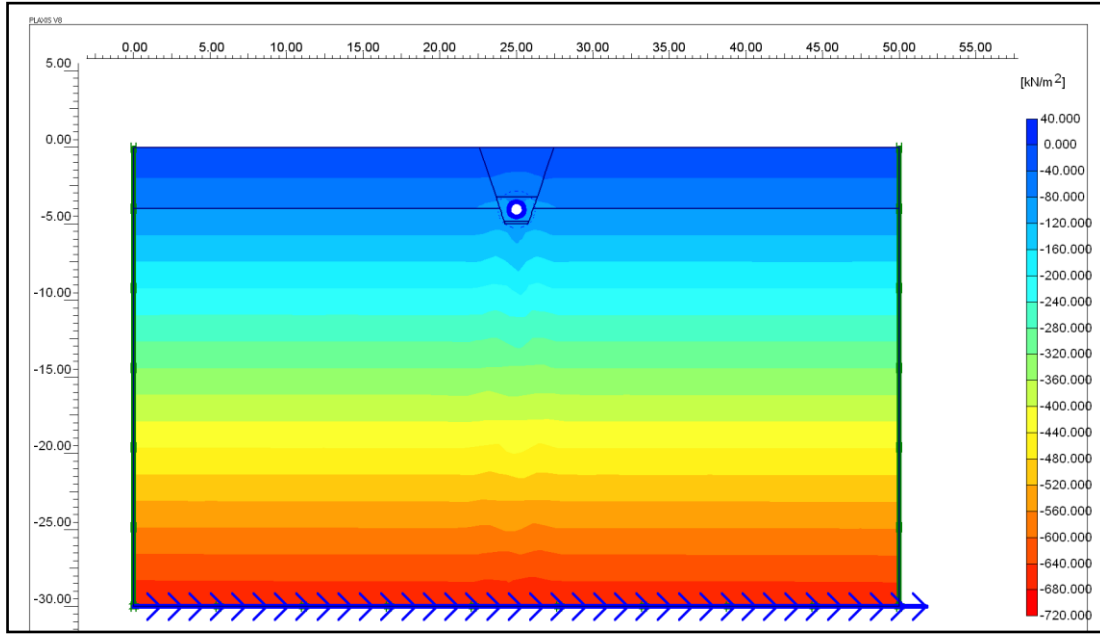
Şekil A.10 : SK-1 kesitinde HDPE boruda oluşan aksenal kuvvetler (19.59 kN/m)



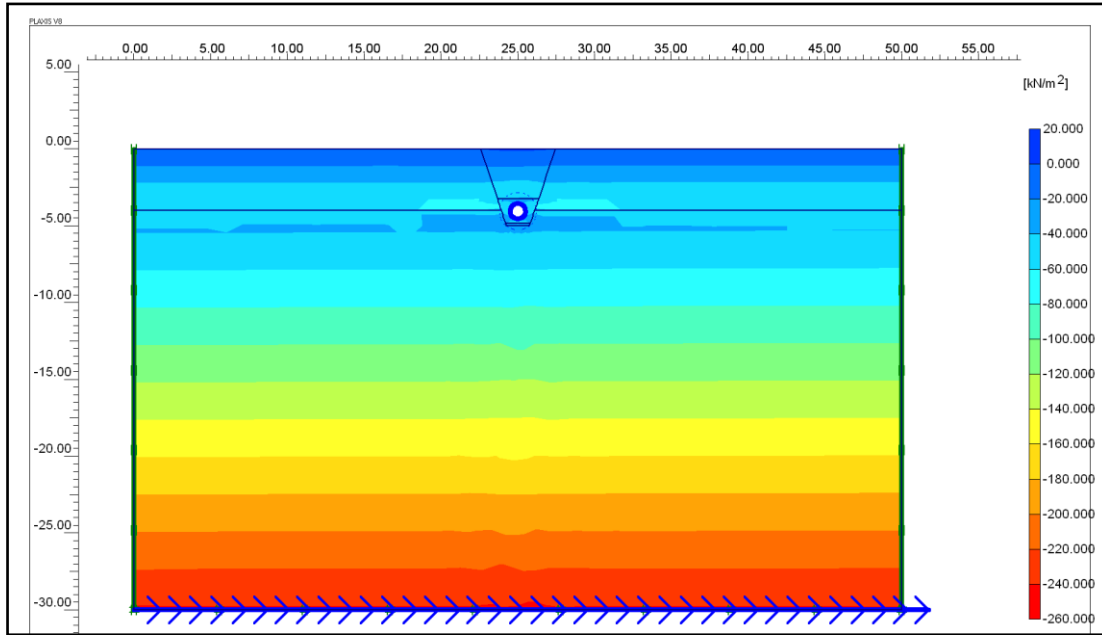
Şekil A.11 : SK-1 kesitinde HDPE boruda oluşan kayma kuvvetleri (2.34 kN/m)



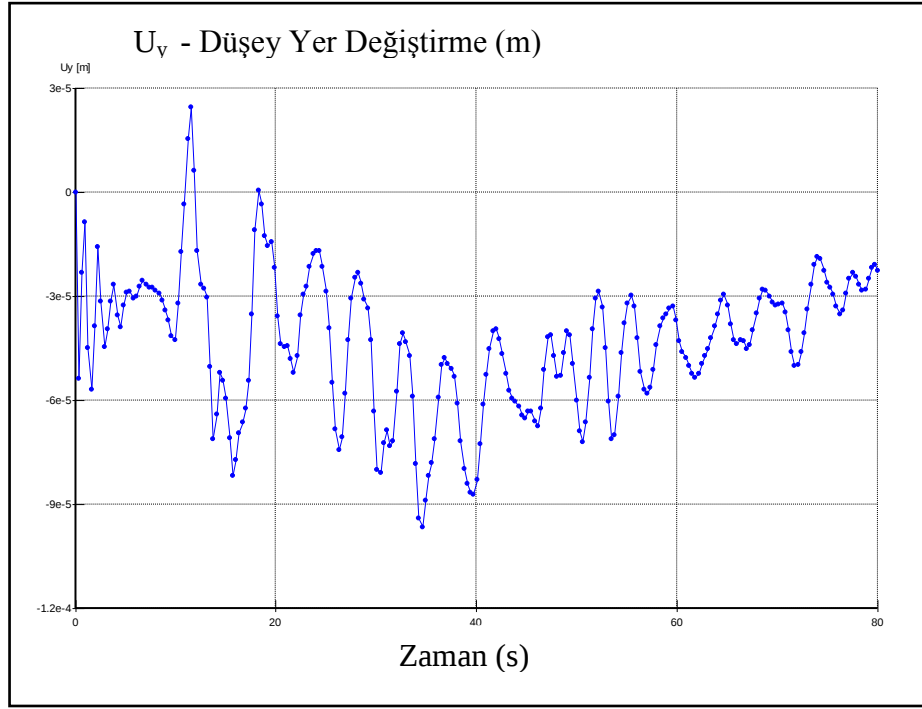
Şekil A.12 : SK-1 kesitinde HDPE boruda oluşan eğilme momentleri (4.34 kNm/m)



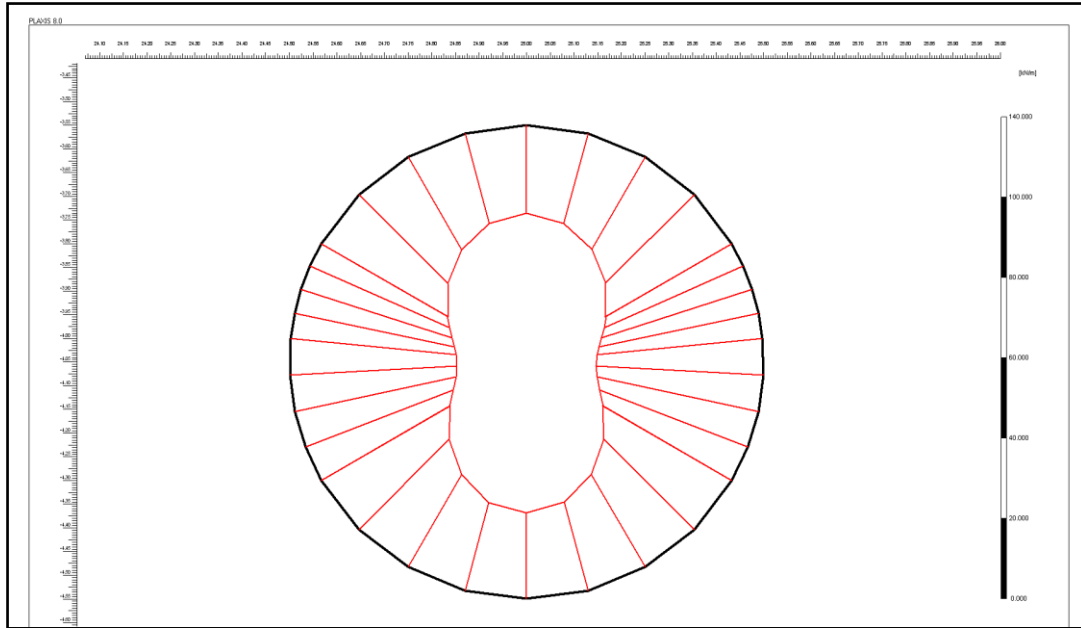
Şekil A.13: Zeminde oluşan düşey efektif gerilmeler
(Maks. düşey efektif gerilme : 682,55 kN/m²)



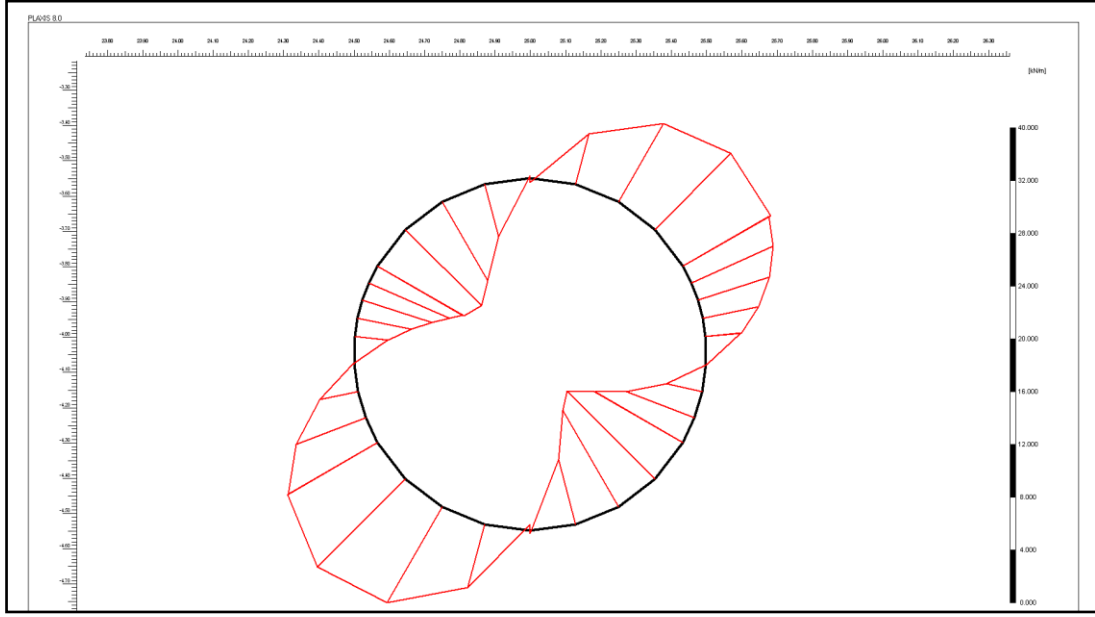
Şekil A.14 : Zeminde oluşan yatay efektif gerilmeler
(Maks. yatay efektif gerilme : 244,42 kN/m²)



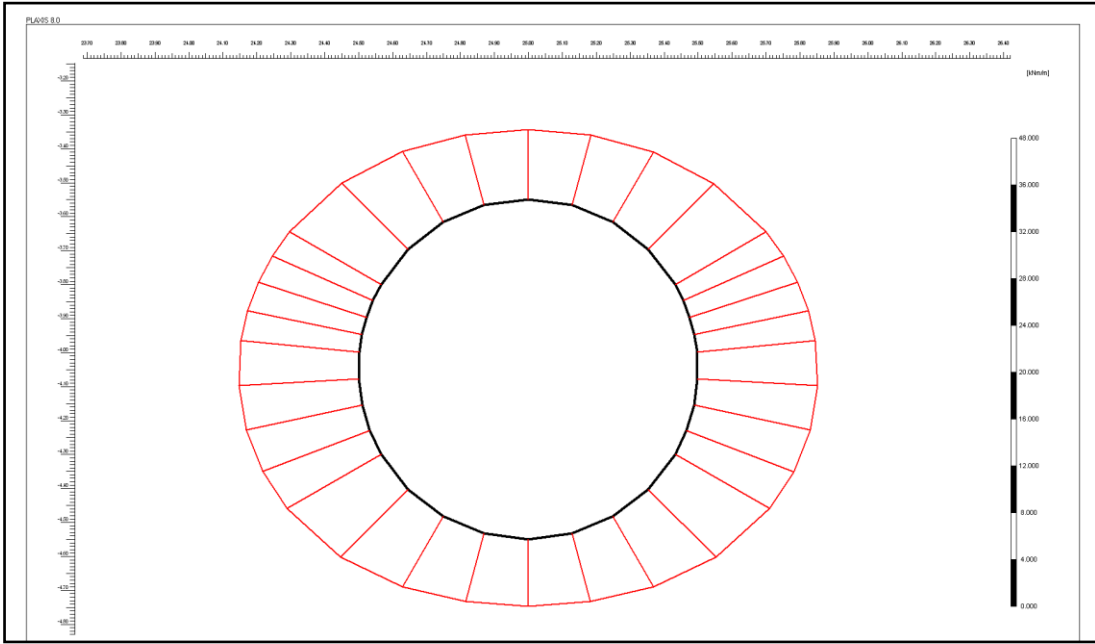
Şekil A.15 : Boruda Meydana Gelen Düşey Yer değıştirme hareketi (SK-2)



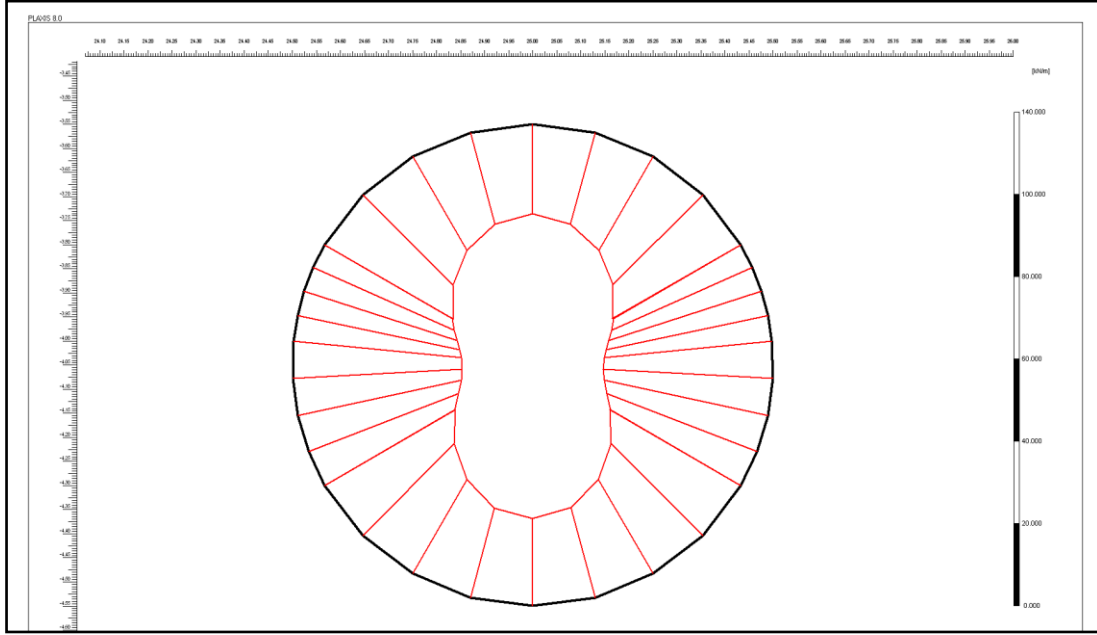
Şekil A.16: SK-2 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eksenel kuvvetler (41.56 kN/m)



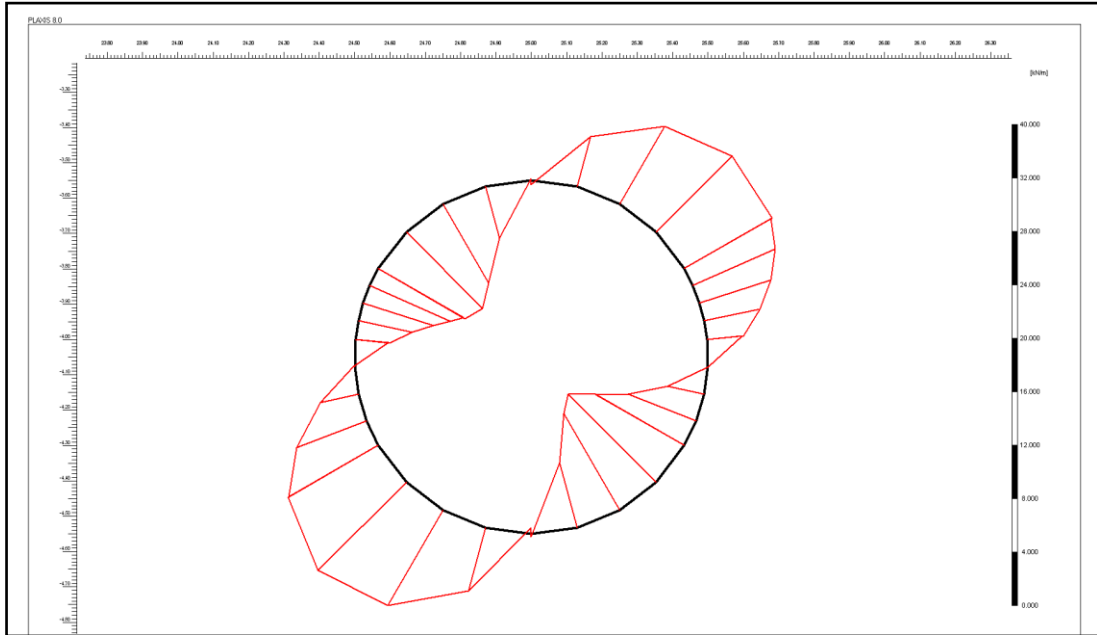
Şekil A.17 : SK-2 kesitinde yer alan beton boruda oluşan kayma kuvvetleri (9.40 kN/m)



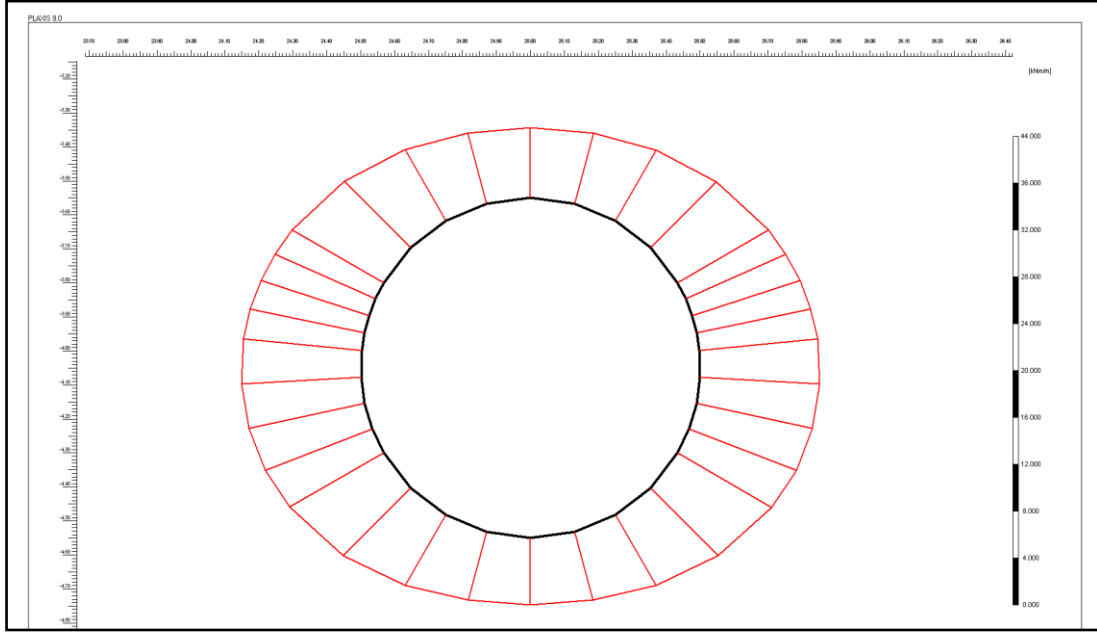
Şekil A.18 : SK-2 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eğilme momentleri (10.30 kN.m/m)



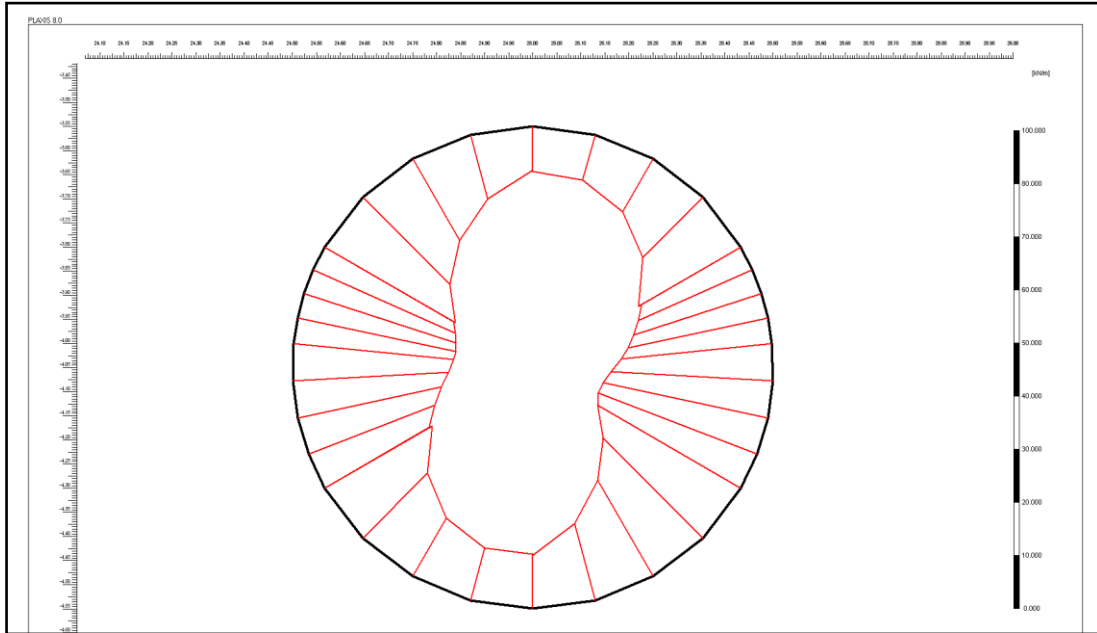
Şekil A.19 : SK-2 kesitinde CTP boruda oluşan aksenal kuvvetler (46.97 kN/m)



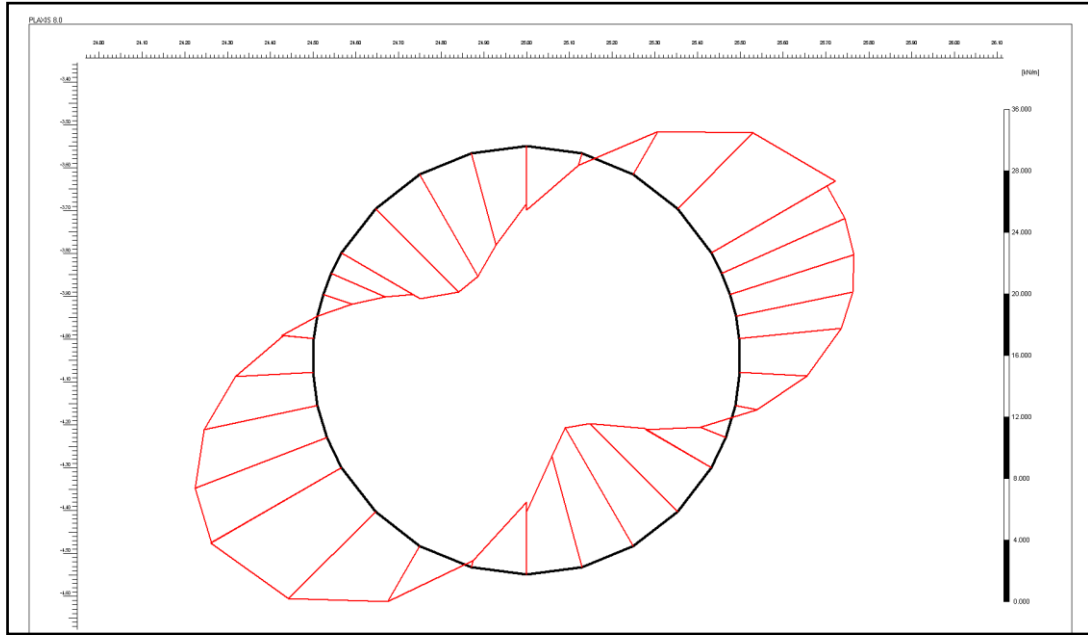
Şekil A.20 : SK-2 kesitinde CTP boruda oluşan kayma kuvvetleri (18.51 kN /m)



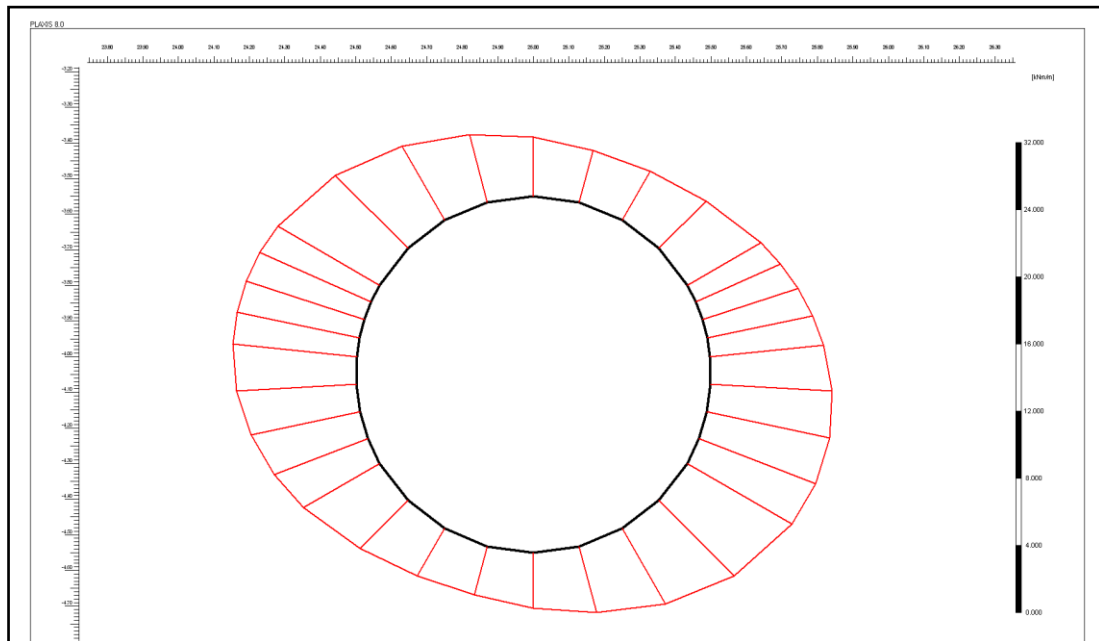
Şekil A.21 : SK-2 Kesitinde CTP boruda oluşan eğilme momentleri (12.19 kN.m/m)



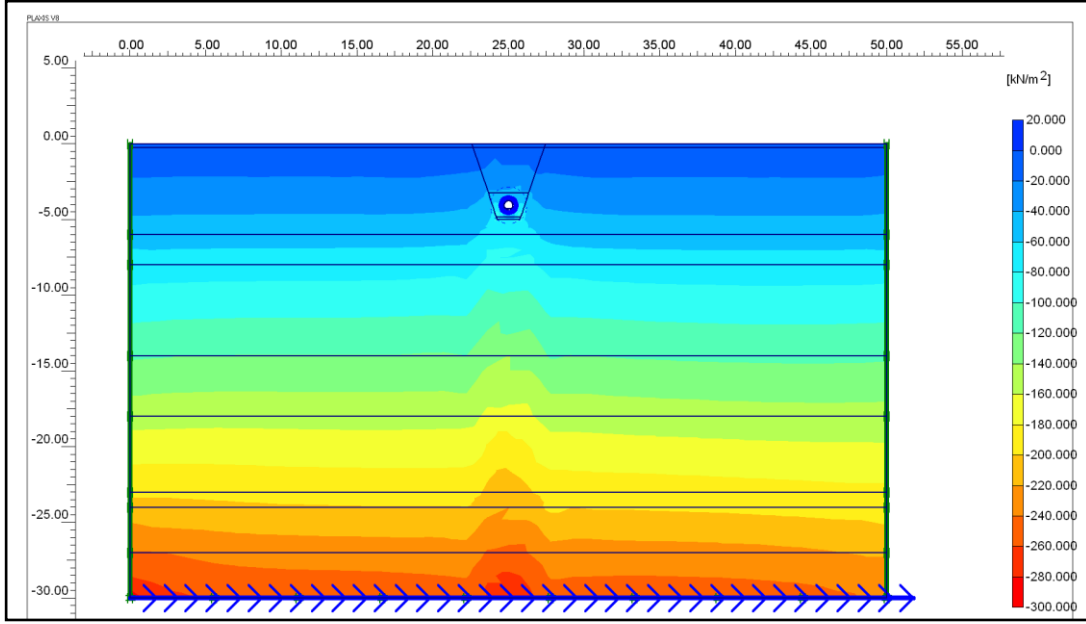
Şekil A.22 : SK-2 kesitinde HDPE boruda oluşan aksenal kuvvetler (25.50 kN/m)



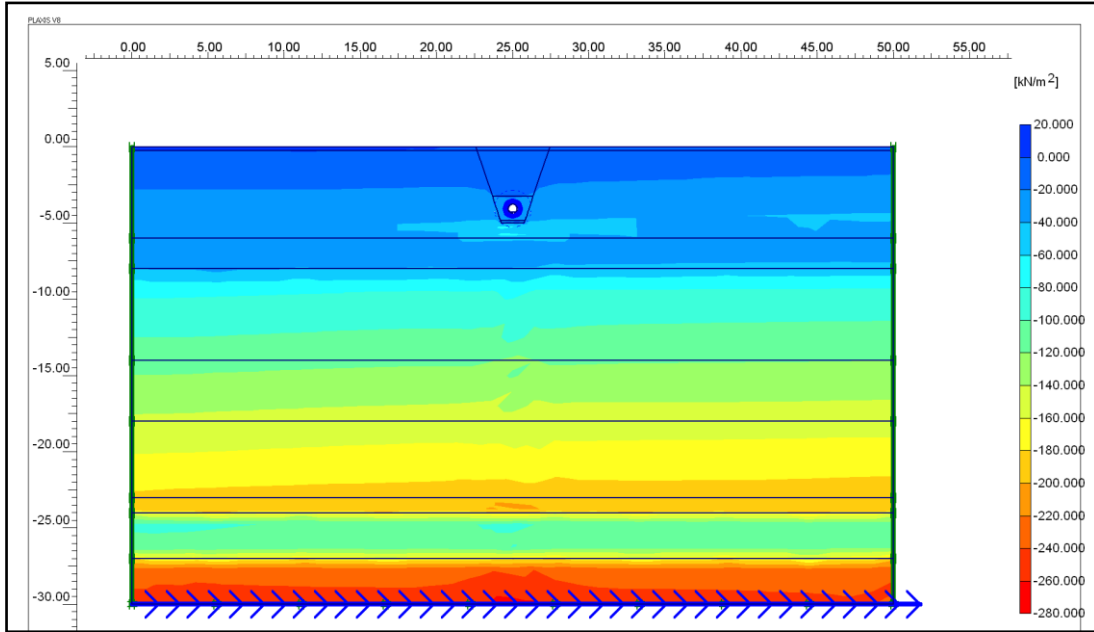
Şekil A.23: SK-2 kesitinde HDPE boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.08 kN/m)



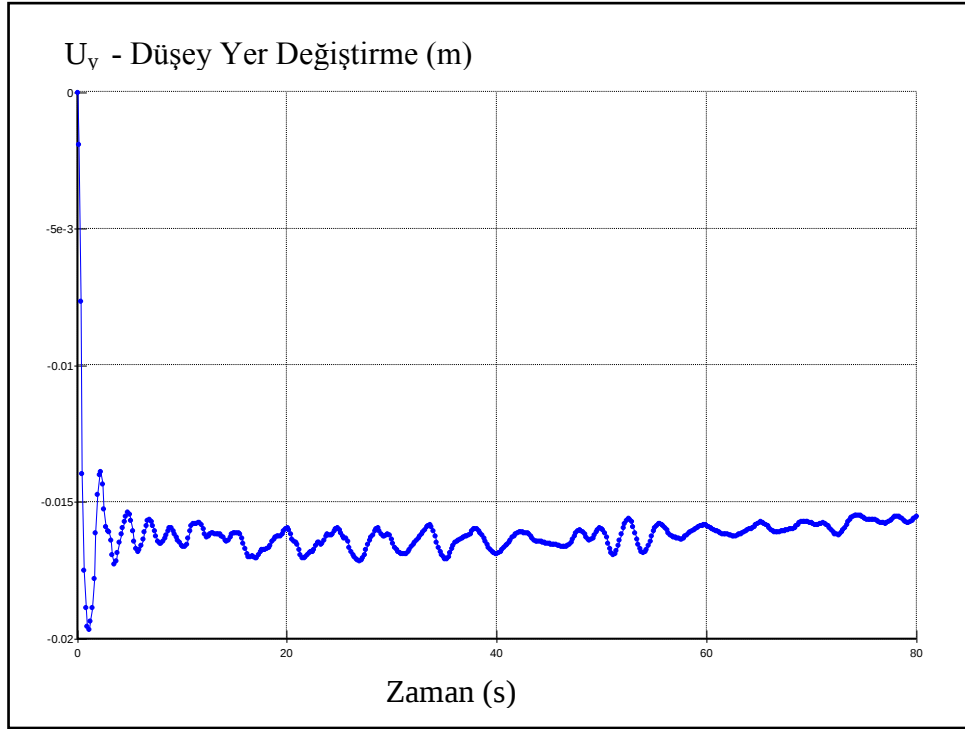
Şekil A.24 : SK-2 kesitinde HDPE boruda oluşan eğilme momentleri (5.67 kN.m/m)



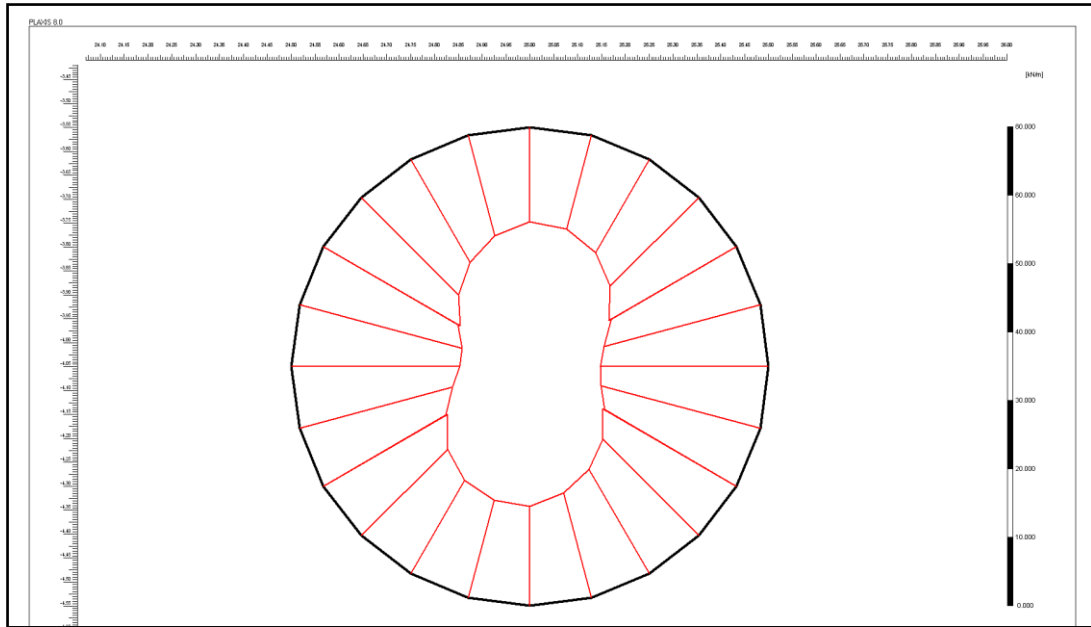
Şekil A.25 : Zeminde oluşan düşey efektif gerilmeler
(Maks. düşey efektif gerilme : $293,08 \text{ kN/m}^2$)



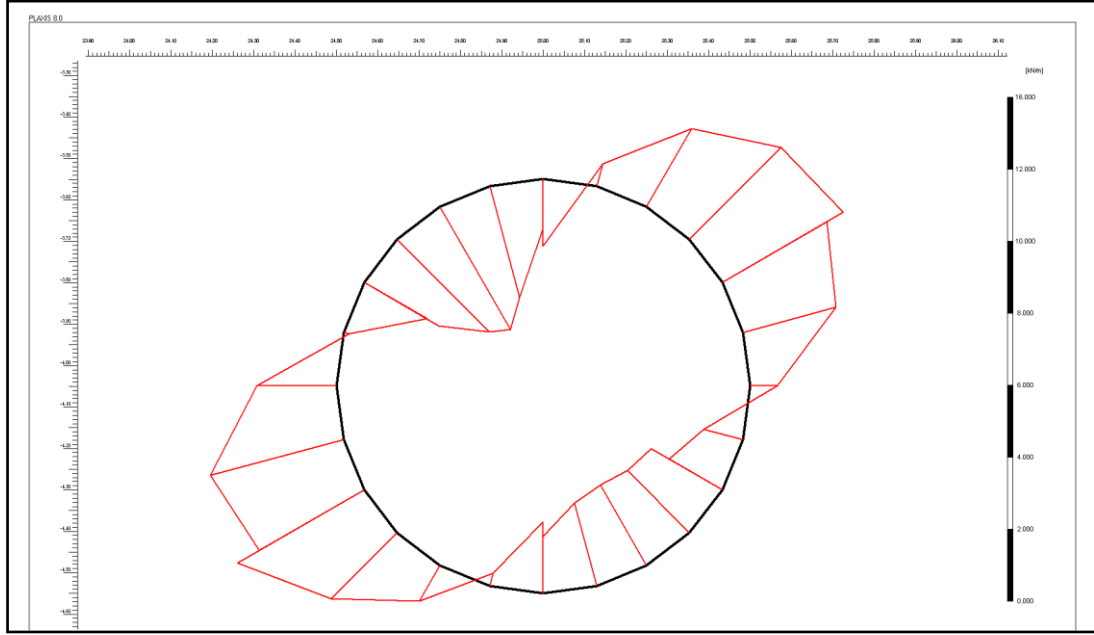
Şekil A.26 : Zeminde oluşan yatay efektif gerilmeler
(Maks. yatay efektif gerilme : $278,22 \text{ kN/m}^2$)



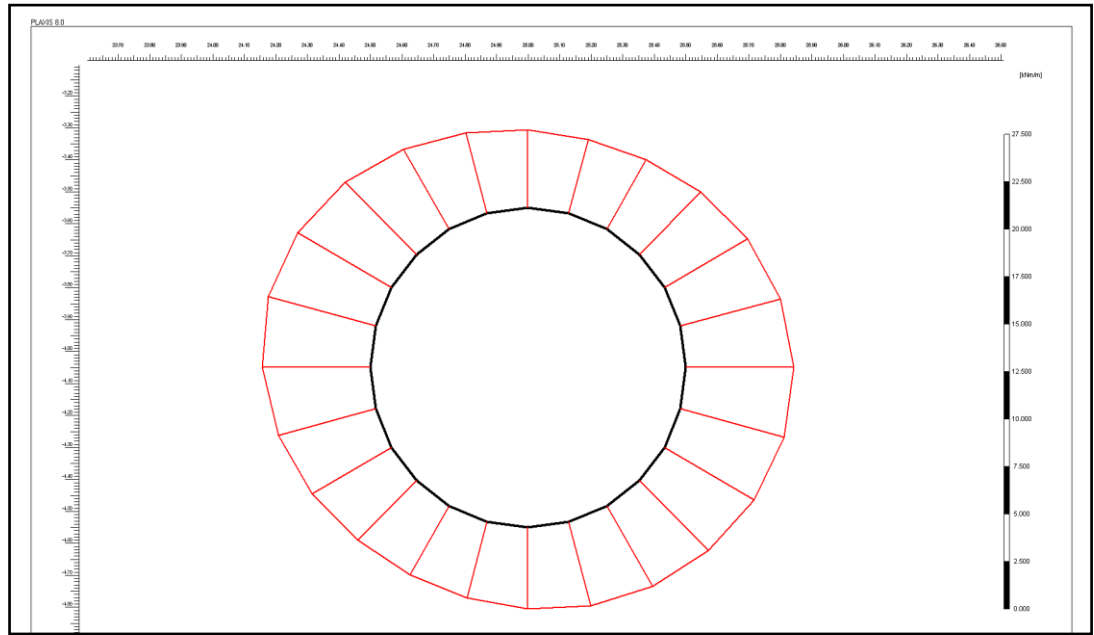
Şekil A.27 : Boruda Meydana Gelen Düşey Yer değıştirme hareketi (SK-3)



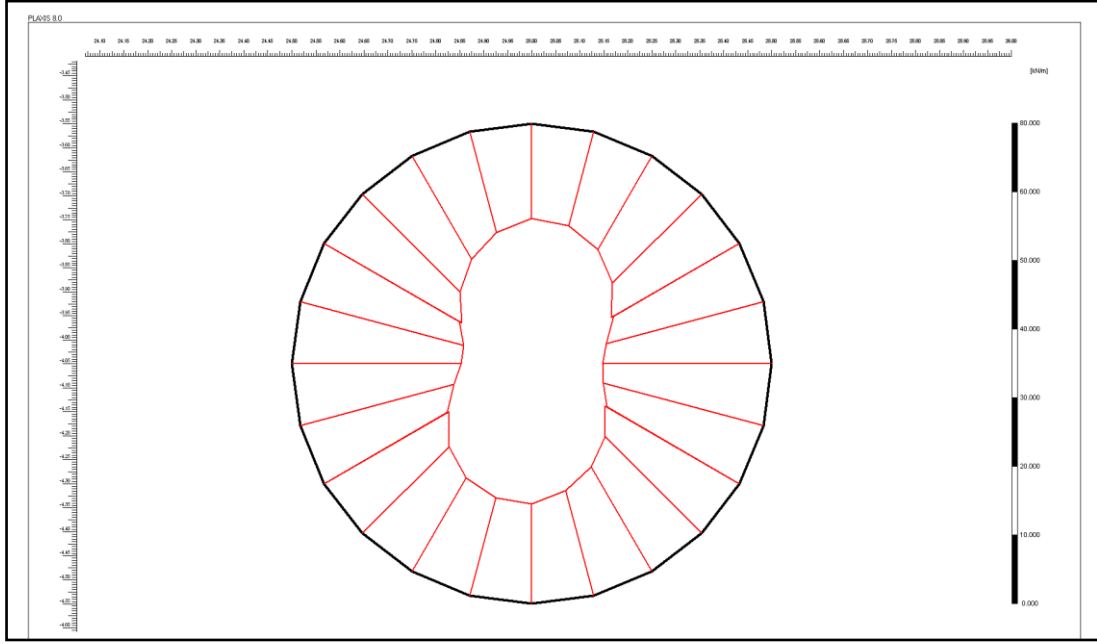
Şekil A.28 : SK-3 kesitinde yer alan beton boruda oluşan aksenal kuvvetler (24.81 kN/m)



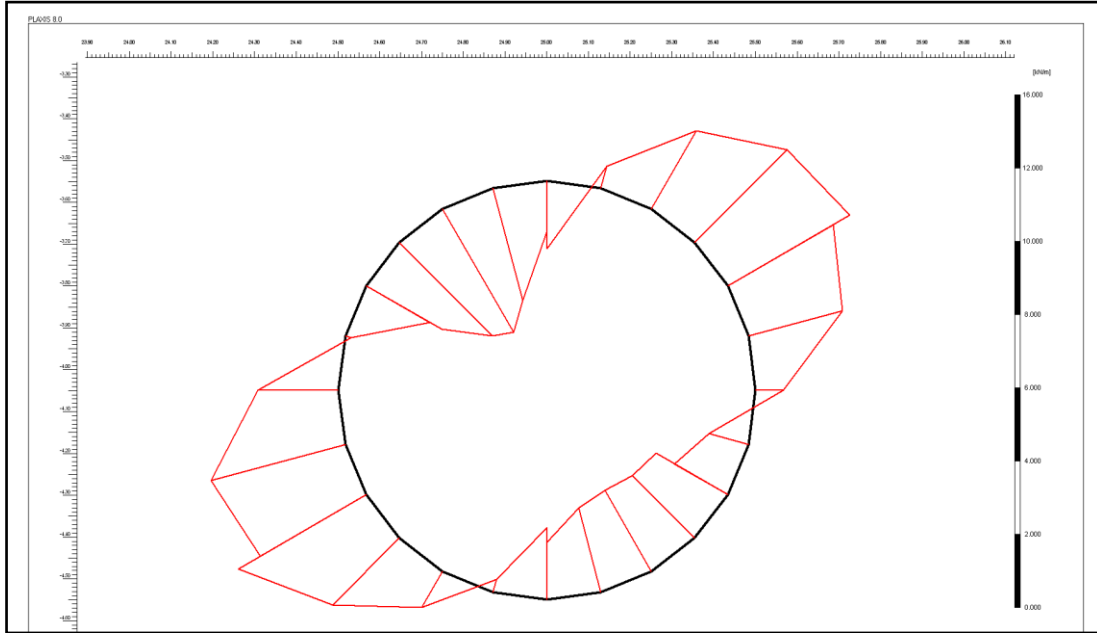
Şekil A.29 : SK-3 kesitinde yer alan beton boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.07 kN/m)



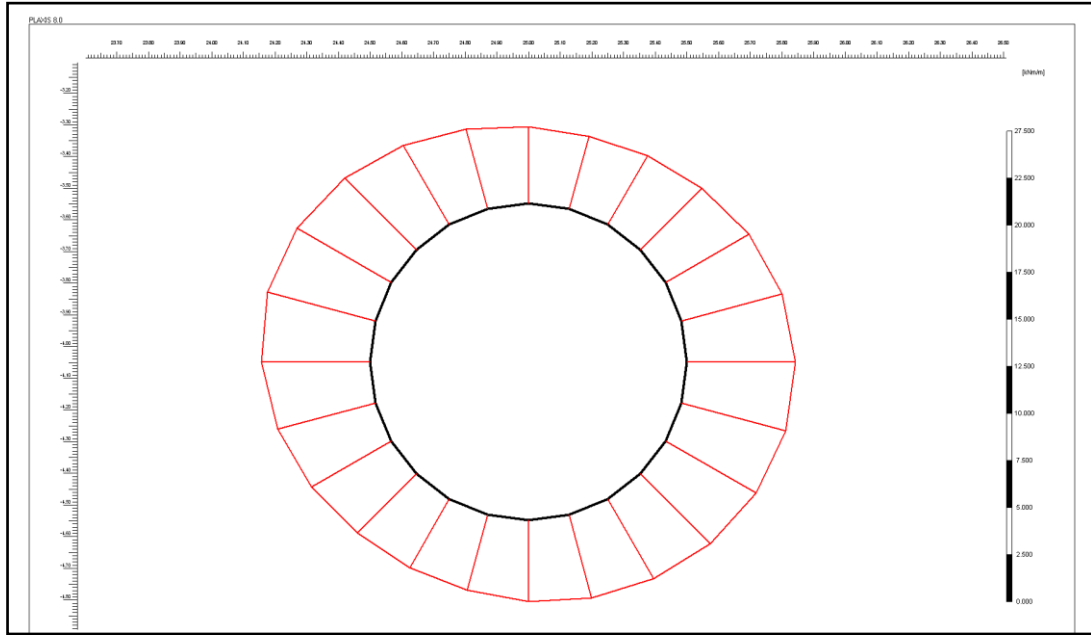
Şekil A.30 : SK-3 kesitinde yer alan beton boruda oluşan eğilme momentleri (5.98 kN.m/m)



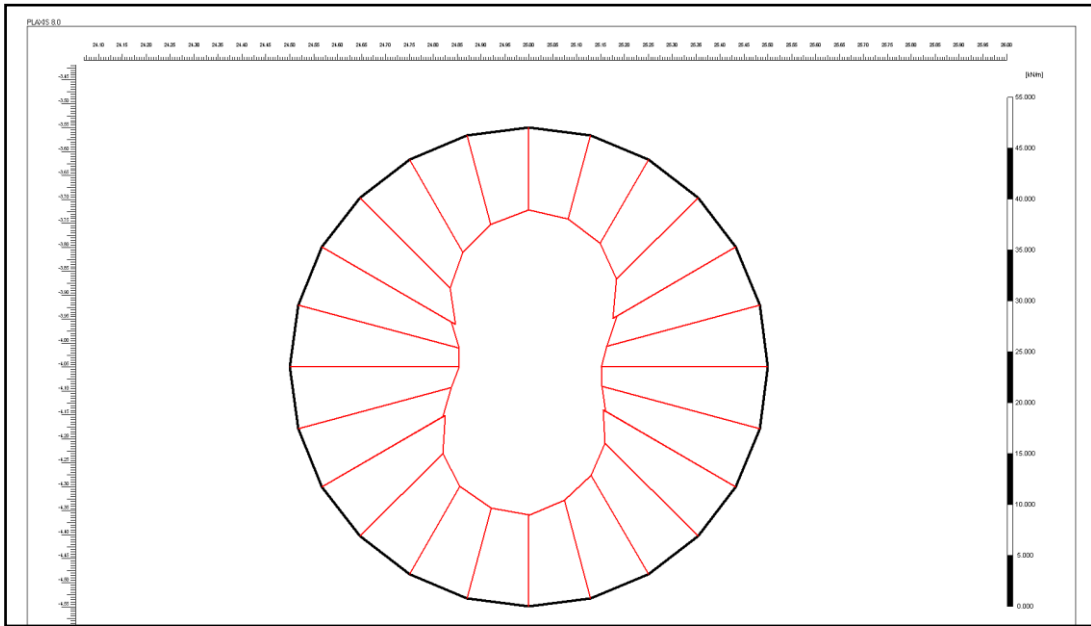
Şekil A.31 : SK-3 kesitinde CTP boruda oluşan aksenal kuvvetler (24.74 kN/m)



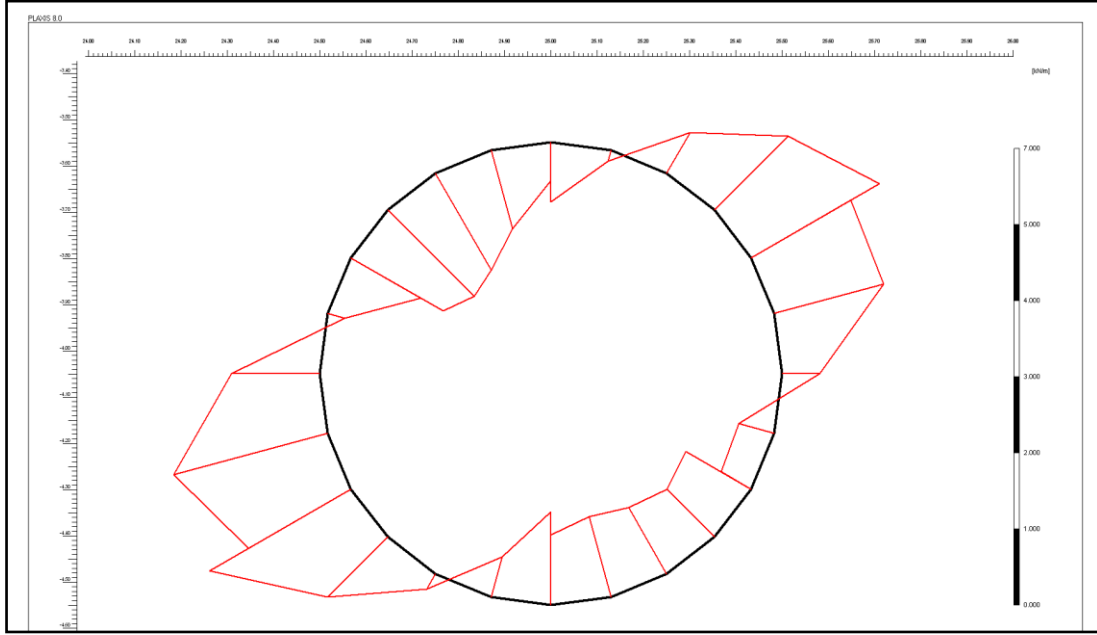
Şekil A.32 : SK-3 kesitinde CTP boruda oluşan kayma kuvvetleri (4.05 kN/m)



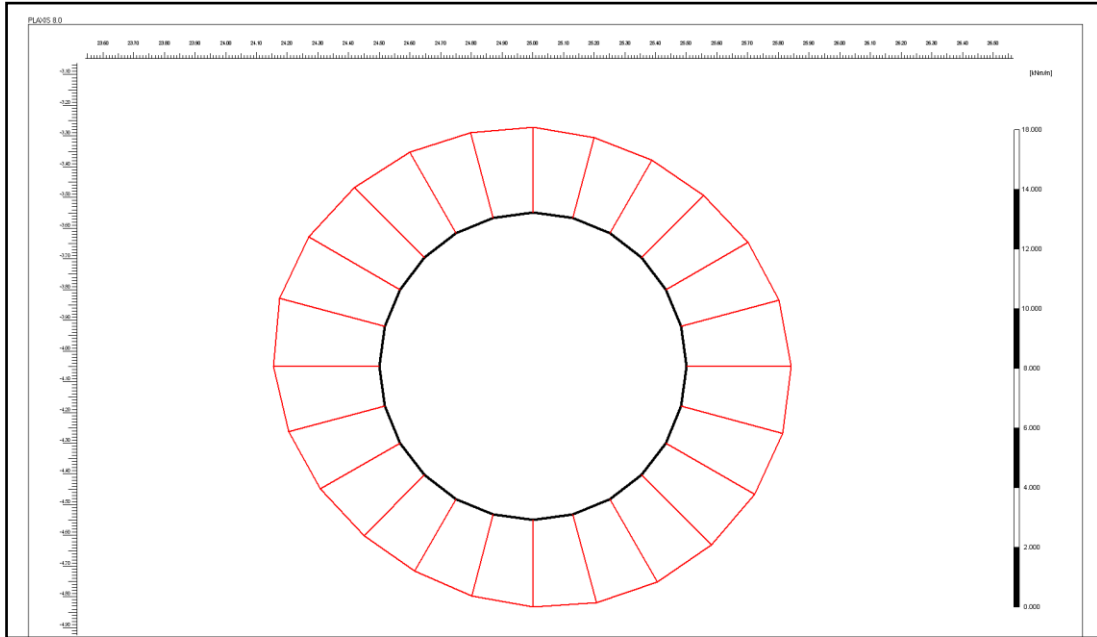
Şekil A.33 : SK-3 Kesitinde CTP boruda oluşan eğilme momentleri (5.94 kN.m/m)



Şekil A.34 : SK-3 kesitinde HDPE boruda oluşan aksenal kuvvetler (16.58 kN/m)



Şekil A.35 : SK-3 kesitinde HDPE boruda oluşan kayma kuvvetleri (2.14 kN/m)



Şekil A.36 : SK-3 kesitinde HDPE boruda oluşan eğilme momentleri (3.65 kN/m)

Çizelge A.1 : Zemin Sınıflandırılması

BİRLEŞİK ZEMİN SINIFLAMASI										
Ana Bölümler			Grup Simgeleri	Tipik Adlama	Laboratuvar Sınıflama Ölçütleri					
İri Taneli Zeminler	Çakıllar (İri Taneli malzemenin yarıdan fazlası 4 nolu elek açıklığından daha büyük)	Salt Çakıl (Temiz Çakıl, ince az yada yok)	GW	İyi derecelenmiş çakıl, çakıl kum karışımı, ince malzeme çok az ya da hiç yok	Tane boyu eğrisinden kum ve çakıl yüzdesini belirleyiniz. İnce malzeme (<200 no'lu elek açıklığı) yüzdesine dayanarak iri taneli zeminler aşağıdaki gibi sınıflandırılır. % 5'den az ise GW, GP, SW, SP, %12'den fazla ise GW, GC, SM, SC. %5-12 arası ise sınır zonunda malzeme iki simge birlikte kullanılacaktır.	Cu> 4 ve Cz 1 ve 3 arasında				
			GP	Kötü derecelenmiş çakıl, çakıl kum karışımı, ince malzeme çok az ya da hiç yok		GW için gerekli olan derecelenme/granülometri koşullarının hiçbirini karşılamaz.				
		İnce Malzemeli Çakıl	GM	Siltli Çakıl, Çakıl-Kum-Silt Karışımı		Atterberg limitleri "A" çizgisinin altında veya PI < 4	"A" çizgisinin üstünde ve PI 4 ile 7 arasında sınır zonunu oluştur. Her iki simge (GM ve GC) birlikte kullanılır.			
			GC	Killi Çakıl, Çakıl-kum-silt karışımı		Atterberg limitleri "A" çizgisinin üstünde ve PI > 7				
	Kumlar (İri Taneli malzemenin yarıdan fazlası 4 nolu elek açıklığından daha küçük)	Salt Kum (Temiz Kum, ince az yada yok)	SW	İyi derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince malzeme çok az ya da hiç yok		Cu> 6 ve Cz 1 ve 3 arasında				
			SP	Kötü derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince malzeme çok az ya da hiç yok		SW için gerekli olan derecelenme/granülometri koşullarının hiçbirini karşılamaz.				
		İnce Malzemeli Kum	SM	Siltli Kum, Kum-Silt karışımı		Atterberg limitleri "A" çizgisinin altında veya PI < 4	Tarlalı zon içinde ve PI 4 ile 7 arasında sınır zon oluşturur.			
			SC	Killi Kum, kum-Kil karışımı		Atterberg limitleri "A" çizgisinin üstünde ve PI > 7				
			İnce Taneli Zeminler	Siltler ve Killer (Likit Limit 50'nin altında)		ML	İnorganik silt ve çok ince kum, kayaç unu, siltli veya killi ince kum veya plastisitesi düşük killi silt			
						CL	Plastisitesi düşük veya orta inorganik kil, çakıllı kil, kumlu kil, siltli kil, zayıf kil			
OL	Organik Silt ve plastisitesi düşük organik siltli kil									
Siltler ve Killer (Likit Limit 50'nin üstünde)	MH	İnorganik silt, mikalı veya diyotemelli, ince kumlu veya siltli toprak, elastik silt								
	CH	Plastisitesi yüksek inorganik kil, şişen kil								
	OH	Plastisitesi orta veya yüksek organik kil, organik silt								
Organik Zeminler	Pt	Turba ve oldukça organik diğer zeminler								

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Murat GÜMÜŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: ÇANKIRI - 31.03.1981

Adres: Eski Osmanlı Sok. 23/3 Mecidiyeköy / İSTANBUL

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi