

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÖMÜLÜ BORULARA ETKİYEN DÜŞEY ve YATAY  
YÜKLERİN BORU STABİLİTESİNE OLAN  
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Niyazi Uğur TERZİ

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 08.05.2007  
**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM (YTÜ)  
**Juri Üyeleri** : Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN (YTÜ)  
: Prof. Dr. Gökhan BAYKAL (B.Ü)  
: Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü)  
: Prof. Dr. Mete İNCECİK (İTÜ)

**İSTANBUL 2007**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                             |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                         | vii   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                       | xi    |
| ÖNSÖZ .....                                                                 | xvi   |
| ÖZET .....                                                                  | xvii  |
| ABSTRACT .....                                                              | xviii |
| 1. GİRİŞ .....                                                              | 1     |
| 2. GÖMÜLÜ BORULARA İLİŞKİN TEKNİK BİLGİLER .....                            | 3     |
| 2.1 Rijit ve Esnek Boru Farklılıkları .....                                 | 5     |
| 2.2 Kemerlenme Etkisi .....                                                 | 6     |
| 2.3 Esnek Boruların Göçme Biçimleri .....                                   | 8     |
| 2.3.1 Boru duvarlarının Ezilmesi .....                                      | 8     |
| 2.3.2 Boru Duvarlarının Burkulması .....                                    | 9     |
| 2.3.3 Boru Kesitinin Aşırı Şekil Değişirmesi .....                          | 10    |
| 2.3.4 Normal ve Kayma Şekil Değişimleri .....                               | 11    |
| 2.3.5 Boyuna Doğrultudaki Gerilmeler .....                                  | 12    |
| 2.3.6 İlave Kesme Kuvveti Yükleri .....                                     | 13    |
| 2.3.7 Yorulma Çatlakları .....                                              | 13    |
| 3. GÖMÜLÜ BORULARIN TASARIM YÖNTEMLERİ .....                                | 14    |
| 3.1 Marston Yük Teorisi (1931) .....                                        | 14    |
| 3.2 Iowa Eşitliği (1941) .....                                              | 16    |
| 3.3 Geliştirilmiş Iowa Eşitliği (1958) .....                                | 21    |
| 3.4 Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinin Türetilen Diğer Eşitlikler .....         | 24    |
| 3.4.1 Greenwood-Lang Geliştirilmiş Iowa Eşitliği (1990) .....               | 25    |
| 3.4.2 McGrath Eşitliği (1998) .....                                         | 26    |
| 3.4.3 Masada Geliştirilmiş Iowa Derivasyonu (1998) .....                    | 27    |
| 3.5 Richard Burns Elastik Yöntemi (1964) .....                              | 29    |
| 3.6 Hoeg Elastik Çözüm Yöntemi (1968) .....                                 | 33    |
| 3.7 Chua Ve Lytton Viskoelastik Yöntemi (1998) .....                        | 36    |
| 3.8 Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemleri .....                                 | 37    |
| 4. GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNDE YAPILMIŞ<br>ARAZİ VE LABORATUVAR DENEYLERİ ..... | 40    |
| 4.1 Arazi Deneyleri .....                                                   | 40    |
| 4.2 Laboratuvar Deneyleri .....                                             | 41    |

|         |                                                                                       |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5       | YTÜ LABARATUVARLARINDA GELİŞTİRİLMİŞ<br>HENDEK ORTAMINI MODELLEYEN DENEY SİSTEMİ..... | 49  |
| 5.1     | Deney Kutusu.....                                                                     | 50  |
| 5.2     | Yükleme Sistemi.....                                                                  | 57  |
| 5.3     | Fotogrametrik Ölçümler.....                                                           | 61  |
| 6.      | ZEMİN ÖZELLİKLERİ .....                                                               | 62  |
| 6.1     | Zeminlerin İndeks Özellikleri .....                                                   | 63  |
| 6.2     | Üç Eksenli Basınç Deneyleri .....                                                     | 65  |
| 6.3     | Hiperbolik Model.....                                                                 | 69  |
| 6.4     | Plaka Yüklemeye Deneyleri .....                                                       | 71  |
| 7       | HDPE BORU ÖZELLİKLERİ .....                                                           | 73  |
| 7.1     | Polietilen .....                                                                      | 73  |
| 8       | GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE<br>SONLU ELEMANLAR YÖNTEMLERİ.....                          | 74  |
| 8.1     | Plaxis Programı .....                                                                 | 75  |
| 8.2     | PLAXIS Bütünleşik Gerilme – Şekil Değiştirme Analizi .....                            | 75  |
| 8.3     | Gerilme-Şekil Değiştirme Analizi .....                                                | 76  |
| 8.4     | Sonlu Elemanlar İterasyonları.....                                                    | 78  |
| 8.5     | Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Eleman Tipleri .....                            | 81  |
| 8.6     | Analizlerde Kullanılan Malzeme Modeli.....                                            | 81  |
| 8.6.1   | Mohr-Coulomb Modeli .....                                                             | 82  |
| 9.      | GEOTEKNİK UYGULAMALARINDA FOTOGREMETRİK YÖNTEM ....                                   | 84  |
| 10.     | DENEYSEL ve SAYISAL ÇALIŞMALAR .....                                                  | 87  |
| 10.1.1  | 1 No’lu Deney.....                                                                    | 91  |
| 10.1.2  | 2 No’lu Deney .....                                                                   | 96  |
| 10.1.3  | 3 No’lu Deney .....                                                                   | 100 |
| 10.1.4  | 4 No’lu Deney .....                                                                   | 105 |
| 10.1.5  | 5 No’lu Deney .....                                                                   | 109 |
| 10.1.6  | 6 No’lu Deney .....                                                                   | 114 |
| 10.1.7  | 7 No’lu Deney .....                                                                   | 118 |
| 10.1.8  | 8 No’lu Deney .....                                                                   | 122 |
| 10.1.9  | 9 No’lu Deney .....                                                                   | 126 |
| 10.1.10 | 10 No’lu Deney .....                                                                  | 130 |
| 10.1.11 | 11 No’lu Deney .....                                                                  | 134 |

|        |                                                         |     |
|--------|---------------------------------------------------------|-----|
| 10.2   | Çakıl Geri Dolgusunda Yapılan Düşey Yüklü Deneyler..... | 138 |
| 10.2.1 | 12 No'lu Deney.....                                     | 138 |
| 10.2.2 | 13 No'lu Deney.....                                     | 142 |
| 10.2.3 | 14 No'lu Deney.....                                     | 146 |
| 10.2.4 | 15 No'lu Deney.....                                     | 150 |
| 10.2.5 | 16 No'lu Deney.....                                     | 154 |
| 10.2.6 | 17 No'lu Deney.....                                     | 158 |
| 10.3   | Kum Geri Dolgusunda Yapılan Yanal Yüklü Deneyler .....  | 162 |
| 10.3.1 | 18 No'lu Deney.....                                     | 162 |
| 10.3.2 | 19 No'lu Deney.....                                     | 165 |
| 10.3.3 | 20 No'lu Deney.....                                     | 168 |
| 10.3.4 | 21 No'lu Deney.....                                     | 171 |
| 10.4   | Çakıl Geri Dolgusunda Yapılan Yanal Yüklü Deneyler..... | 174 |
| 10.4.1 | 22 No'lu Deney.....                                     | 174 |
| 10.4.2 | 23 No'lu Deney.....                                     | 177 |
| 10.4.3 | 24 No'lu Deney.....                                     | 180 |
| 10.5   | Fotogrametrik Ölçümler.....                             | 183 |
| 10.5.1 | 25 No'lu Deney.....                                     | 183 |
| 10.5.2 | 26 No'lu Deney.....                                     | 191 |
| 10.5.3 | 27 No'lu Deney.....                                     | 198 |
| 10.5.4 | 28 No'lu Deney.....                                     | 205 |
| 10.5.5 | 29 No'lu Deney.....                                     | 212 |
| 10.5.6 | 30 No'lu Deney.....                                     | 219 |
| 10.6   | Deneylerin Genel Değerlendirilmesi .....                | 226 |
| 11.    | SONUÇLAR.....                                           | 234 |
|        | KAYNAKLAR.....                                          | 238 |

## SİMGE LİSTESİ

|               |                                                                                 |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| B             | Hendek genişliği                                                                |
| $C_d$         | Hendek koşullarına göre yerleştirilmiş yük katsayısı                            |
| D             | Boru çapı (m)                                                                   |
| $D_L$         | Deformasyon gecikme faktörü                                                     |
| $E_p$         | Borunun Young Modülü                                                            |
| $P_{cr}$      | Kritik burulma basıncı                                                          |
| $E'$          | Geri dolgu malzemesinin boru duvarına uyguladığı zemin reaksiyonu               |
| $E_p$         | Borunun Young Modülü                                                            |
| $E_2$         | Geri dolgunun Young Modülü (Greenwood-Lang)                                     |
| $E_3$         | Doğal zeminin Young Modülü (Greenwood-Lang)                                     |
| H             | Boru üzerindeki geri dolgu malzemesinin yüksekliği                              |
| $P_c$         | Düşey yük                                                                       |
| K             | Yataklama katsayısı                                                             |
| $K$           | Yanal aktif basıncının düşey aktif basıncına olan oranı (Richard&Burns Yöntemi) |
| r             | Borunun yarıçapı                                                                |
| $r_o$         | Borunun ortalama yarıçapı                                                       |
| $\nu_p$       | Borunun Poisson oranı                                                           |
| $\nu_s$       | Zeminin Poisson Oranı                                                           |
| t             | Boru et kalınlığı                                                               |
| $W_c$         | Birim uzunluk için boru üzerindeki Marston yükü                                 |
| $\mu'$        | Dolgu malzemesinin hendek duvarları ile arasındaki sürtünme açısı               |
| $\Delta x$    | Borunun yanal şekil değiştirmesi                                                |
| $\Delta y$    | Borunun düşey şekil değiştirmesi                                                |
| $M_s$         | Zeminin bir boyutlu Sıkışma Modülü                                              |
| $\gamma$      | Geri dolgunun birim hacim ağırlığı                                              |
| I             | Borunun atalet momenti                                                          |
| $\delta_{vo}$ | Sıkıştırma etkisi ile ortaya çıkan düşey uzama büyüklüğü                        |
| $C_1$         | Greenwood ve Lang zemin-boru etkileşimi katsayısı                               |
| $\Delta v$    | Düşey yönde deformasyon (m)                                                     |
| $VAF$         | Düşey Kemerlenme etkisi (%)                                                     |
| $M_1$         | Zeminin stres boşalması,                                                        |
| $\Gamma$      | Gama fonksiyonu                                                                 |

## KISALTMA LİSTESİ

|        |                                                                    |
|--------|--------------------------------------------------------------------|
| ASCE   | American Society for Civil Engineers                               |
| ASTM   | American Society for Testing and Materials                         |
| AASTHO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| AWWA   | American Water Works Association                                   |
| VAF    | Vertical Arching Factor                                            |
| SEY    | Sonlu Elemanlar Yöntemi                                            |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                  |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | Gömülü Borularda Kullanılan Teknik Terimler (Bashir, 2000).....                                  | 3  |
| Şekil 2.2  | Gömülü Esnek Boruların Yüklenme Biçimleri (Laidlaw, 1999).....                                   | 4  |
| Şekil 2.3  | Rijit ve Esnek Boruların Karşılaştırılması (Bashir, 2000).....                                   | 5  |
| Şekil 2.4  | Rijit ve Esnek Borularda Görülen Göçme Biçimleri (Wang, 2002).....                               | 6  |
| Şekil 2.5  | Olumlu ve Olumsuz Kemerlenme Durumlarının Oluşum Biçimleri<br>(Bashir, 2000) .....               | 7  |
| Şekil 2.6  | Farklı Kemerlenme Durumlarındaki Gerilme Dağılışı (Masada 1996).....                             | 7  |
| Şekil 2.7  | Esnek Boruların Ezilme Biçimi .....                                                              | 9  |
| Şekil 2.8  | Esnek Boruların Burkulma Biçimi.....                                                             | 9  |
| Şekil 2.9  | Esnek Boruların Aşırı Deformasyon Biçimleri (Suleiman 2002).....                                 | 11 |
| Şekil 2.10 | Borularda Görülebilen Boyuna Doğrultudaki Kırılma Türleri<br>(Rajani Zhan, Kuraoka, 1995) .....  | 12 |
| Şekil 2.11 | Yetersiz Yataklama Nedeni ile Oluşabilen Kırılma Biçimleri<br>(Rajani Zhan, Kuraoka, 1995) ..... | 13 |
| Şekil 3.1  | Marston Hendek Kesiti .....                                                                      | 14 |
| Şekil 3.2  | Spangler Gerilme Dağılışı.....                                                                   | 17 |
| Şekil 3.3  | Spangler Varsayımında Boru Kesitinde Oluşan Gerilmeler .....                                     | 18 |
| Şekil 3.4  | Gömülü Borunun Yataklama Biçimi (Moser 2000) .....                                               | 20 |
| Şekil 3.5  | Esnek Boruların Yük taşıma Biçimleri .....                                                       | 23 |
| Şekil 3.6  | Richard-Burns Elastik Ortamı.....                                                                | 30 |
| Şekil 3.7  | Boru Kesitinde oluşan Çembersel, Teğetsel Deformasyonlar .....                                   | 30 |
| Şekil 4.1  | Uniform ve Uniform Olmayan Deformasyon Biçimleri.....                                            | 41 |
| Şekil 4.2  | Selig Basınç Hücresi .....                                                                       | 42 |
| Şekil 4.3  | Brachman Deney Kutusu .....                                                                      | 43 |
| Şekil 4.4  | Cho Deney Kutusu .....                                                                           | 44 |
| Şekil 4.5  | Rogers Deney Kutusu .....                                                                        | 45 |
| Şekil 4.6  | Goube Deney Kutusu .....                                                                         | 45 |
| Şekil 4.7  | Zolad Deney Kutusu .....                                                                         | 46 |
| Şekil 4.8  | Smith Deney Kutusu .....                                                                         | 47 |
| Şekil 4.9  | Cameron Deney Kutusu .....                                                                       | 47 |
| Şekil 4.10 | Kawabata Deney Kutusu.....                                                                       | 48 |
| Şekil 4.11 | Devapria Deney Kutusu .....                                                                      | 48 |
| Şekil 5.1  | Solid Works Programında Üç Boyutlu Olarak Modellenen Deney Kutusu .....                          | 52 |

|            |                                                                                    |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.2  | Deney Kutu Kapağı Kilit Sistemi .....                                              | 53  |
| Şekil 5.3  | Deney Kutu Kapağının 300 Kpa Yük Altındaki Şekil Değiştirmesi .....                | 53  |
| Şekil 5.4  | Deney Kutusunun 300 Kpa Yükleme Altındaki Şekil Değişimi .....                     | 54  |
| Şekil 5.6  | Laboratuar Deney Sisteminin Genel Görünüşü .....                                   | 55  |
| Şekil 5.7  | Yağmurlama Sistemi.....                                                            | 56  |
| Şekil 5.8  | Ölçüm Aygıtlarının Yerleşimi .....                                                 | 60  |
| Şekil 5.9  | Laboratuar Deneylerinde Kullanılan Ölçüm Aygıtları .....                           | 60  |
| Şekil 5.10 | Fotogremetrik Ölçümlerde Kullanılan Ölçüm Aygıtları.....                           | 61  |
| Şekil 6.1  | Geri Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılan Zeminler .....                              | 62  |
| Şekil 6.2  | Kum Malzemesinin X-RAY Deneyi Sonucu.....                                          | 63  |
| Şekil 6.3  | Kum Malzemesinin Mikroskopik Fotoğrafları .....                                    | 63  |
| Şekil 6.4  | Kum Malzemesine İlişkin Elek Analizi.....                                          | 64  |
| Şekil 6.5  | Çakıl Malzemesine İlişkin Elek Analizi .....                                       | 64  |
| Şekil 6.6  | Kum Geri Dolgusunun % 45 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi .....         | 66  |
| Şekil 6.7  | Kum Geri Dolgusunun % 45 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı .....                    | 66  |
| Şekil 6.6  | Kum Geri Dolgusunun % 60 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi .....         | 67  |
| Şekil 6.7  | Kum Geri Dolgusunun % 60 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı .....                    | 67  |
| Şekil 6.8  | Kum Geri Dolgusunun % 75 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi .....         | 67  |
| Şekil 6.9  | Kum Geri Dolgusunun % 75 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı .....                    | 68  |
| Şekil 6.10 | Kum Geri Dolgusunun % 85 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi .....         | 68  |
| Şekil 6.11 | Kum Geri Dolgusunun % 85 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı .....                    | 68  |
| Şekil 6.12 | Hiperbolik Modelde a ve b değişkenlerinin gösterimi.....                           | 69  |
| Şekil 6.13 | Çakıl Zemine Ait Sıkılık Elastik Modül İlişkisi .....                              | 72  |
| Şekil 8.1  | Analizlerde kullanılan elemanlar, düğüm ve gerilme noktaları.....                  | 81  |
| Şekil 8.2  | Zeminlerin Young Modülleri.....                                                    | 82  |
| Şekil 8.3  | Asal gerilme uzayında Mohr Coulomb akma yüzeyi .....                               | 83  |
| Şekil 9.1  | Fotogremetrik Deney Düzeneği.....                                                  | 86  |
| Şekil 10.1 | 1 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması ..... | 95  |
| Şekil 10.2 | 2 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması ..... | 99  |
| Şekil 10.3 | 3 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması ..... | 104 |
| Şekil 10.4 | 4 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının                            |     |



|             |                                                                                         |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | Karşılaştırılması .....                                                                 | 108 |
| Şekil 10.5  | 5 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....      | 113 |
| Şekil 10.6  | 6 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....      | 117 |
| Şekil 10.7  | 7 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....      | 121 |
| Şekil 10.8  | 8 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....      | 125 |
| Şekil 10.9  | 9 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....      | 129 |
| Şekil 10.10 | 10 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 133 |
| Şekil 10.11 | 11 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 137 |
| Şekil 10.12 | 12 Nolu No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz<br>Sonuçlarının Karşılaştırılması..... | 141 |
| Şekil 10.13 | 13 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 145 |
| Şekil 10.14 | 14 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 149 |
| Şekil 10.15 | 15 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 153 |
| Şekil 10.16 | 16 Nolu Deneyin, Deneysel ve Sayısal Sonuçlarının Karşılaştırılması.....                | 157 |
| Şekil 10.17 | 17 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 161 |
| Şekil 10.18 | 18 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 164 |
| Şekil 10.19 | 19 Nolu Deneyin Deneysel ve Sayısal Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....             | 167 |
| Şekil 10.20 | 20 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 170 |
| Şekil 10.21 | 21 No’lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının<br>Karşılaştırılması .....     | 173 |

|             |                                                                                  |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 10.22 | 22 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 176 |
| Şekil 10.23 | 23 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 179 |
| Şekil 10.24 | 24 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 182 |
| Şekil 10.25 | 25 No'lu Deneyde Kullanılan Eşlenik Noktaların Dağılımı .....                    | 183 |
| Şekil 10.26 | (a,b) 25 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi .....                          | 188 |
| Şekil 10.27 | 25 Nolu Deneyin Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması .....           | 190 |
| Şekil 10.28 | 26 No'lu Deneyde Kullanılan Eşlenik Noktaların Dağılımı.....                     | 191 |
| Şekil 10.29 | (a,b) 26 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi .....                          | 195 |
| Şekil 10.30 | No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması...       | 197 |
| Şekil 10.31 | 27 No'lu Deneyde Eşlenik Noktaların Yerleşimi .....                              | 198 |
| Şekil 10.32 | (a,b) 27 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi .....                          | 202 |
| Şekil 10.33 | 27 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 204 |
| Şekil 10.34 | 28 No'lu Deneyin Eşlenik Noktaları.....                                          | 205 |
| Şekil 10.35 | (a,b) 28 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi .....                          | 209 |
| Şekil 10.36 | No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması...       | 211 |
| Şekil 10.37 | 29 No'lu Deneyin Eşlenik Noktaları.....                                          | 212 |
| Şekil 10.38 | (a,b) 29 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi .....                          | 216 |
| Şekil 10.39 | 29 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 218 |
| Şekil 10.40 | 30 No'lu Deneyin Eşlenik Noktaları.....                                          | 219 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|               |                                                                                  |     |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 2.1   | AWWA M.45 (1997) 'in Önerdiği Şekil Değiştirme Oranları .....                    | 6   |
| Çizelge 3.1   | Marston Yük Teorisinde Kullanılan K ve $\mu$ Değerleri (Balkaya, 2004) .....     | 16  |
| Çizelge 3.2   | Yataklama Katsayısı Değerleri (Moser 2000) .....                                 | 21  |
| Çizelge 3.3   | Howard Zemin Reaksiyonu Çizelgesi (Howard 1977) .....                            | 22  |
| Çizelge 3.4   | Greewood-Lang Yataklama Katsayıları .....                                        | 26  |
| Çizelge 3.5   | Greewood-Lang a ve b parametreleri .....                                         | 26  |
| Çizelge 3.6   | J ve K Yatak Katsayıları .....                                                   | 28  |
| Çizelge 5.1   | ASTM D 2321 ve AASHTO Sec 30'a göre En küçük Hendek Genişliği .....              | 50  |
| Çizelge 5.2   | 242 mm Çapındaki HDPE Borunun Farklı<br>Hendek Genişliklerindeki Davranışı ..... | 51  |
| Çizelge 6.1   | Kum Malzemesinin İndeks Özellikleri .....                                        | 65  |
| Çizelge 6.2   | Çakıl Malzemesinin İndeks Özellikleri .....                                      | 65  |
| Çizelge 6.3   | Kum Zemine ilişkin Sıkılık- Boşluk Oranı İlişkisi .....                          | 66  |
| Çizelge 6.4   | Kum Malzemesinin Sıkılık İçsel Sürtünme Açıları .....                            | 69  |
| Çizelge 6.5   | Üç Eksenli Deneylerinden Elde Edilen Kum Zeminin Mekanik<br>Parametreleri .....  | 71  |
| Çizelge 7.1   | Deneyisel Çalışmada Kullanılan HDPE Boruların Özellikleri .....                  | 73  |
| Çizelge 10.1  | Model Deneylerin Özellikleri .....                                               | 87  |
| Çizelge 10.2  | 1 No'lu Deney Sonuçları .....                                                    | 92  |
| Çizelge 10.3  | 1 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....       | 93  |
| Çizelge 10.4  | 1 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                       | 93  |
| Çizelge 10.5  | 1 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....       | 94  |
| Çizelge 10.6  | 1 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....                  | 94  |
| Çizelge 10.7  | 2 No'lu Deney Sonuçları .....                                                    | 96  |
| Çizelge 10.8  | 2 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....       | 97  |
| Çizelge 10.9  | 2 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                       | 97  |
| Çizelge 10.10 | 2 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....       | 98  |
| Çizelge 10.11 | 2 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....                  | 98  |
| Çizelge 10.12 | 3 No'lu Deney Sonuçları .....                                                    | 100 |
| Çizelge 10.13 | 3 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....       | 101 |
| Çizelge 10.14 | 3 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                       | 101 |
| Çizelge 10.15 | 3 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....       | 102 |
| Çizelge 10.16 | 3 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....                  | 102 |

|               |                                                                               |     |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 10.17 | 4 No'lu Deney Sonuçları .....                                                 | 105 |
| Çizelge 10.18 | 4 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....    | 106 |
| Çizelge 10.19 | 4 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                    | 106 |
| Çizelge 10.20 | 4 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....    | 107 |
| Çizelge 10.21 | 4 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....               | 107 |
| Çizelge 10.22 | 5 No'lu Deney Sonuçları .....                                                 | 109 |
| Çizelge 10.23 | 5 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....    | 110 |
| Çizelge 10.24 | 5 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                    | 111 |
| Çizelge 10.25 | 5 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....    | 111 |
| Çizelge 10.26 | 5 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....               | 112 |
| Çizelge 10.27 | 6 No'lu Deney Sonuçları .....                                                 | 114 |
| Çizelge 10.28 | 6 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....    | 115 |
| Çizelge 10.29 | 6 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                    | 115 |
| Çizelge 10.30 | 6 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....    | 116 |
| Çizelge 10.31 | 6 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....               | 116 |
| Çizelge 10.32 | 7 No'lu Deney Sonuçları .....                                                 | 118 |
| Çizelge 10.33 | 7 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....    | 119 |
| Çizelge 10.34 | 7 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                    | 119 |
| Çizelge 10.35 | 7 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....    | 120 |
| Çizelge 10.36 | 7 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....               | 120 |
| Çizelge 10.37 | 8 No'lu Deney Sonuçları .....                                                 | 122 |
| Çizelge 10.38 | 8 No'lu Deney için Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ..... | 123 |
| Çizelge 10.39 | 8 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                    | 123 |
| Çizelge 10.41 | 8 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....               | 124 |
| Çizelge 10.42 | 9 No'lu Deney Sonuçları .....                                                 | 126 |
| Çizelge 10.43 | 9 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....    | 127 |
| Çizelge 10.44 | 9 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                    | 127 |
| Çizelge 10.45 | 9 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....    | 128 |
| Çizelge 10.46 | 9 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları .....               | 128 |
| Çizelge 10.47 | 10 No'lu Deney Sonuçları .....                                                | 130 |
| Çizelge 10.48 | 10 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .....   | 131 |
| Çizelge 10.49 | 10 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                   | 131 |
| Çizelge 10.50 | 10 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....   | 132 |
| Çizelge 10.51 | 10 No'lu Deneyin Sayısal Analiz Sonuçları .....                               | 132 |

|               |                                                                            |     |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 10.52 | 11 No'lu Deney Sonuçları.....                                              | 134 |
| Çizelge 10.53 | 11 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...  | 135 |
| Çizelge 10.54 | 11 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                 | 135 |
| Çizelge 10.55 | 11 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...   | 136 |
| Çizelge 10.56 | 11 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 136 |
| Çizelge 10.57 | 12 No'lu Deneyden Elde Edilen Sonuçlar .....                               | 138 |
| Çizelge 10.58 | 12 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...  | 139 |
| Çizelge 10.59 | 12 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                 | 139 |
| Çizelge 10.60 | 12 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...   | 140 |
| Çizelge 10.61 | 12 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 140 |
| Çizelge 10.62 | 13 No'lu Deney Sonuçları .....                                             | 142 |
| Çizelge 10.63 | 13 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...  | 143 |
| Çizelge 10.64 | 13 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                 | 143 |
| Çizelge 10.65 | 13 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...   | 144 |
| Çizelge 10.66 | 13 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 144 |
| Çizelge 10.67 | 14 No'lu Deney Sonuçları .....                                             | 146 |
| Çizelge 10.68 | 14 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...  | 147 |
| Çizelge 10.69 | 14 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                 | 147 |
| Çizelge 10.70 | 14 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...   | 148 |
| Çizelge 10.71 | 14 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 148 |
| Çizelge 10.72 | 15 No'lu Deney Sonuçları .....                                             | 150 |
| Çizelge 10.73 | 15 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...  | 151 |
| Çizelge 10.74 | 15 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                 | 151 |
| Çizelge 10.76 | 15 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 152 |
| Çizelge 10.77 | 16 No'lu Deney Sonuçları .....                                             | 154 |
| Çizelge 10.78 | 16 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...  | 155 |
| Çizelge 10.79 | 16 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                 | 155 |
| Çizelge 10.80 | 16 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri..    | 156 |
| Çizelge 10.81 | 16 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 156 |
| Çizelge 10.82 | 17 No'lu Deney Sonuçları.....                                              | 158 |
| Çizelge 10.83 | 17 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .... | 159 |
| Çizelge 10.84 | 17No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                  | 159 |
| Çizelge 10.85 | 17 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...   | 160 |
| Çizelge 10.86 | 17 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....            | 160 |

|                |                                                                              |     |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 10.87  | 18 No'lu Deney Sonuçları.....                                                | 162 |
| Çizelge 10.88  | 18 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri..      | 163 |
| Çizelge 10.89  | 18 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 163 |
| Çizelge 10.90  | 19 No'lu Deney Sonuçları.....                                                | 165 |
| Çizelge 10.92  | 19 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...     | 166 |
| Çizelge 10.93  | 19 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 166 |
| Çizelge 10.95  | 20 No'lu Deney Sonuçları.....                                                | 168 |
| Çizelge 10.97  | 20 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri...     | 169 |
| Çizelge 10.98  | 20 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 169 |
| Çizelge 10.99  | 21 No'lu Deney Sonuçları .....                                               | 171 |
| Çizelge 10.100 | 21 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Değişkenleri...       | 172 |
| Çizelge 10.101 | 21 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 172 |
| Çizelge 10.102 | 22 No'lu Deney Sonuçları .....                                               | 174 |
| Çizelge 10.103 | 22 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....     | 175 |
| Çizelge 10.104 | 22 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 175 |
| Çizelge 10.105 | 23 No'lu Deney Sonuçları .....                                               | 177 |
| Çizelge 10.106 | 23 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....     | 178 |
| Çizelge 10.107 | 23 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 178 |
| Çizelge 10.108 | 24 No'lu Deney Sonuçları .....                                               | 180 |
| Çizelge 10.109 | 24 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....     | 181 |
| Çizelge 10.110 | 24 No'lu Deneyin Sayısal Analizinden Elde Edilen Sonuçlar .....              | 181 |
| Çizelge 10.111 | 25 No'lu Deneyde E8 Noktasının Düşey Yerdeğişimi .....                       | 184 |
| Çizelge 10.112 | 25 No'lu Deneyde E2 Noktasının Düşey Yerdeğişimi .....                       | 184 |
| Çizelge 10.113 | 25 No'lu Deneyde E9 Noktasının Düşey Yerdeğişimi .....                       | 184 |
| Çizelge 10.114 | 25 No'lu Deneyde E20 Noktasının Düşey Yerdeğişimi .....                      | 185 |
| Çizelge 10.115 | 25 No'lu Deneyde E21 Noktasının Düşey Yerdeğişimi .....                      | 185 |
| Çizelge 10.116 | 25 No'lu Deneyde LPT Ölçümü İle Alınan Boru<br>Kesiti Düşey Deplasmanı ..... | 185 |
| Çizelge 10.117 | 25 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ...    | 186 |
| Çizelge 10.118 | 25 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları.....                   | 186 |
| Çizelge 10.119 | 25 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Değişkenleri       | 187 |
| Çizelge 10.120 | 25 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....              | 187 |
| Çizelge 10.121 | 25 No'lu Deneyin 3D Sayısal Analizi.....                                     | 189 |
| Çizelge 10.122 | 26 No'lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi .....                            | 192 |

|                |                                                                                              |     |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 10.123 | 26 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .                      | 193 |
| Çizelge 10.124 | 26 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                                  | 193 |
| Çizelge 10.125 | 26 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .                      | 193 |
| Çizelge 10.126 | 26 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....                              | 194 |
| Çizelge 10.127 | 26 No'lu Deneyde Saptanan Deplasmanların 3D Sayısal Analizi .....                            | 196 |
| Çizelge 10.128 | 27 No'lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi .....                                            | 199 |
| Çizelge 10.129 | 27 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler .                      | 199 |
| Çizelge 10.130 | 27 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                                  | 200 |
| Çizelge 10.131 | 27 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .                      | 200 |
| Çizelge 10.132 | 27 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....                              | 201 |
| Çizelge 10.133 | 27 No'lu Deneyde Boru Kesitinde Oluşan Deplasmanların<br>Sayısal Analizleri.....             | 203 |
| Çizelge 10.135 | 28 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ..                     | 206 |
| Çizelge 10.136 | 28 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                                  | 207 |
| Çizelge 10.137 | 28 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri ..                     | 207 |
| Çizelge 10.138 | 28 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....                              | 208 |
| Çizelge 10.139 | 28 No'lu Deneyin Sayısal Analiz Sonuçları .....                                              | 210 |
| Çizelge 10.140 | 29 No'lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi .....                                            | 213 |
| Çizelge 10.141 | 29 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ..                     | 213 |
| Çizelge 10.142 | 29 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                                  | 214 |
| Çizelge 10.143 | 29 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan<br>Malzeme Özellikleri.....                | 214 |
| Çizelge 10.144 | 29 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....                              | 215 |
| Çizelge 10.145 | 29 No'lu Deneyde Boru Kesitinde Oluşan<br>Deplasmanların Sayısal Analizleri.....             | 217 |
| Çizelge 10.146 | 30 No'lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi .....                                            | 220 |
| Çizelge 10.147 | 30 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler ..                     | 220 |
| Çizelge 10.148 | 30 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları .....                                  | 221 |
| Çizelge 10.149 | 30 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri ...                    | 221 |
| Çizelge 10.150 | 30 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları.....                              | 222 |
| Çizelge 10.151 | 30 No'lu Deneyde Omuz ve Bel Bölgelerindeki<br>Düşey Yerdeğişimlerinin Sayısal Analizi ..... | 224 |

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, düşey ve yanal yükler etkisinde kalan üç farklı çaptaki HDPE borunun farklı geri dolgu ortamlarında ve farklı yerleştirme biçimlerindeki davranışı laboratuvar ortamında hazırlanan bir deney sisteminde incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, boru içerisine 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 215°, 270° ve 315°'lere yapıştırılan biçim değiştirme ölçerler, düşey ve yanal eksenlere konuşturulan doğrusal yer değişimi ölçerler ve yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılmıştır. Koşulları kabul edilerek yapılan deneysel çalışmalarda, yükleme sistemi için hava basıncı ile çalışan membran yastıklardan yararlanılmıştır. Deneysel çalışmaların G.Iowa Amprik Yönteminde ve PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D TUNNEL sonlu elemanlar programları kullanılarak sayısal çözümlemeleri yapılmıştır. Deneysel, sayısal ve fotogrametrik sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış, hendek ortamında yer alan bir esnek borunun farklı koşullar altındaki davranışı kapsamlı olarak incelenmiştir.

Çalışmalarımın başlangıcından son adımına kadar bana yardımcı olan tez danışmanım, Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM'a, Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a ve Prof. Dr. Gökhan BAYKAL'a teşekkür ederim. Zeminlerin mikro dokusunun belirlenmesi sürecinde gördüğüm kıymetli yardımları için Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM'a, Sonlu Elemanlar Analizlerinde yol gösterimleri ve tecrübelerinin çok faydalandığım Yrd. Doç. Dr. Havvanur KILIÇ ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e de teşekkür ederim. SOLID WORKS modellemelerinde bana yol gösteren Makine Mühendisliği Bölümünden Öğr. Gör. Dr. Tamer KEPÇELER'e, Öğr. Gör. Dr. Ersun YALÇIN'a ve Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER'e, LABVIEW yazılımlarında deneyim ve emeklerini benimle paylaşan Fizik Mühendisi Salih ŞAHİN ve YARGEM ekibine de ayrıca teşekkür ederim.

Elbette arkadaşlıkları ile candan dostlukları ile bana unutamayacağım güzel anılar kazandıran Arş. Gör. Dr. Murat TONAROĞLU'a, Arş. Gör. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER'e, Arş. Gör. Murat SELÇUK'a, Arş. Gör. Tayfun ŞENGÜL'e ve Arş. Gör. Çiğdem ÖZÇELİK'e de çok teşekkür ederim. Çalışmalar için projeye mali destek sağlayan TUBİTAK kurumuna ve YTÜ'de doktora eğitimi alabilmem için yardımcı olan görevli olduğum kurumum Aksaray Üniversitesi'nde ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak bana verdikleri emekleri saymakta aciz kaldığım aileme, müşfik ve necip annem Halide TERZİ'ye, gönül dünyamın mimarı muhterem ve aziz babam Mehmet TERZİ'ye, fedakar ağabeyim Cemalettin TERZİ'ye, naif, nazenin, birtane ablam Ayperi KABAKBAŞ'a, kadirşinas eniştem Mazlum KABAKBAŞ'a, canberaber yiğenlerim Emre, Burcu, Melike ve Bera'ya da şükran duygularımı sunarım.



## ÖZET

Günümüzde doğal enerji kaynaklarının taşınmasında, su ve kanalizasyon sistemleri vb. bir çok uygulamada polietilen esaslı HDPE esnek borular gün geçtikçe daha fazla oranda kullanılmaktadır. Ancak özellikle esnek boruların hendek ortamındaki davranışları ve farklı geri dolgu ve yükleme şartlarındaki duraylılıkları tam olarak aydınlatılamamıştır. YTÜ Geoteknik laboratuvarlarında bu amaçla hendek ortamını modelleyen bir deney sistemi kurulmuştur. Deneylerde 200,242 ve 312 mm çaplarında olan üç farklı HDPE borunun, çakıl ve kum geri dolgu ortamlarında ve düşey, yanal yükleme koşullarındaki davranışları incelenmiştir. 50x70x70 cm boyutlarında tasarlanan deney tankında yüklemeler için şişebilen membranlar kullanılmıştır. 500 kPa yük seviyesine kadar 10 kPa'lık artış adımlarında uygulanan yüklemeler altında ortaya çıkan şekil değişimlerini saptayabilmek için, boru iç yüzeyine  $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 180^{\circ}, 225^{\circ}, 270^{\circ}, 315^{\circ}$  ve  $360^{\circ}$  noktalarına yapıştırılan biçim değiştirme ölçer rozetler ve düşey yanal eksenlerde doğrusal yer değişimi ölçerler kullanılmıştır. Bunun yanında deney kutusunun pleksiglas şeffaf camdan imal edilen ön yüzeyinden fotogrametrik ölçümler alınmış ve boru davranışı yüksek çözünürlüklü kameralar ile görüntülenmiştir. Deney kutusu ve yükleme adımları PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D TUNNEL programlarında modellenerek sonlu elemanlar sayısal analizleri yapılmıştır. Bunun yanında tasarımcılar tarafından sıklıkla kullanılan Geliştirilmiş Iowa Amprik Yöntemi ile de analizler yapılarak amprik, sayısal, fotogrametrik ve deneysel sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

## **ABSTRACT**

In recent years there has been increasing use for flexible pipes in many areas such as natural energy transportation pipelines, water distribution or waste water drainage systems etc. However, much of the soil-pipe behavior and pipe performance under various conditions has not been fully understood. In order to identify the complex soil-pipe interaction and pipe performance under different backfill and loading conditions, an experimental set up was designed at Yıldız Technical University Geotechnical Engineering Laboratory. Experiments were performed in a soil box which simulated a flexible buried pipe in trench conditions. Dry and poorly graded sand as backfill material and three HDPE buried pipes, diameters ranging between 200-312 mm were used in the investigation.

A comprehensive study was carried out to determine the effect of backfill installation, backfill relative density and loading conditions on the pipe deformation and pipe stability. Furthermore, backfill materials have been placed to the soil box at different void ratios to provide different relative densities. Loadings were applied with increments of 10 kPa up to 300-500 kPa in vertical axis using an air pressure membrane. At each loading step vertical and horizontal deformations at pipe cross section were measured by means of Linear Position Transducers. The experimental set up have been modeled by utilizing finite element analysis program named PLAXIS 2D and PLAXIS 3D TUNNEL programs. Modified Iowa Empirical Methods have been used to determination of the pipe deflections under various conditions. Experimental and numerical solutions are compared in order to evaluate the soil pipe interaction problem.

## 1. GİRİŞ

Gömülü esnek boruların davranışları üzerine yapılan ilk ve en önemli araştırma olarak Spangler'in 1941 yılında yayınladığı "Esnek Boruların Tasarımı" isimli çalışması kabul edilmektedir. Spangler uzun süreli arazi deneyleri ve gözlemleri sonrasında geliştirdiği yarı amprik eşitliğinde gömülü esnek boruların yük altındaki davranış biçimlerinin ve deformasyon büyüklüklerinin saptanabileceğini öne sürmüştür. Temelde, Marston'un (1913) rijit borular için geliştirdiği diferansiyel denklemlerini, Cain'in (1929) dolgu yükü hipotezlerini ve arazi deneylerinden elde edilen gözlemsel tecrübeleri kullanarak türettiği basit amprik yaklaşımına "Iowa Eşitliği" ismini vermiştir. Iowa Eşitliği halen güncelliğini korumakta ve yürütülen akademik çalışmalara temel teşkil etmektedir. İlerleyen yıllarda Spangler ve ekibi, eşitlik üzerinde bazı değişiklikler ve ilaveler yapmışlar ve Iowa Eşitliği ismini, "Geliştirilmiş Iowa Eşitliği" olarak değiştirmişlerdir.

1960'lı yıllarda Spangler ve ekibinin gözlemlere dayalı olarak türettikleri yarı amprik yaklaşımlara ek olarak bütünüyle sayısal temellere dayalı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Bu türden çalışmalar içerisinde en çok bilineni, Richard&Burns (1964) Elastik Çözüm Yöntemidir. Richard&Burns, Midlin'in (1962) sonsuz elastik bir ortamdaki elastik bir borunun düşey yüklemeler altındaki davranışını araştırdığı sayısal açılımlarından yararlanmışlardır. Elastik Yöntemlerden bir başkası Hoeg (1968) tarafından geliştirilen Hoeg Elastik Çözüm Yöntemidir. Hoeg, Richard & Burns Yöntemine'e benzer olarak çembersel elastik bir borunun tam elastik bir zemin ortamındaki davranışını belirlemektedir.

1970'li yıllardan başlayarak kullanımı hızla yaygınlaşan polietilen türü esnek boruların viskoelastik termoplastik özelliklerinin boru davranışına olan etkisinin gözününe alınması gerektiği anlaşılmıştır. Bu amaçla Chua (1986), Ahn (1998) ve benzeri araştırmacılar tarafından boruların viskoelastik ve termoplastik özelliklerini yansıtan değişkenlerinin eşitliklerde yer aldığı yeni yöntemler geliştirilmiştir.

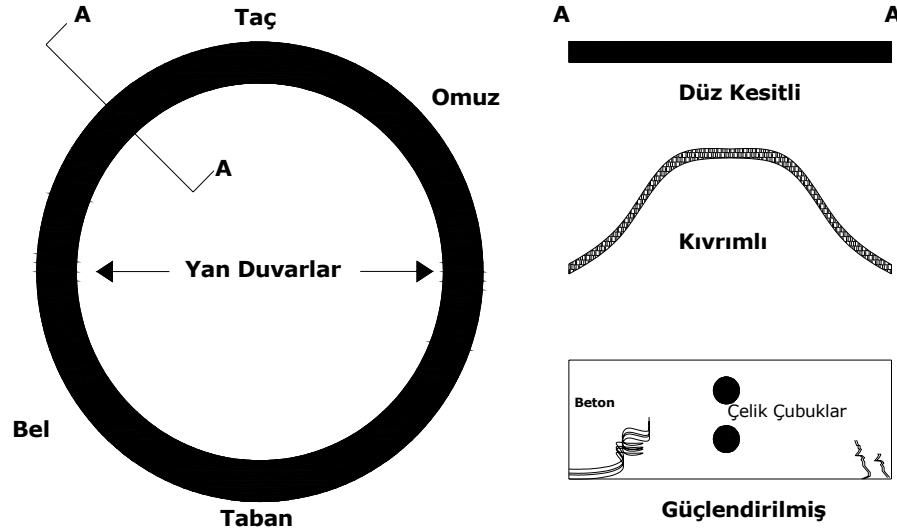
Zamanla gömülü esnek boruların tasarımlarında, amprik, elastik ve viskoplastik yöntemler yanında mühendisliğin birçok dalında kullanılan sonlu elemanlar sayısal analiz yöntemleri de kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle bilgisayar teknolojisindeki yazılım ve donanım sistemlerinin güçlenmesi, sonlu elemanlar sayısal analiz yöntemlerinin kullanıldığı ticari paket programların yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır.

1950'lerden bu yana birçok analiz yöntemi geliştirilse de, zemin yapısındaki düzensizlikler, yükleme koşullarındaki farklılıklar, uç noktalarda olabilen sıcaklık değerleri gibi kontrolü güç değişkenlerin beklenmedik etkileri boru davranışının saptanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerle araştırma merkezlerinde boru-zemin ilişkisini aydınlatmak ve yeni tasarım yöntemleri geliştirebilmek amacıyla teorik ve deneysel çalışmalar yürütülmektedir. Arazi deneyleri araştırmacılara en kesin sonuçları sağlayabilse de zaman, maliyet ve deney şartlarının değiştirilebilme zorlukları gibi olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Bu bakımdan son yıllarda yürütülen araştırmalar büyük oranda arazi ortamını yansıtan laboratuvar deneyleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Sonsuz bir ortamı modelleyen çok büyük deney tankları, hendek ortamını modelleyen hendek biçimli deney kutuları, boru çemberindeki radyal gerilmeleri saptayabilen basınç hücreleri ve çok amaçlı santrifüj deneyleri laboratuvar ortamlarında arazi koşullarını büyük oranda yansıtmayı başarabilen deney teknikleridir.

Bu çalışma kapsamında; hendek ortamına yerleştirilmiş gömülü HDPE esnek boruların farklı yükleme biçimleri ve farklı geri dolgu malzemelerindeki davranışı kapsamlı bir çalışma içerisinde araştırılmıştır. Arazi koşulları ve tasarım kriterleri gözönüne alınarak laboratuvar ortamında tasarlanan bir deney kutusu üzerinde üç farklı çap ve et kalınlığındaki HDPE esnek borunun davranışı incelenmiştir. Farklı geri dolgu (çakıl ve kum) ve yükleme biçimlerinde yerleştirilmiş gömülü borularda ortaya çıkan düşey yatay eksenlerdeki yerdeğiştirmeler ve şekil değişimleri doğrusal yerdeğişimi ölçerler, biçim değişimi ölçerler ve fotogrametrik görüntüleme aygıtları kullanılarak saptanmıştır. Yükleme sistemi ve deney koşulları 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar sayısal analiz programlarında modellenerek sonuçları deney verileri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. GÖMÜLÜ BORULARA İLİŞKİN TEKNİK BİLGİLER

En basit ve yaygın üretim biçimiyle, çembersel bir borunun geometrisi Şekil 2.1’ de görülmektedir.



Şekil 2.1 Gömülü Borularda Kullanılan Teknik Terimler (Bashir, 2000)

Boru kesitinde, taç ile yan duvarlar arasında kalan kısma, omuz, taban ile yan duvarlar arasında kalan kısma ise, bel denilebilir. Boru duvarları Şekil 2.1’de görüldüğü gibi düz kesitli, kıvrımlı veya kompozit biçimlerde üretilebilir. En genel değerlendirmede bir boruda beş temel mühendislik özelliği bulunur. Bunlar;

$E$  = Boru malzemesinin Young Modülü

$\nu$  = Poisson Oranı

$I$  = Atalet Momenti

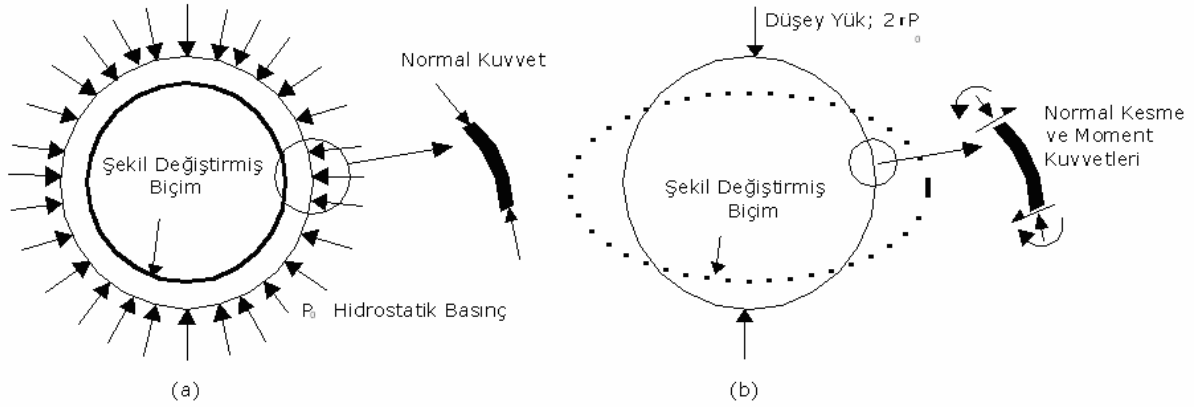
$A$  = Kesit Alanı

$r$  = Yarıçapı

$D$  = Boru Çapı

Bu beş temel özelliğin belirlediği borunun eğilme rijitliği ( $EI/D^2$ ) ve borunun çembersel rijitliği ( $EI/D^3$ ) yüklemeler altında boru davranışını belirleyen özelliklerdir. Örneğin boru “ $t$ ” et kalınlığında düzgün kesitli ise birim uzunluk için alanı  $A = t$  ve atalet momenti  $I = t^3/12$  olacaktır. Eğer et kalınlığı  $t$ , 1 cm den daha küçük olursa, atalet momenti çok küçülecek ve

boru dayanımı büyük oranda kaybolacaktır. Bu tür durumlar için küçük et kalınlıklarında yüksek atalet momentleri sağlayabilmek amacıyla kıvrımlı duvar kesitleri kullanılmaktadır. “h” kıvrım yüksekliğindeki bir duvar kesiti aynı et kalınlığındaki düz duvar kesitine oranla  $(h/t)^2$  kadar daha büyük bir eğilme rijitliğine sahip olabilecektir. Borular sahip oldukları eğilme ve çembersel rijitlikler etkisinde farklı biçimlerde deformasyon sergilerler. Uygulamalarda en çok karşılaşılan iki yükleme biçimi Şekil 2.2’de görülmektedir.

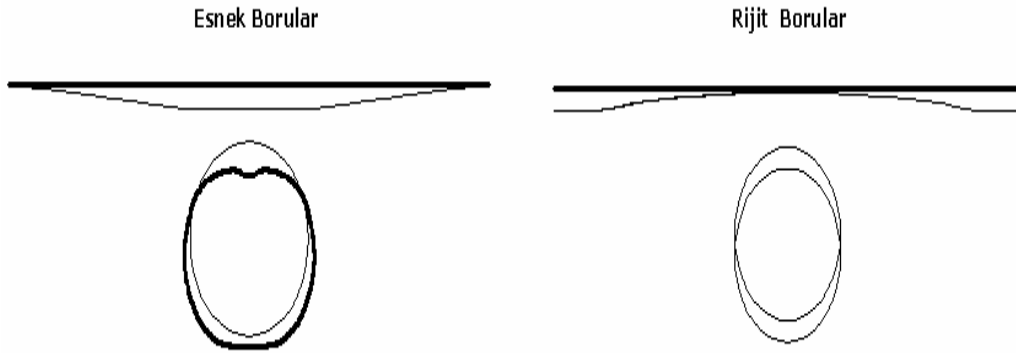


Şekil 2.2 Gömülü Esnek Boruların Yükleme Biçimleri (Laidlaw, 1999)

Şekil 2.2 a gösteriminde hidrostatik dış basınç etkisinde kalan bir esnek borunun çembersel şekil değiştirme biçimi görülmektedir. Genellikle iç veya dış basınçla (vakum) taşınabilen akışkanlarda kullanılan bu yöntemde, boru duvar kesitinde yalnızca çembersel normal gerilmeler görülür. Bu bakımdan borunun çembersel rijitliği şekil değişiminin belirlenmesinde etkili olur. Yükleme, tekil bir yük olarak esnek borunun tacından yüklendiği durumda; boru kesitinde ortaya çıkan şekil değişimi Şekil 2.2 b de görülmektedir. Boru duvarları elipsoit bir şekilde deformasyon gösterirken, duvar kesitlerinde normal kuvvetler, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri oluşur. Bu iki yükleme, şekil değiştirme biçimleri ve rijitlik faktörleri karşılaştırıldığında, hidrostatik yükleme etkisinde kalan bir borunun, tekil yükleme etkisinde kalan boruya göre daha yüksek bir performans ve dayanıma sahip olacağı anlaşılabılır. Hidrostatik yükleme etkisi ile şekil değiştirebilen bir boruda oluşan normal gerilmeler bütün duvar kesiti tarafından karşılanırken, tekil yük etkisinde kalan boruda çekme gerilmeleri sadece yan duvarlarda, basınç gerilmeleri ise yalnızca taç ve taban noktalarında ortaya çıkar. Tekil yüklemeler altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momentleri yan duvarlarda görülürken, burulmalar omuzlardan başlar. Diğer taraftan denetimsiz yataklamalar nedeniyle, boruların bel kısımlarında da beklenmedik aşırı gerilmelerin doğması olasıdır.

## 2.1 Rijit ve Esnek Boru Farklılıkları

Üretim teknikleri, kullanım amaçları ve gerilme şekil değiştirme davranışları bakımından gömülü borular rijit ve esnek borular olarak ikiye ayrılırlar. Rijit ve esnek boruların yük altında davranışı Şekil 2.3’de görüldüğü gibi birbirlerinden oldukça farklıdır. Rijit borular yükü boru tacından boru tabanındaki yataklama seviyesine aktararak yük taşıırken, esnek borular geri dolgunun pasif itkisinden yararlanarak yükü yan duvarlarından geri dolgu malzemesine iletirler. Bununla birlikte geri dolgu ve doğal zeminin birbirlerinden bağımsız göreceli hareketleri nedeniyle esnek borularda oturmalar boru tacının üzerinde oluşur. Rijit borularda ise oturmalar genellikle hendek kenarlarında görülür.

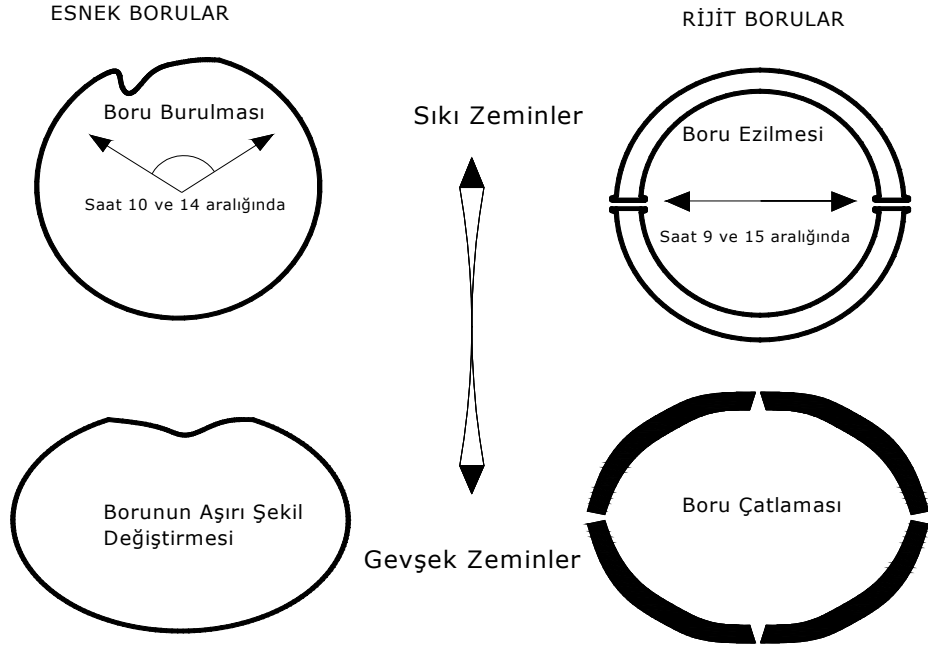


Şekil 2.3 Rijit ve Esnek Boruların Karşılaştırılması (Bashir, 2000)

Esnek ve rijit borular aşırı yüklemeler ardından kırılma biçimleri ile de birbirlerinden ayrılırlar. Şekli 2.4’de sıkı ve gevşek geri dolgu ortamlarında esnek ve rijit boruların aşırı şekil değişimleri gösterilmiştir. Sıkı zeminlerde rijit borular ezilme türü kırılmalar gösterirken, esnek borular burkulmaktadır. Geri dolgu malzemesinin gevşek yerleştirildiği durumlarda ise, esnek borular % 7’yi aşan aşırı şekil değiştirmeleri gösterirler. Gevşek geri dolgu ortamlardaki rijit borular ise çatlama türü kırılma biçimleri ile dayanımlarını kaybederler. Boruların şekil değişimi limitleri için, AWWA M.45 (1997) Amerikan Su İşleri Dairesi’nin önerdiği deformasyon sınır değerleri Çizelge 2.1’ de görülebilir.

Çizelge 2.1 AWWA M.45 (1997) 'in Önerdiği Şekil Değişirme Sınır Değerleri Oranları

| Boru Sınıfı | Şekil Değişirme Yüzdesi (%) |
|-------------|-----------------------------|
| Rijit       | 0.1 % (Boru Çapı)           |
| Yarı Rijit  | < 3.0 % (Boru Çapı)         |
| Esnek       | > 3.0 % (Boru Çapı)         |

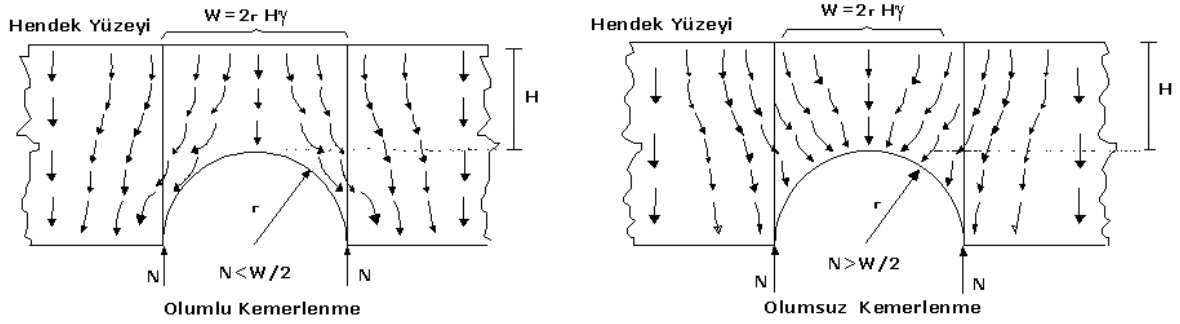


Şekil 2.4 Rijit ve Esnek Borularda Görülen Göçme Biçimleri (Wang, 2002)

## 2.2 Kemerlenme Etkisi

Hendek ortamındaki bir gömülü boru gözönüne alındığında, üç farklı malzemenin boru-zemin davranışını belirlediği görülebilir. Bunlar, gömülü esnek boru, kullanılan geri dolgu malzemesi ve doğal zemin ortamıdır. Bu üç malzemenin de birbirlerinden farklı mühendislik özelliklerde ve farklı rijitliklere sahip bulunmaları nedeniyle yüklemeler altında farklı şekil değişimleri sergilerler. Özellikle boru üzerindeki geri dolgu malzemesi ile boru yan duvarları üzerindeki malzeme arasındaki göreceli hareketler başlangıçta hendek ortamında bulunmayan yeni kayma gerilmelerinin doğmasına neden olur. Şekil 2.6 görüldüğü gibi, boru tacı üzerinde oluşan kemerlenme etkisinin niteliği ve etki derecesi açısından, oluşan yeni kayma gerilmelerinin büyüklüğü ve yönü önemlidir.

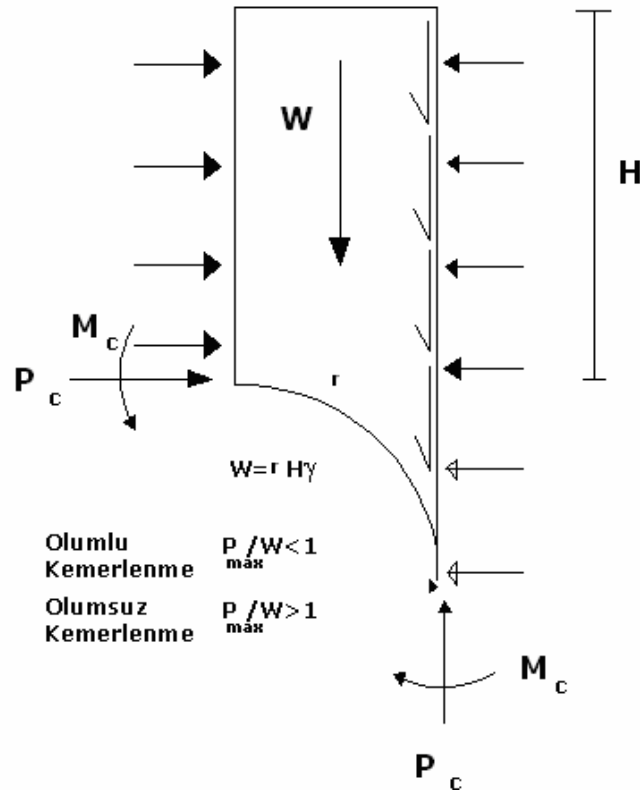




$N$  = Boru duvarlarında oluşan normal kuvvet

Şekil 2.5 Olumlu ve Olumsuz Kemerlenme Durumlarının Oluşum Biçimleri (Bashir, 2000)

Hendek ortamlarındaki bir gömülü boruda kemerlenme mekanizması oturmalar göz önüne alındığında Şekil 2.5 görüldüğü gibi iki değişik biçimde olabilir. Bunlar, Olumlu Kemerlenme (Pozitif Projeksiyon) ve Olumsuz Kemerlenme (Negatif Projeksiyon) durumlarıdır. Olumlu kemerlenme durumunda yan yüzeyler boru üstündeki dolgudan daha az oturma göstermekle boru tacı düzlemindeki yükü hafifletir. Olumsuz kemerlenmede ise bu olayın tam tersi ortaya çıkar ve boru tacı düzlemindeki yük normalden daha büyük değerlerde oluşur.



Şekil 2.6 Farklı Kemerlenme Durumlarındaki Gerilme Dağılımları (Masada 1996)

Kemerlenme etikisinin büyüklüğü ve yük seviyesindeki azaltma veya arttırma oranının belirlenmesi konusunda birçok araştırma yapılmıştır. AASTHO tarafından önerilen ve tasarımda en fazla kullanılan Düşey Kemerlenme Faktörü (DKF) bağıntısı, en yaygın kabul gören yaklaşımdır.

$$N = P r \text{ (DKE)} \quad (2.1)$$

$N$  ; Boru duvarında oluşan normal kuvvet

$P$  ; Boru tacı üzerinde bulunun geri dolgu malzemesi yükü

$r$  ; Boru yarıçapı

$$DKE = 0.76 - 0.71 \left( \frac{S_H - 1.17}{S_H + 2.92} \right), \text{ eşitlikte yer alan;} \quad (2.2)$$

$$S_H = \frac{M_s r}{E_p A} \text{ olup;} \quad (2.3)$$

Burada;

$M_s$  ; Geri dolgu malzemesinin bir boyutlu Sıkışma Modülü

$E_p$  ; Boru Malzemesinin Young Modülü

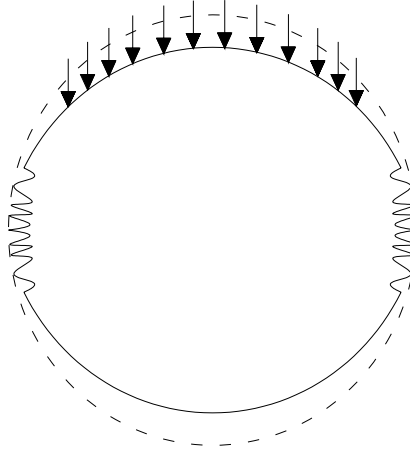
$A$  ; Borunun kesit alanıdır.

### 2.3 Esnek Boruların Göçme Biçimleri

Gömülü borular için göçme tanımı, “kendisinden beklenen hizmet amacını ve kalitesini gösteremez hale gelmesi” olarak yapılabilir. Gömülü borularda çok farklı şekillerde göçmeler ortaya çıkabilir. Özellikle plastik borularda göçme kriterleri ve performans sınırları, borudaki açısıl gerilmelere, şekil değiştirmelere, burulma ve burkulmalara bağlıdır. Esnek borularda uygulamada en çok görülen sekiz temel göçme şekli bulunmaktadır. Bunlar aşağıda açıklanmaktadır.

#### 2.3.1 Boru duvarlarının ezilmesi

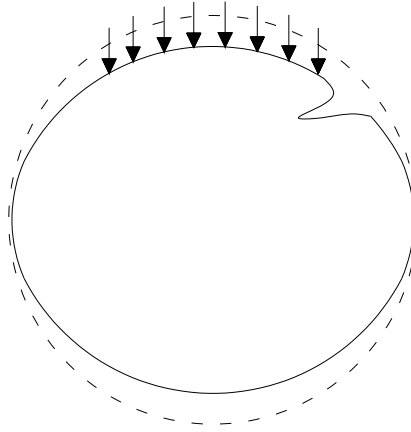
Boru yan duvarların ezilmesi türündeki bu göçme mekanizması, genellikle yüksek çembersel rijitlikte olan borularda görülmektedir. Borunun yerleştirilme derinliği ve geri dolgu malzemesinin sıkılığı arttıkça yüksek ve tekrarlı gerilmeler altında bu türden bir göçme mekanizmalarının oluşma olasılığı artmaktadır. Boru tacından etkiyen düşey yüklerin boru duvarları tarafından taşınamaması durumunda Şekil 2.7 deki ezilme biçiminde göçmeler ortaya çıkar (Moser, 2001).



Şekil 2.7 Esnek Boruların Ezilme Biçimi

### 2.3.2 Boru Duvarlarının Burkulması

Şekil 2.8 görülen türde ortaya çıkan göçme mekanizması, genellikle düşük rijitliğe sahip borularda görülmektedir. Özellikle basınçlı borularda yüksek iç basınçlarda burkulma tipi göçmelerin ortaya çıkma olasılığı artmaktadır. Kinenow ve Prevost, (1989) borularda burkulma türü göçmelerin oluşmaması için gerekli en küçük boru rijitliği ve kritik burkulma basıncını hesaplayan bir eşitlik türetmişlerdir.



Şekil 2.8 Esnek Boruların Burkulma Biçimi

$$P_{cr} = \frac{E t^3}{4(1-\nu^2) D^3} \quad (2.4)$$

Eşitlikte,

$P_{cr}$  ; Kritik burkulma basıncı

$E$  ; Boru Malzemesinin Young Modülü

$D$  ; Boru Malzemesinin ortalama dış çapı

$\nu$  ; Boru Malzemesinin Poisson oranı

$t$  ; Boru et kalınlığı

Bu eşitliğin yanı sıra, sıklıkla kullanılmayan ancak standartlarda yer alan Meyerhof ve Baikke (1963)'ün kritik burulma basıncını belirlemeye yönelik bir çalışmaları da bulunmaktadır.

$$P_{cr} = 2 \sqrt{\frac{E'}{1-\nu} \left( \frac{EI}{D^3} \right)} \quad (2.5)$$

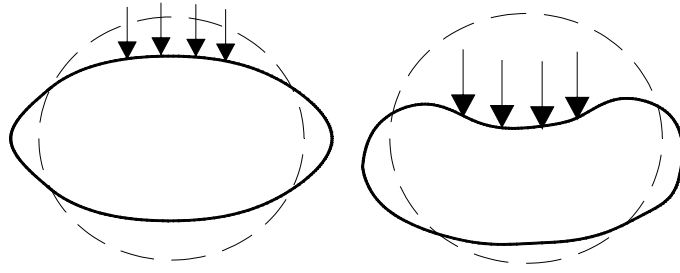
Burada;

$E'$  ; Zeminin Young Modülü

$I$  ; Borunun atalet momenti büyüklüğüdür.

### 2.3.3 Boru Kesitinin Aşırı Şekil Değiştirmesi

Termoplastik ve plastik borular yük altında kırılma ve çatlama göstermeksizin büyük deformasyonlara dayanabilirler. Örneğin polietilen borulara göre daha gevrek davranış gösteren PVC borular bile % 30 şekil değişimleri altında servis kalitelerini devam ettirebilirler (McGraft, 2005). Borularda deformasyon sınırları kullanım bölgeleri, yerleştirilme amaçları, ilettikleri akışkan özellikleri ve debi limitlerine göre değişmektedir. ASTM D 3034 standartlarına göre esnek borularda en fazla deformasyon yüzdesi % 7.5 olarak kabul edilmiştir. Şehir için dağıtım hatlarında ise bu değerin en fazla % 5 olarak tutulmasını önermektedir (Suleiman, 2002).



Şekil 2.9 Esnek Boruların Aşırı Deformasyon Biçimleri (Suleiman 2002)

Şekil 2.9’da aşırı deformasyonlar sonucunda borularda oluşabilecek geometrik bozulmalar görülmektedir. Boruda görülebilen aşırı deformasyonlar, geometrik uygunluğu bozması yanında enkesit alanının daralması nedeniyle debi miktarının düşmesi sonucunu ortaya çıkarabilir.

#### 2.3.4 Normal ve Kayma Şekil Değişimleri

Derin hendek koşullarında yerleştirilmiş ve gevrek davranış gösteren borularda şekil değişimleri, boru duraylılığını belirleyen etmenlerden biridir. Moser (2001) borularda şekil değişimlerini aşağıdaki eşitliklerde tanımlamaktadır.

$$\varepsilon_b = 6 \left( \frac{t}{D} \right) \left( \frac{\Delta y}{D} \right) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_c = \left( \frac{P_v D}{2tE} \right) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_p = \left( \frac{P_i D}{2tE} \right) \quad (2.8)$$

Burada;

$\Delta y$  = Düşey yönde meydana gelen kısalma

$D$  = Boru dış çapı

$\varepsilon_b$  = Boru çemberindeki deplasmanlardan doğan eğilme şekil değişimleri

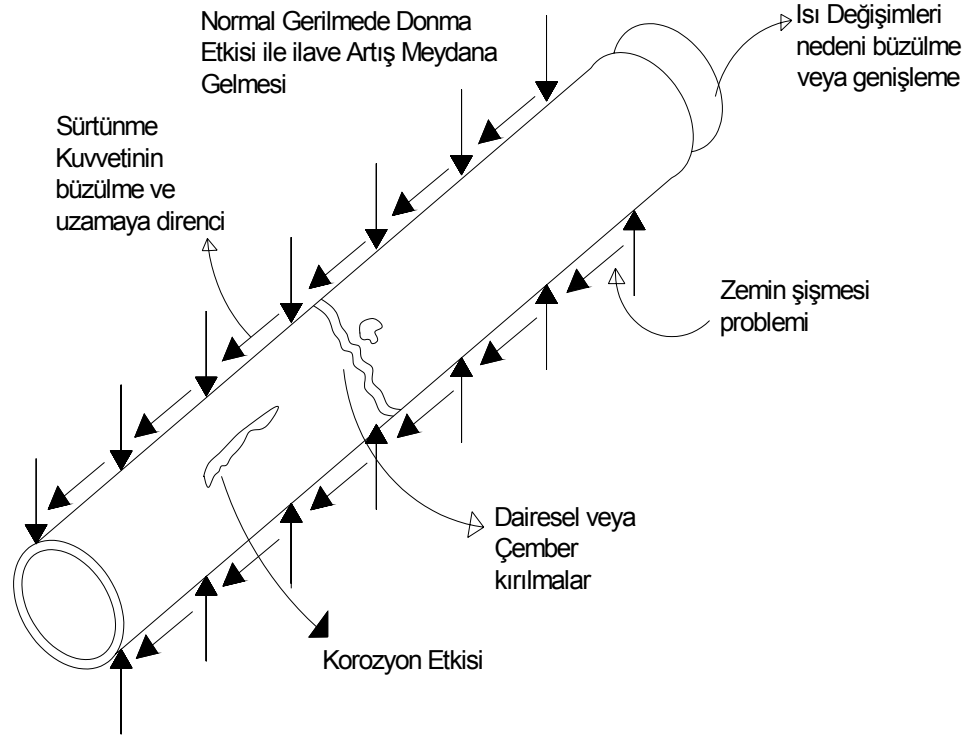
$\varepsilon_c$  = Dış basınç (düşey yükleme) gerilmelerinden doğan basınç şekil değişimleri

$\varepsilon_p$  = İç basınç (Vakum) gerilmelerinden doğan basınç şekil değişimleri

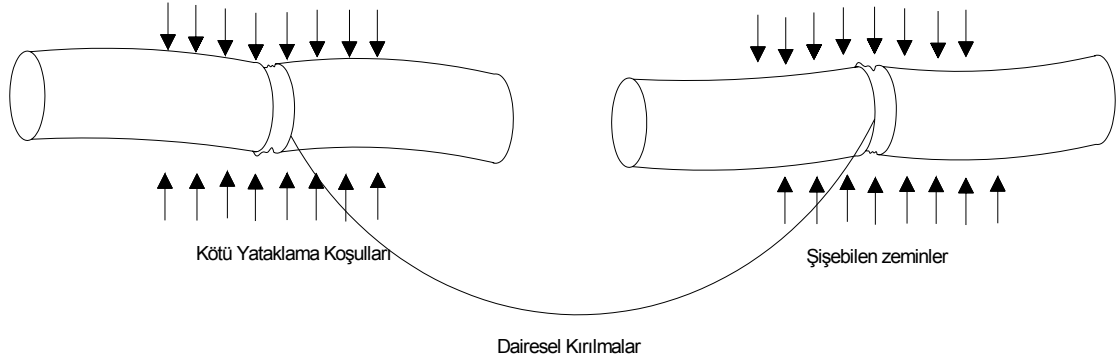
$P_v$  = Düşey basınç ve  $P_i$  = İç basınçtır.

### 2.3.5 Boyuna Doğrultudaki Gerilmeler

Gömülü boruların yük altındaki performansları, boylamsal duraylılıklarına da bağlıdır. Özellikle termoplastik borularda boyuna doğrultuda oluşabilecek kırılma ve göçme örneklerinden birkaçı Şekil 2.10 ve 2.11 görülmektedir.



Şekil 2.10 Borularda Görülebilen Boyuna Doğrultudaki Kırılma Türleri (Rajani Zhan, Kuraoka, 1995)



Şekil 2.11 Yetersiz Yataklama Nedeni ile Oluşabilen Kırılma Biçimleri (Rajani Zhan, Kuraoka, 1995)

### 2.3.6 İlave Kesme Kuvveti Yükleri

Boru hatları boyunca farklı zemin koşulları ile karşılaşılması çok doğaldır. Farklı zemin koşullarında borunun aynı performansını sağlayabilmesi için sürdürülebilir bir kalite kontrol mekanizmasının sağlanması ön koşuldur. Bununla beraber önceden kestirimi zor ek kesme kuvvetlerinin boru göçmelerine neden olması da söz konusu olabilir. Örneğin hendek tabanında ani göçmelerin meydana gelerek yataklama seviyesinin kaybedilmesi, hendek ortamında oluşabilecek sızıntı etkisi ile erozyon oluşabilmesi veya bitkisel hareketlerin hendek ortamını bozabilmesi durumları söylenebilir (Moser 2001).

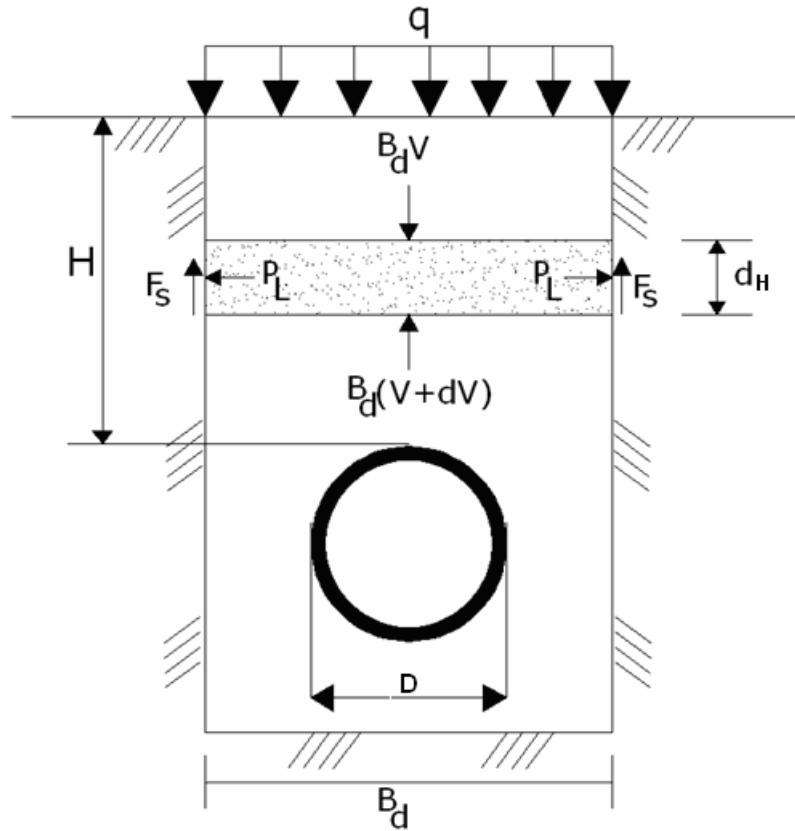
### 2.3.7 Yorulma Çatlakları

Gömülü boruların uzun dönemli servis sürelerinde, tasarım yüklerinin çok altındaki yüklerde bile göçmeler görülebilir. Göçme mekanizması tekrarlı yüklemeler etkisi ile yorulma çatlakları biçiminde başlar ve süregelen düşük ve tekrarlı gerilmeler altında gelişir (Moser,1990).

### 3. GÖMÜLÜ BORULARIN TASARIM YÖNTEMLERİ

#### 3.1 Marston Yük Teorisi (1913)

Gömülü borular konusunda yapılan ilk inceleme, “Marston Yük Teorisi” olarak bilinen kuramsal çalışmadır. Marston (1913), araştırmalarında hendek ortamına yerleştirilmiş çember kesitli bir rijit borunun düşey yüklemeler altında dayanım sınırlarını belirlemiştir. Terzaghi göçme hipotezinden yararlanarak geliştirdiği yük teoreminde, hendek içerisindeki geri dolgu malzemesi ile doğal zemin yüzeyleri arasında farklı oturmaların oluştuğunu ve ara yüzeylerdeki oturma farklılıklarının boru tacındaki yükleri belirlemede en etkili parametre olduğunu öne sürmüştür. Bu temel yaklaşımını sayısal terimlerle ispatlamak için, Şekil 1.3’de görüldüğü gibi, hendek kesitinde ince bir dilim tabakasını ( $d_H$ ) göze almış ve bu ince tabakanın alt, üst ve yan kesitlerindeki kuvvetleri limit denge prensibini kullanarak “0” a eşitlemiştir.



Şekil 3.1 Marston Hendek Kesiti



Şekil 3.1'deki hendek kesiti dikkate alındığında;  $d_H$  kalınlığındaki ince tabakadaki toplam düşey kuvvetlerin dengesinde;

$$\sum F_v = 0$$

$$B_d (V + dV) + 2F_s = B_d V \quad (3.2)$$

3.2 eşitliğinde;

$B_d$  = Hendek genişliği

$$F_s = P_L \mu' dH \quad (3.3)$$

$$P_L = K_a V \quad (3.4)$$

$$K_a = \tan^2 (45 - \emptyset/2) \quad (3.5)$$

$$\mu' = \tan \emptyset \text{ (Sürtünme katsayısı)} \quad (3.6)$$

3.2 eşitliğinin diferansiyel çözümünden;

$$\frac{dV}{V} = -2K\mu' \frac{dH}{B_d} \quad (3.7)$$

elde edilir.

3.7 bağıntısında, V yükü için  $q$ ; ve  $H = 0$  koşulları göz önünde tutulduğunda;

$$V = q \cdot (\exp)^{-2K\mu' \frac{H}{B_d}} \quad (3.8)$$

Eşitliği elde edilir.  $K_a$  ve  $\mu'$  değerleri için Çizelge 3.1'de görülen değişkenlerin kullanılması önerilmektedir.

Çizelge 3.1 Marston Yük Teorisinde Kullanılan K ve  $\mu$  Değerleri (Balkaya, 2004)

| Zemin Cinsi                                | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | Rankine<br>Katsayısı<br>(K) | Sürtünme<br>Katsayısı<br>( $\mu'$ ) |
|--------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Kısmen Sıkıştırılmış Nemli Bitkisel Toprak | 15                               | 0.33                        | 0.50                                |
| Suya Doygun Bitkisel Toprak                | 18                               | 0.37                        | 0.40                                |
| Kısmen Sıkıştırılmış Nemli Toprak          | 17                               | 0.33                        | 0.40                                |
| Suya Doygun Kil                            | 20                               | 0.37                        | 0.30                                |
| Kuru Kum                                   | 17                               | 0.33                        | 0.50                                |
| Islak Kum                                  | 20                               | 0.33                        | 0.50                                |

### 3.2 Iowa Eşitliği (1941)

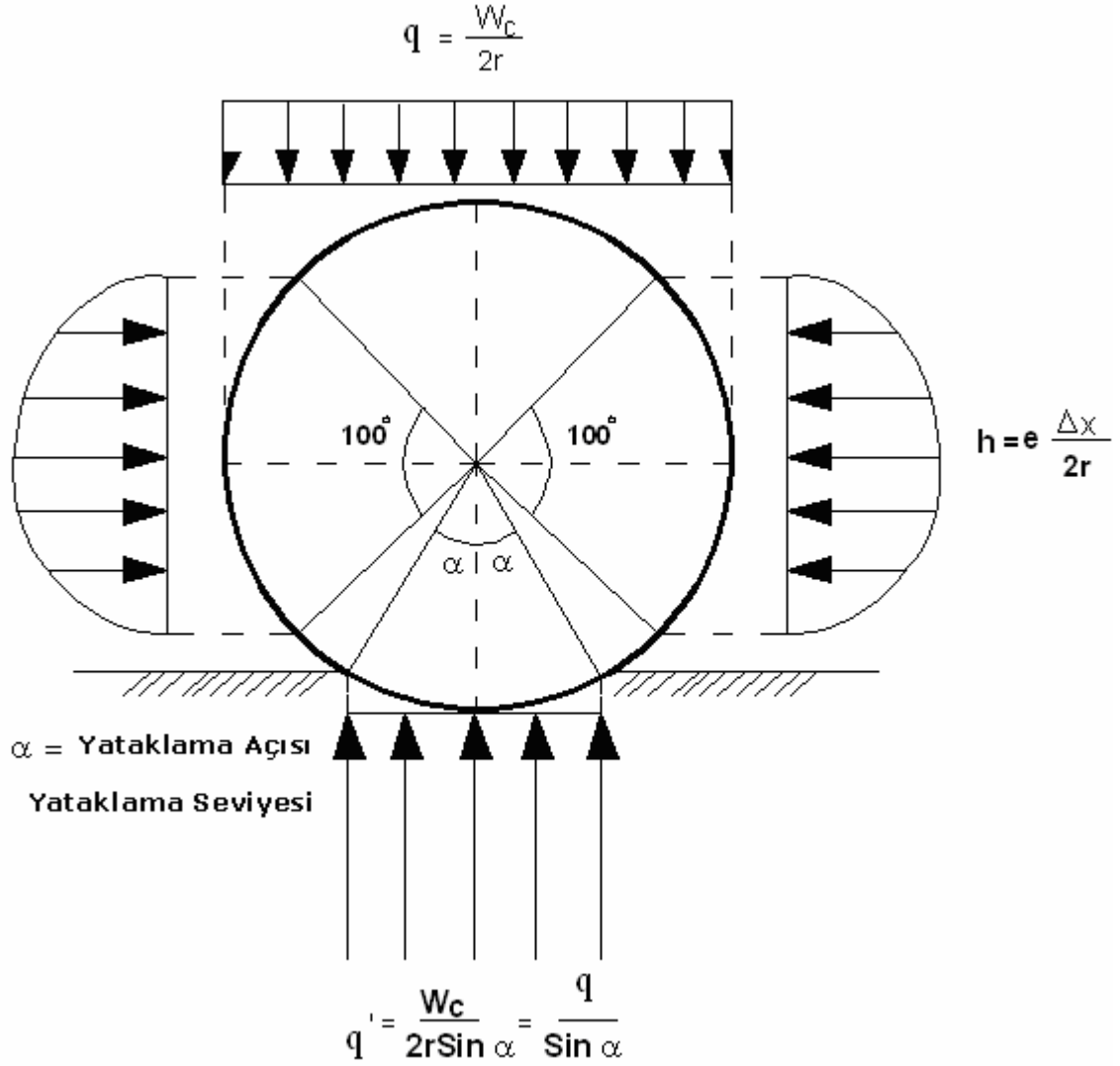
Marston Yük Teorisi, özellikle dökme türü üretilen ve tamamen rijit davranış gösteren boruların göçme sınırlarını belirlemek için geliştirilen ve deformasyon büyüklüğünü belirleyemeyen bir tasarım yöntemidir. Bu bakımdan Marston teoremi; kırılma ve göçme göstermeksizin % 25'e kadar deformasyon gösterebilen esnek boruların davranışlarını ve dayanımlarını saptamakta yetersiz kalmaktadır. Hendek ortamında yerleştirilen esnek boruların davranışlarını saptamaya yönelik ilk çalışma Spangler (1941) tarafından yapılmıştır. Spangler yük altında şekil değiştiren bir borunun yanal deformasyon oranını zemin ve boru rijitliklerinin birlikte belirlediğini öne sürmüştür.

$$\Delta x = \frac{\text{Yükleme}}{\text{Boru Özellikleri} + \text{Zemin Özellikleri}} \quad (3.9)$$

Spangler "Iowa Eşitliğinde" şu temel varsayımları kabul ederek tasarım yöntemini geliştirmiştir.

- Düşey yükler Marston Yük Teorisine göre hesaplanır ve boru duvarı kesitinde eşdeğer olarak yayıldığı kabul edilir.
- Boru tabanındaki oluşan tepki, boru üzerindeki yüke eşittir. Yataklama düzlemi, boru tabanında oluşan düşey yükü eşdeğer olarak karşılar.

- Şekil 3.2’de görülen zeminin boruya uyguladığı pasif itki dağılımı, 100°’lik bir açı ile oluşur.
- Geri dolgu malzemesinin yerleştirme koşulları ve yerleştirme yöntemleri göz önüne alınmamıştır.
- Küçük yer değişimleri için düşey ve yanal yer değişimleri eşit kabul edilmiştir.
- Borunun aksenal rijitliği dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.2 Spangler Gerilme Dağılışı

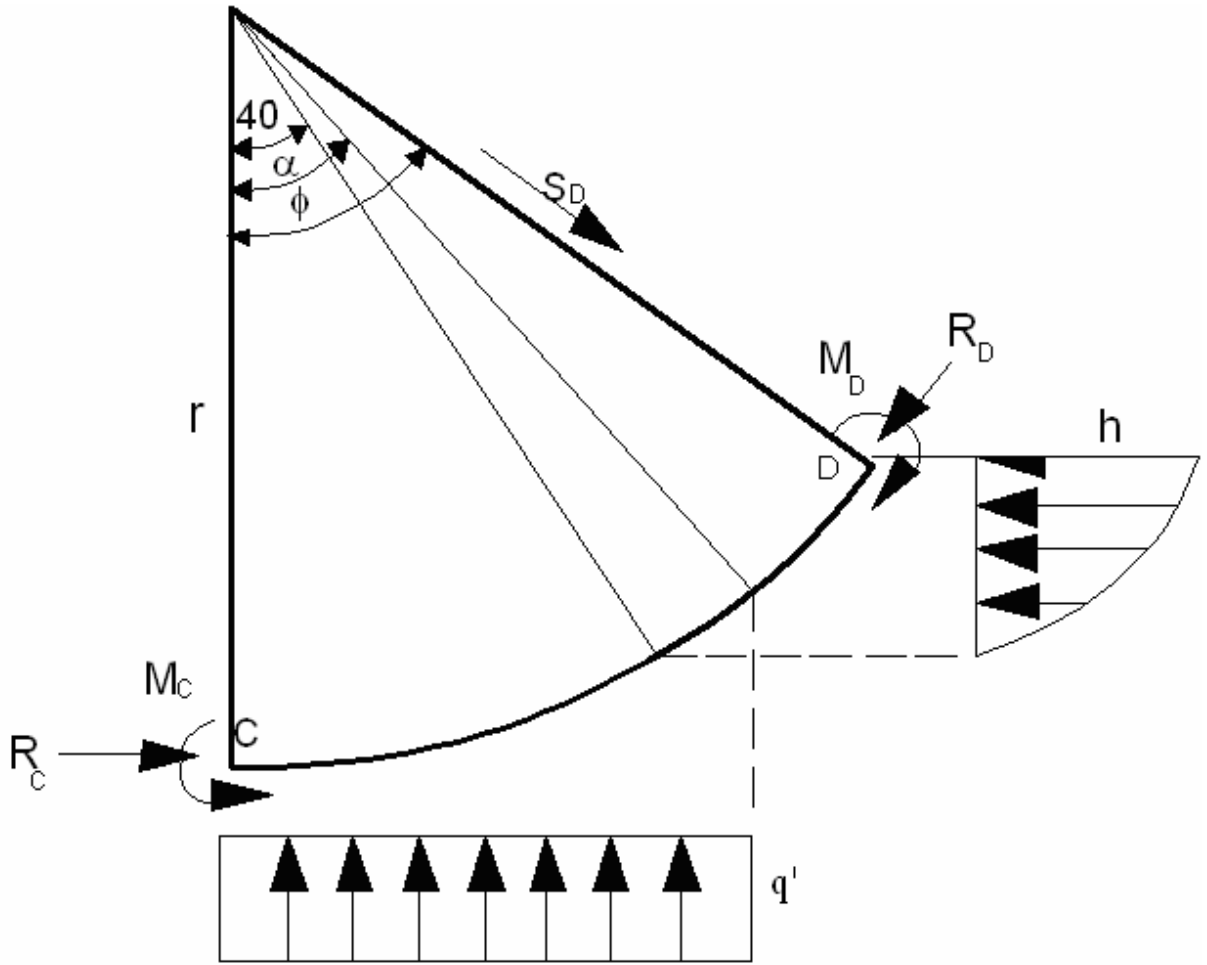
$W_c$  = Marston yükü ( $P_c = \gamma H 2r$ )

$e$ ; Geri dolgu malzemesinin boruya duvarına yaptığı pasif itki

$\Delta x$  Boru duvarının yanal yerdeğişimi

Spangler, eşitliğini şu sayısal adımları izleyerek türetmiştir;

Daire kesitli elemanların elastik teoriye göre deformasyonlarının hesaplanmasında,



Şekil 3.3 Spangler Varsayımında Boru Kesitinde Oluşan Gerilmeler

Şekil 3.4'e göre, Moment  $M_D$ ;

$$\begin{aligned}
 M_D &= M_C + R_C r (1 - \cos \theta) \dots\dots\dots 0 \leq \theta \leq 180^\circ \\
 &- 0.5 q' r \sin^2 \theta \dots\dots\dots 0 \leq \theta \leq \alpha \\
 &- \sin \alpha r^2 q (\sin \theta - 0.5 \sin \alpha) \dots\dots\dots \alpha \leq \theta \leq 180^\circ \\
 &- hr^2 (0.147 - 0.51 \cos \theta + 0.5 \cos^2 \theta - 0.143 \cos^4 \theta) \dots\dots\dots 40^\circ \leq \theta \leq 140^\circ \\
 &+ 1.021 hr^2 \cos \theta \dots\dots\dots 140^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \\
 &- 0.5 qr^2 (1 - \sin \theta)^2 \dots\dots\dots 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Bu eşitliklerde,  $M_C$ , C noktasındaki moment,  $R_C$ , C noktasındaki normal kuvvet,  $r$ , yarıçap,

$q$ , düşey yönde etkiyen birim yük,  $q'$  yataklama tabakasından boruya iletilen düşey yönde birim tepki yükü,  $h$ , geri dolgu malzemesinden boru duvarlarına etkiyen birim itki kuvvetidir. Boruya etkiyen toplam Marston yükü  $W_C$ , borunun üst ve alt duvarlarından iletildiğini varsayılarak,

$$q = \frac{W_C}{2r}, \quad q' = \frac{W_C}{2r \sin \alpha} \quad (3.11)$$

yazılabilir.

$M_D$  momentinin  $\theta$  açısında 0 ile 180 arasında integrasyonu ile, sıfıra eşitlediği durumda,

$$M_C = -R_C r + 0.057 q r^2 + 0.345 h r^2 + q' r^2 [0.08\alpha - 0.04\sin 2\alpha - 0.159\sin^2 \alpha (\pi - \alpha) + 0.318 \sin \alpha (1 + \cos \alpha)] \quad (3.12)$$

$$\int_0^\pi M \cos \theta \cdot d\theta = 0 \quad (3.13)$$

$$R_C = -0.106 \sin^3 \alpha q' r + 0.511 h r + 0.106 q r \quad (3.14)$$

3.15 eşitliği 3.14'de yerine konursa;

$$M_C = -0.049 q r^2 - 0.166 h r^2 + q' r^2 [0.106 \sin^3 \alpha + 0.08 \alpha - 0.04 \sin 2\alpha - 0.159 \sin^2 \alpha (\pi - \alpha) - 0.318 \sin \alpha (1 + \cos \alpha)] \quad (3.15)$$

$q$  ve  $q'$  değerlerini hendek yüzeyinden boruya etkiyen Marston yükü  $W_C$  ile bağıntılı yazarak

3.12 eşitliğinde  $M_C$  ve  $R_C$  yi tekrar yazılırsa;

$$R_C = 0.053 W_C (1 - \sin^2 \alpha) + 0.511 h r \quad (3.16)$$

$$M_C = -0.166 h r^2 + W_C r [0.053 \sin^2 \alpha \frac{0.04\alpha}{\sin \alpha} - \frac{0.02 \sin 2\alpha}{\sin \alpha} + 0.159 \sin(\pi - \alpha) + 0.159(\pi - \alpha) + 0.159 \cos \alpha + 0.135] \quad (3.17)$$

Elastik çember teorisinde çemberin yatay yerdeğiştirmesi ( $\Delta x$ ) ise,

$$\Delta x = \frac{2r^2}{EI} \int_0^{\pi/2} M \cos \phi d\phi \quad (3.18)$$

Elastik çember bağıntısında yer alan  $M$  yerine 3.17 eşitliği konulursa;

$$\Delta x = \frac{W_c r^3}{EI} \left[ 0.5 \sin \alpha - 0.082 \sin^2 \alpha + 0.08 \frac{\alpha}{\sin \alpha} - 0.16 \sin \alpha (\pi - \alpha) - 0.04 \frac{\sin 2\alpha}{\sin \alpha} + 0.318 \cos \alpha - 0.218 \right] - \frac{0.122 h r^4}{EI} \quad (3.19)$$

elde edilir.

$h$ , yan duvarlardaki geri dolgu malzemesinin boruya yaptığı pasif itki ( $e$ ) olarak tanımlandığına göre,

3.19 eşitliğinde “ $h$ ” yerine pasif itki değeri ( $e$ ) girer ve gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$h = \frac{e \Delta x}{2} \quad (3.20)$$

Spanglerin makalesinde çıkarımını yaptığı 3.21 eşitliği türetilmiş olur.

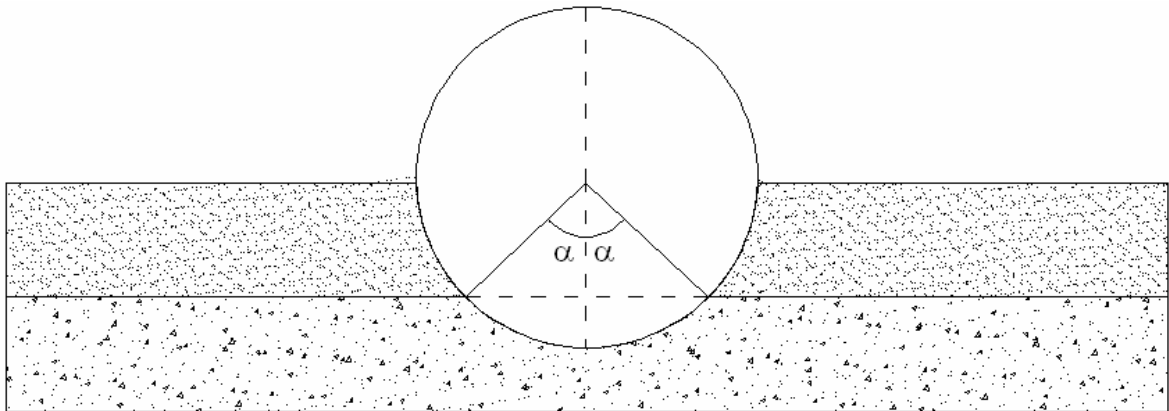
$$\Delta x = \frac{W_c r^3 K}{EI + 0.061 e r^4} \quad (3.21)$$

Bu eşitlikte;

$K$ , Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, borunun yataklama seviyesine yerleştirilme açısının katsayısını “ $W_c$ ” Marston Yük değerini, “ $r$ ” borunun yarıçapını, “ $E$ ” borunun elastik modülünü “ $I$ ” atalet momentini ve “ $e$ ” geri dolgu malzemesinin boru yan duvarlarına yaptığı pasif itkiyi tanımlar. Eşitlikte yer alan “ $K$ ” yataklama katsayısıdır. Yataklama katsayısının bağıntısı aşağıda verilmektedir.

$$K = 0.5 \sin \alpha - 0.082 \sin 2\alpha + 0.082 \sin 2\alpha + 0.08 (\alpha / \sin \alpha) - 0.16 \sin \alpha (\pi - \alpha) - 0.04 (\sin 2\alpha / \sin \alpha + 0.318 \cos \alpha - 0.208) \quad (3.22)$$

Bu değer 3.22 ile bulunabildiği gibi Çizelge 3.2’ den de alınabilir.



Şekil 3.4 Gömülü Borunun Yataklama Biçimi (Moser 2000)

Çizelge 3.2 Yataklama Katsayısı Değerleri (Moser 2000)

| Yataklama Açısı (°) | Yatak Katsayısı K |
|---------------------|-------------------|
| 30                  | 0.108             |
| 45                  | 0.105             |
| 60                  | 0.102             |
| 90                  | 0.096             |
| 120                 | 0.090             |
| 180                 | 0.083             |

### 3.3 Geliştirilmiş Iowa Eşitliği (1958)

Spangler'in eşitliğinde yer alan terimler  $W_c$  düşey yük, EI, boru rijitliği ve  $er^4$  zemin pasif itki değerleridir. Şekil 3.5 deki çizimi ile karikatürize edilen zeminin pasif itki değeri borunun % 1-2 şekil değişiminden sonra boru davranışını büyük ölçüde belirlemektedir. Ancak boru duvarlarına etkiyen pasif zemin itki değerinin kolaylıkla hesaplanması mümkün değildir. Özellikle boru hattı boyunca farklı zemin koşullarıyla karşılaşan tasarımcıları zemin pasif itkisi deneysel çalışmalar yapmadan belirlemeleri çok güçtür. Bu nedenle, eşitlik üzerinde yeni düzenlemeler yapılmasına gerek duyulmuştur.

Watkins (1958) zemin pasif direnci " $er^4$ "yi belirlemek üzere bir dizi laboratuvar ve arazi deneyleri yapmış ve çalışmaları sonucunda geri dolgu tarafından boru duvarlarına uygulanan pasif itki yerine bağıntı 3.23'te görülen Reaksiyon Modülü ismini verdiği "E" değişkeninin kullanılmasını önermiştir.

$$(E' = e.r) \quad (3.23)$$

Howard (1977), Çizelge 3.3'de görüldüğü gibi Watkins'in önerdiği  $E'$  değerleri için tasarımcıların kullanımına yönelik "Howard Zemin Reaksiyonu" çizelgesini hazırlamıştır.

Çizelge 3.3 Howard Zemin Reaksiyonu Çizelgesi (Howard 1977)

| Zemin Sınıfı | Zemin Türü                                                                                                                                         | Zemin Sıkılığı<br>(Proctor Sıkışma Yüzdesi (%)) |        |          |        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------|----------|--------|
|              |                                                                                                                                                    | Gevşek                                          | < % 85 | % 85-%95 | > % 95 |
| V            | İnce Daneli Zeminler (LL > 50)<br>Orta ve Yüksek Plastisiteli<br>CH, MH,                                                                           | Kullanılması Önerilmemektedir( E' = 0)<br>(kPa) |        |          |        |
| IV           | İnce Daneli Zeminler (LL< 50)<br>Orta veya çok düşük plastisite<br>CL, ML ve %25'den az kaba daneli malzeme                                        | 350                                             | 1400   | 2800     | 7000   |
| III          | İnce Daneli Zeminler (LL< 50)<br>Orta veya çok düşük plastisite<br>CL,ML,<br>Kaba Daneli Malzeme<br>GM,GC,SM,SC ve %12'den fazla ince dane içeriği | 700                                             | 2800   | 7000     | 14000  |
| II           | Kaba daneli malzeme<br>(İnce Daneli oranı çok az veya yok)<br>GW,GP,SW,SP                                                                          | 1400                                            | 7000   | 14000    | 21000  |
| I            | Kırma Taş                                                                                                                                          | 7000                                            | 21000  | 21000    | 21000  |

Bunun yanında Nielsen (1967), Allgood (1972) Chambers (1980), Hartley ve Duncan (1987) ve Selig (1990) yaptıkları incelemelerde Watkins'in önerdiği E' zemin reaksiyonu yerine bağıntı 3.24'te görülen geri dolgu malzemesinin bir boyutlu Sıkışma Modülünün kullanılabileceğini savunmuşlardır.

$$E' = 1.5 M_s \dots \dots \dots (\text{Nielsen, 1967})$$

$$E' = (0.67- 0.91) M_s \dots \dots \dots (\text{Allgood ve Takahashi, 1972})$$

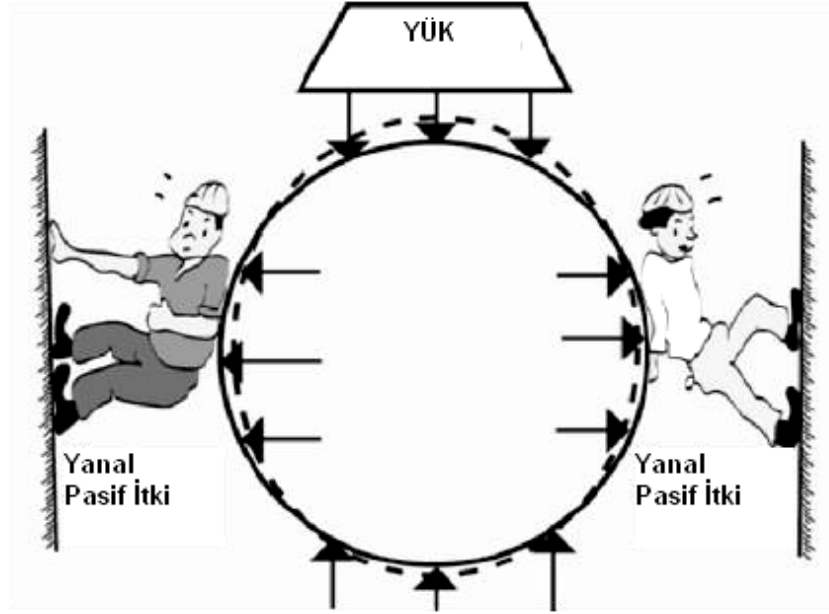
$$E' = M_s \dots \dots \dots (\text{Chambers vd 1980}) \quad (3.24)$$

$$E' = (0.7-1.5) M_s \dots \dots \dots (\text{Hartley ve Duncan, 1987})$$

$$E' = 0.85 M_s \dots \dots \dots (\text{Selig vd, 1990})$$



Faragher, Rogers ve Flemin (1998)'de yaptıkları laboratuvar deneylerinde,  $K_0$  koşullarında modellenmiş hendek kutularının çok rijit bir davranış göstermesi nedeniyle özellikle çevrimli ve büyük yükleme değerlerinde, Howard (1977), Duncan (1987) ve diğer araştırmacıların önerdiği yaklaşımların yetersiz kaldığını görmüştür. Faragher (1998) , çevre basıncı etkisi ile giderek rijitliğini arttıran bu tür hendek ortamlarında farklı yöntemler kullanılarak gerçek zemin reaksiyonlarının belirlenmesi gerektiğini ileri sürmüştür.



Şekil 3.5 Esnek Boruların Yük taşıma Biçimleri

Watkins; önerdiği zemin reaksiyonu yaklaşımından başka, uzun süreli yüklemeler altındaki geri dolgu malzemesinin ve esnek davranış gösteren viskoelastik termoplastik boruların zamana bağlı sünmeleri ve konsolidasyon davranışlarının dikkate alınması gerektiğini de vurgulamıştır. Bu amaçla adını “Gecikme Faktörü” olarak tanımladığı ( $D_L$ ) değişkenini bağıntıya eklemiştir. Standartlarda  $D_L$  faktörünün uzun süreli yüklemeler için 1.5 kısa süreli yüklemeler için ise 1 değerlerinin kullanılması önerilmektedir.

$$\Delta x = \frac{D_L K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \quad (3.25)$$

$\Delta x$  = Boru çemberinin yanal şekil değişimi (m)

Bağıntı 3.25’de verilen Geliştirilmiş Iowa Eşitliği, gömülü boruların dayanım ve şekil değişimi kriterlerini belirlemekte önemli bir yetkinliğe sahiptir. Eşitliğin olumlu ve olumsuz yönleri ise şu başlıklarda değerlendirilebilir.

Olumlu yönleri;

- Boruların yük altındaki şekil değişimlerini belirlemek için kullanılan ilk ve en yaygın analitik çözümleme yöntemidir.
- Kullanımı basit ve hızlıdır
- Yataklama koşulları gözönüne alınarak borunun şekil değişimi değerlendirilmektedir.
- Boru duraylılığında zaman etkisi göz önüne alınmıştır.
- Deformasyonlar sonucunda boru rijitliğinde ve zeminin elastisite modülünde meydana gelen değişimler aşamalı olarak hesaplanarak zemin-boru ilişkisinin doğrusal olmayan davranışı modellenenebilir.
- Kıvrımlı borular içinde yöntemin işlevliliği geçerlidir.

Bunun yanında, Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinin eksik yönleri de bulunmaktadır,

- Bağıntılardan elde edilen sonuçlar, borunun yalnızca çember kesitinin yatay yündeki şekil değişimini hesaplar. Borunun dairesel ve eksenel deplasmanlarını dikkate almaz.
- Eşitlikte yer alan değişkenlerin laboratuvar şartlarında bile belirlenmesi güçtür ve elde edilen değerlerin arazi ortamını yansıtmaya yoksunluğu söz konusudur.
- Borunun % 5 den daha az şekil değiştirmeler altında düşey ve yatay yönde yer değişimlerinin eşit olduğu varsayılır. Bu varsayımla, özellikle küçük şekil değişimlerinde çember kesitinin tam elips biçimine dönüştüğü kabul edilir. Ancak arazi ve laboratuvar gözlemlerinde özellikle boru deformasyonlarının tam elipsten daha farklı geometrilerde oluştuğu saptanmıştır.
- Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde kullanılan zemin reaksiyonunu; zeminin eşdeğer özellikte olduğu kabul edilerek belirlenir. Eşdeğer olmayan zemin koşullarında ise tek bir modül kullanmak şekil değişimlerinin saptanmasında, değerlendirmeleri gerçekten uzaklaştırmaktadır.
- Boruların yüzeye çok yakın yerleştirmelerinde eşitlik yanlış sonuçlar vermektedir.

### 3.4 Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinin Türetilen Diğer Eşitlikler

Her ne kadar Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanım kolaylığı ile tasarımcılar açısından tercih edilse de, bazı olumsuzlukları bulunmaktadır. Bu eksiklikleri giderebilmek için birçok araştırmacı eşitlik üzerinde düzeltmeler ve eklemeler yapmıştır. Eşitliğin farklı varyasyonlarına ait birkaç örnek şunlardır.

### 3.4.1 Greenwood-Lang Geliştirilmiş Iowa Eşitliği (1990)

Gerçekte esnek borular hendek ortamındaki yataklama düzlemine yerleştirilmesi ile birlikte şekil değişimlerine başlar. Geri dolgu malzemesinin tabaka tabaka serilmesi ile şekil değişimleri devam eder. Özellikle küçük çembersel rijitliğe sahip borular yan duvarlardaki geri dolgunun sıkıştırılması sırasında düşey ekseninde uzama (sünme) davranışı sergiler. Diğer taraftan geri dolgu ile doğal zemin arasında oluşan etkileşimin göz önüne alınması da gerekmektedir. Greenwood-Lang, Spangler ve Watkins'in dikkate almadığı bu önemli etkileri, geliştirdikleri yöntemlerinde göz önüne almışlardır. Greenwood-Lang (1990)'ın Leonhard (1979)'ın yaklaşımından yararlanarak ortaya koydukları yöntem, bağıntı 3.14'te gösterilmektedir.

$$\Delta x = \frac{K(\gamma H)}{EI/r^3 + 0.061\zeta C_1 E'} - \delta_{vo} \quad (3.26)$$

Eşitlikte yer alan;

$\Delta x$  ; Yanal Şekil Değiştirme (m)

$K$  ; Yataklama Katsayısı

$\gamma$  ; Geri dolgunun birim hacim ağırlığı (kN/m<sup>3</sup>)

$H$  ; Boru üzerindeki geri dolgu malzemesinin yüksekliği (m)

$I$  ; Borunun atalet momenti (m<sup>4</sup>/m)

$R$  ; Borunun ortalama yarıçapı (m)

$\zeta$  ; Leonhardt eşitliği

$\delta_{vo}$  ; Sıkıştırma etkisi ile ortaya çıkan düşey uzama büyüklüğü (m)

$C_1$  ; Greenwood ve Lang zemin-boru etkileşimi katsayısı

$$C_1 = a \left( \frac{EI}{1250.D^3} \right)^b \quad (3.27)$$

$$\zeta = \frac{1.662 + 0.639(B/D - 1)}{(B/D - 1) + [1.662 - 0.361(B/D) - 1]E_2 / E_3} \quad (3.28)$$

$E_2$  ; Geri dolgunun Young Modülü

$E_3$  ; Doğal zeminin Young Modülü

$B$  ; Hendek genişliği

Greenwood ve Lang (1990) Yataklama Katsayıları ve a,b değeri Çizelge 3.4 ve 3.5 ‘de görülebilir.

Çizelge 3.4 Greewood-Lang Yataklama Katsayıları

| Zemin              | İnce Malzeme Oranı | Zeminin Proctor Sıkışma Yüzdesi (%) |       |       |       |
|--------------------|--------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
|                    |                    | > 95                                | 85-95 | 70-84 | < 70  |
| Temiz Çakıl        | < 5                | 0.083                               | 0.083 | 0.083 | 0.083 |
|                    | (5-12)             | 0.096                               | 0.096 | 0.083 | 0.083 |
| Kirli Çakıl        | 12-50              | 0.103                               | 0.103 | 0.096 | 0.083 |
| Temiz Kum          | <5,(5-12)          | 0.103                               | 0.103 | 0.096 | 0.083 |
| Kirli Kum          | 12-50              | 0.103                               | 0.103 | 0.096 | 0.083 |
| İnorganik Kıl/Silt | >50                | 0.103                               | 0.103 | 0.096 | 0.083 |

Çizelge 3.5 Greewood-Lang a ve b parametreleri

| Sıkışıklık Yüzdesi (%) | a     | b     |
|------------------------|-------|-------|
| > 95                   | 1.24  | 0.180 |
| 85-95                  | 0.983 | 0.245 |
| 70-84                  | 0.643 | 0.353 |
| < 70                   | 0.456 | 0.436 |

### 3.4.2 McGrath Iowa Eşitliği (1998)

Düşey yüklemeler altında kalan bir gömülü boru iki farklı biçimde davranış göstererek şekil değiştirir. Bunlardan biri ovalleşerek düşey ekseninde kısılması ve yanal ekseninde uzaması iken, diğeri dairesel büzülme göstererek küçülmesidir. Her ne kadar dairesel deformasyonlar aksenal deformasyonlara oranla çok küçük olsa da hesaplara katılması gereklidir. Bu nedenle çembersel ve eğilme rijitlikleri birlikte göz önüne alınmalıdır. McGrath (1998) önerdiği eşitliğinde bu iki davranışı da dikkate alınmıştır. Bunun yanında Mc Grath düşey ve yatay deplasmanların birbirlerine eşit olduğu varsayımını kabul etmiş ve eşitliğinde düşey yer değiştirmeyi hesaplamıştır.

$$\frac{\Delta v}{D} = \left[ \left( \frac{(DKE)P_c}{\frac{EA}{r} + 0.57M_s} \right) + \left( \frac{D_L K P_c}{\frac{EI}{r^3} + 0.061M_s} \right) \right] \quad (3.29)$$

Eşitliğin birinci kısmı Richard-Burns (1964) elastik yöntemi kullanarak türetilmiş, ikinci kısmında ise zeminin bir boyutlu Sıkışma Modülünün yer aldığı Geliştirilmiş Iowa eşitliği kullanılmıştır.

$\Delta v$  ; Düşey yönde deformasyon (m)

(DKE) ; Düşey Kemerlenme etkisi (%)

$P_c$  ; Düşey yük (kPa)

$E$  ; Borunun Young modülü (kPa)

$r$  ; Borunun yarıçapı (m)

$M_s$  ; Geri dolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü (kPa)

$K$  ; Yataklama Katsayısı

$D_L$  ; Deformasyon gecikme faktörü

### 3.4.3 Masada Geliştirilmiş Iowa Derivasyonu (1998)

Masada yaptığı sayısal dönüşümlerinde Watkins G.I eşitliğine herhangi yeni bir kabul veya ilave değişken atamamış, yalnızca denklem üzerinde derivasyonlar uygulamıştır. Şekil 3.4 yeniden değerlendirilirse;

$$\Delta y = \frac{r^2}{EI} \int_0^\pi M \sin \phi d\phi \quad (3.30)$$

$$\int_0^\pi M \sin \phi d\phi = 2M_c + 2rR_c + 0.167q'r^2 \cos \alpha (\sin^2 \alpha + 2) - 0.333q'r^2 - \sin \alpha q'r^2 (1.571 - 0.5\alpha + 0.25 \sin 2\alpha) + 0.5 \sin^2 \alpha q'r^2 (1 + \cos \alpha) - 0.571hr^2 - 0.0479qr^2 \quad (3.31)$$

Eşitlikte C noktasındaki moment alınırsa ve basınç değerleri için;

$$\begin{aligned} M_c &= -0.049vr^2 - 0.166hr^2 + v'r^2 [0.106 \sin^3 \alpha + 0.08\alpha - 0.04 \sin 2\alpha \\ &\quad - 0.159 \sin^2 \alpha (\pi - \alpha) + 0.318 \sin \alpha (1 + \cos \alpha)] \\ R_c &= -0.106 \sin^3 \alpha q'r + 0.511hr + 0.106qr \end{aligned} \quad (3.32)$$

$M_c$  ve  $R_c$  eşitlikleri integrasyondaki yerlerine konulursa;

$$\int_0^{\pi} M \sin \phi d\phi = 0.119hr^2 + 0.0661qr^2 + q'r^2[0.16\alpha + 0.333(\cos\alpha - 1) + \sin\alpha(-0.935 + 0.5\alpha + 0.636\cos\alpha) - \sin 2\alpha(0.08 + 0.25\sin\alpha) + \sin^2\alpha(-0.499 + 0.318\alpha + 0.667\cos\alpha)] \quad (3.33)$$

Borunun taban ve tacında oluşan yükler için ,

$$q = W_c / (2r) \text{ ve } q' = W_c / (2r \sin \alpha) \quad (3.34)$$

değerleri eşitlik 3.34'te yerlerine konulursa;

$$\int_0^{\pi} M \sin \phi d\phi = 0.119hr^2 + rW_c[-0.434 + 0.25\alpha + 0.318\cos\alpha + \frac{0.08\alpha}{\sin\alpha} + \frac{0.167(\cos\alpha - 1)}{\sin\alpha} - \frac{\sin 2\alpha}{\sin\alpha}(0.04 + 0.125\sin\alpha) + \sin\alpha(-0.25 + 0.159\alpha + 0.333\cos\alpha)] \quad (3.35)$$

3.35'te  $\Delta y$  şekil değişimi için sadeleştirmeler yapılsa;

$$\Delta y = \frac{0.119hr^4}{EI} + \frac{JW_c r^3}{EI} \quad (3.36)$$

eşitlikte yer alan J değişkeni ;

$$J = -0.434 + 0.25\alpha + 0.318\cos\alpha + \frac{0.08\alpha}{\sin\alpha} + \frac{0.167(\cos\alpha - 1)}{\sin\alpha} - \frac{\sin 2\alpha}{\sin\alpha}(0.04 + 0.125\sin\alpha) + \sin\alpha(-0.25 + 0.159\alpha + 0.333\cos\alpha)] \quad (3.37)$$

Çizelge 3.6 J ve K Yatak Katsayıları

| Yataklama Açısı | K Katsayısı | J Katsayısı | J/K     |
|-----------------|-------------|-------------|---------|
| 60              | 0.1020      | -0.1054     | -1.0330 |
| 75              | 0.0986      | -0.1010     | -1.0240 |
| 90              | 0.0951      | -0.0966     | -1.0158 |
| 105             | 0.0919      | -0.0927     | -1.0087 |
| 120             | 0.0890      | -0.0893     | -1.0034 |
| 135             | 0.0868      | -0.0865     | -0.9965 |
| 150             | 0.0852      | -0.0846     | -0.9930 |
| 165             | 0.0844      | -0.0837     | -0.9917 |
| 180             | 0.0843      | -0.0829     | -0.9834 |

J değerinin katsayı şeklinde düzenlenen Çizelge 3.6'daki değerlerine bakıldığında, J'nin K yatak katsayısı değerlerinin negatif değerlerine oldukça yakın olduğu görülebilir. Bu kabulle G.I eşitliği derivasyonlar sonucunda K katsayısı bağıntılarda kullanılabilir.

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{P}{M_s} \left[ \frac{KM_s}{(EI/r^3)} \left( \frac{0.0595M_s}{(EI/r^3) + 0.061M_s} - 1 \right) \right] \quad (3.38)$$

Eşitlikte yer alan

$\Delta y$  ; Düşey yer değiştirme (m)

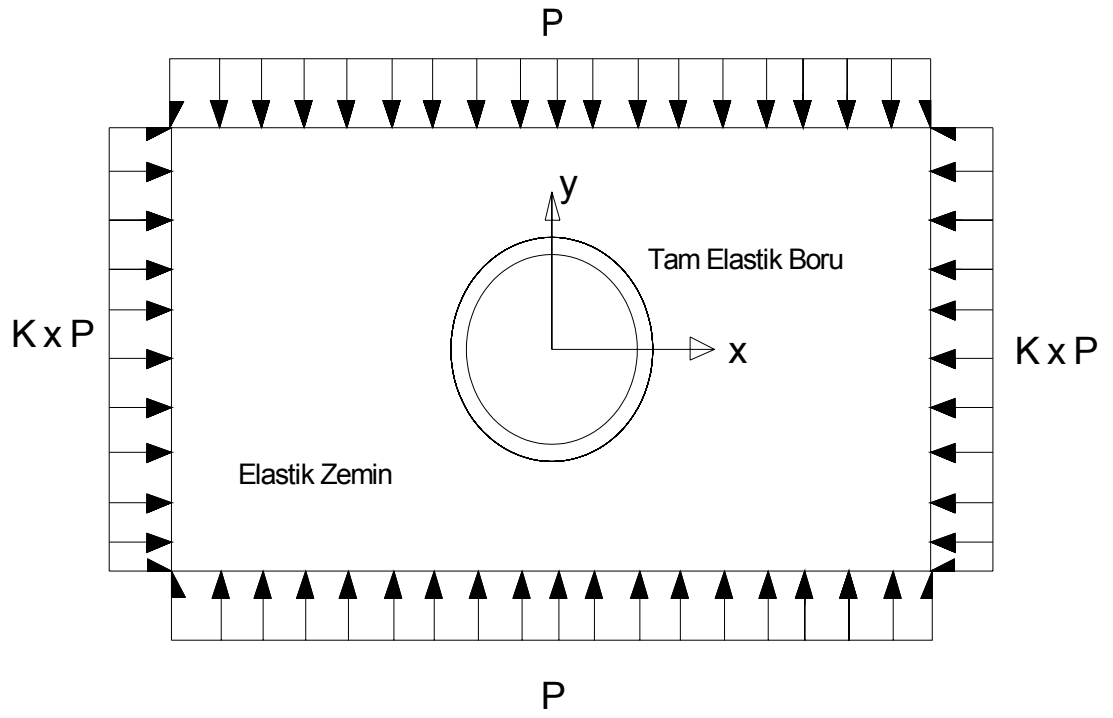
P ; Düşey Yük (kPa)

K ; Yataklama Katsayısı

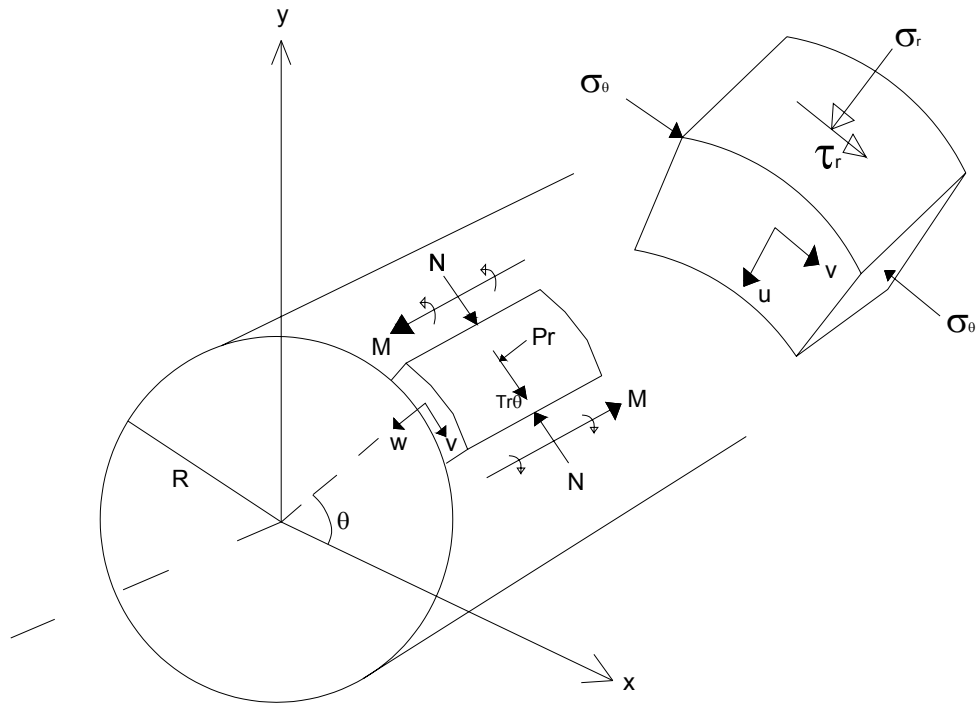
$M_s$  ; Geri dolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü (kPa)

### 3.5 Richard & Burns Elastik Yöntemi (1964)

Spangler Iowa eşitliğini geliştirirken yalnızca sayısal iterasyonlar ile laboratuvar ve arazi deneylerinden elde ettiği gözlem ve deneyimlerden yararlanmıştır. Bu nedenle Spangler yaklaşımı yarı amprik bir bağıntıdır. Richard-Burns (1964) yöntemi ise elastik kabuk teoremini esas alan bütünüyle sayısal eşitliklere dayanan kuramsal bir yaklaşımdır. Bu nedenle araştırmacıların eşitlikler üzerinde değişiklikler yapabilmesi oldukça kolaydır. Richard-Burns Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, hendek ortamını tam elastik kabul etmiş ve uygulanan düşey yükleri Poisson oranını kullanılarak yanal yüklere dönüştürmüştür. Analizler boru-zemin ara yüzeyi tamamen tutulu veya tamamen serbest olduğu varsayımlarına göre yapılır. Kullanıcı tarafından istenildiğinde Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, boru kesiti üzerinde açısai değerleri belirlenen her noktanın çembersel, açısai şekil değişimleri ile kesme, normal ve eğilme momentleri hesaplanabilir. Ancak yapılan arazi deneylerinden elde edilen deneyimler ışığında, Richard-Burn elastik yönteminin küçük çaplı ve kalın duvarlı borularda  $(1-\nu^2) \gg 1$  ve  $(EI/D^2) \gg 0$  doğru sonuçlar vermediği görülmüştür.



Şekil 3.6 Richard-Burns Elastik Ortamı



Şekil 3.7 Boru Kesitinde oluşan Çembersel, Teğetsel Deformasyonlar



Elastik Yöntemde kullanılan bağıntılar özetle şunlardır;

Boru ile Zemin arayüzeyinde kayma oluşmadığı varsayımı kabul edildiğinde;

$$UF = 2B \frac{M^* r}{6EI} = (1 + K) \frac{M^* r}{EA} \quad (\text{Eksenel rijitlik oranı}) \quad (3.39)$$

$$VF = 2C \frac{M^* r^3}{6EI} = (1 - K) \frac{M^* r^3}{6EI} \quad (\text{Eğilme rijitliği oranı}) \quad (3.40)$$

$$K = \left( \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \quad (3.41)$$

$$B = \frac{1}{2} (1 + K) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 - \nu} \right) \quad (3.42)$$

$$C = \frac{1}{2} (1 - K) = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) \quad (3.43)$$

$$a_0^* = \frac{UF - 1}{UF + (B/C)} \quad (3.44)$$

$$a_2^* = \frac{C(1 - UF)VF - (C/B)UF + 2B}{(1 + B)VF + C(VF + 1/B)UF + 2(1 + C)} \quad (3.45)$$

$$b_2^* = \frac{(B - CUF)VF - 2B}{(1 + B)VF + C(VF + 1/B)UF + 2(1 + C)} \quad (3.46)$$

$$P_r = p \left\{ B \left[ 1 - a_0^* \right] - C \left[ 1 - 3a_2^* - 4b_2^* \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.47)$$

$$T_{r\theta} = p(C[1 + 3a_2^* + 2b_2^*] \sin 2\theta) \quad (3.48)$$

$$v = \frac{pr}{2M^*} \left\{ \left[ 1 - a_2^* + \left( \frac{2C}{B} \right) b_2^* \right] \sin 2\theta \right\} \quad (3.490)$$

$$w = \frac{pr}{2M^*} \left\{ UF \left[ 1 - a_0^* \right] - VF \left[ 1 - a_2^* - 2b_2^* \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.50)$$

$$N = pr \left\{ B \left[ 1 - a_0^* \right] - C \left[ 1 + a_2^* \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.51)$$

$$M = pr^2 \left\{ \frac{CUF}{6VF} \left[ 1 - a_0^* \right] - \frac{C}{2} \left[ 1 - a_2^* - 2b_2^* \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.52)$$

Boru ile Zemin arayüzeyinde kayma oluştuğu varsayımı kabul edildiğinde;

$$a_2^{**} = \frac{2VF - 1 + 1/B}{2VF - 1 + 3/B}, \quad b_2^{**} = \frac{2VF - 1}{2VF - 1 + 3/B} \quad (3.53)$$

$$P_r = p \left\{ B \left[ 1 - a_0^* \right] - C \left[ 1 + 3a_2^{**} - 4b_2^{**} \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.54)$$

$$v = \frac{pr}{2M^*} \left\{ \left[ VF + (C/2B)UF \right] \left[ 1 + 3a_2^{**} - 4b_2^{**} \right] \sin 2\theta \right\} \quad (3.55)$$

$$w = \frac{pr}{2M^*} \left\{ UF \left[ 1 - a_0^* \right] - \frac{2}{3} VF \left[ 1 - a_2^{**} - 2b_2^{**} \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.56)$$

$$N = pr \left\{ B \left[ 1 - a_0^* \right] + \frac{C}{3} \left[ 1 + 3a_2^{**} - 4b_2^{**} \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.57)$$

$$M = pr^2 \left\{ \frac{CUF}{6VF} \left[ 1 - a_0^* \right] + \frac{C}{3} \left[ 1 - a_2^{**} - 4b_2^{**} \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.58)$$

Bağıntılarda geçen;

I : Atalet momenti

r : Boru Malzemesinin yarıçapı

A : Boru Malzemesinin kesit alanı

$\nu$  : Zemin ortamının Poisson oranı

E: Boru Malzemesinin Young modülü

$E^*$ : Zemin ortamının Young modülü

M: Boru duvarlarında oluşan eğilme momentleri

N: Boru duvarında oluşan normal kuvvet

$P_r$ : Boru çemberinde oluşan çembersel gerilme

$T_\theta$ : Boru çemberinde oluşan teğetsel gerilmeler

p : Hendek yüzeyinden uygulanan düşey gerilme

$r, \theta, z$ : Boru kesitinde yeralan açısal koordinatlar

w : Borunun çembersel şekil değişimi

v: Borunun teğetsel şekil değişimi

### 3.6 Hoeg Elastik Çözüm Yöntemi (1968)

Hoeg (1968), Richard & Burns (1964)'ün de temel aldığı elastik kabuk teorisi üzerinde bazı değişiklikler yaparak elastik çözüm yöntemini geliştirmiştir. Hoeg Elastik Yönteminin Richard & Burns elastik yönteminden ayrılan yönleri şunlardır. Richard-Bruns yöntemi zemini tam elastik kabul ederek K yanal itki katsayısını Poisson oranını kullanarak elde etmiştir. Hoeg, K katsayısını Poisson oranından bağımsız olarak tanımlamıştır. Bunun yanında, zemin–boru ara yüzey etkileşimini Richard-Burns yaklaşımının aksine iki farklı sınır koşulunda değil eşdeğer kabulle tek bir varsayımda değerlendirmiştir. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda Hoeg yönteminde Richard-Burns yöntemine benzer olarak küçük çaplı büyük et kalınlıklı ve sıkı derinliklere yerleştirilmiş borularda ( $D/8$  den daha az) yetersiz sonuçlar verdiği görülmüştür.

Hoeg (1968)'in yaptığı çalışma kısaca şu eşitliklerle açıklanabilir.

$$C = \frac{1}{2} \frac{1}{1-\nu} \frac{M_s}{\frac{E_c}{1-\nu_c^2}} \left( \frac{D}{t} \right) \quad (\text{Sıkışabilirlik oranı}) \quad (3.59)$$

$$F = \left( \frac{1}{4} \right) \left( \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \left( \frac{M_s}{\frac{E_c}{1-\nu_c^2}} \right) \left( \frac{D}{t} \right)^3 \quad (\text{Esneklik oranı}) \quad (3.60)$$

$$\sigma_{r'} = \frac{1}{2} p \left\{ (1-k) \left[ 1 - a_1 \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] - (1-k) \left[ 1 - 3a_2 \left( \frac{r}{r'} \right)^4 - 4a_3 \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.61)$$

$$\sigma_{\theta'} = \frac{1}{2} p \left\{ (1-k) \left[ 1 - a_1 \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] - (1-k) \left[ 1 - 3a_2 \left( \frac{r}{r'} \right)^4 \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.62)$$

$$\tau_{r'\theta} = \frac{1}{2} p (1-k) \left\{ \left[ 1 + 3a_2 \left( \frac{r}{r'} \right)^4 + 2a_3 \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] \sin 2\theta \right\} \quad (3.63)$$

$$u = \frac{1}{2} p \frac{r'}{M} \left\{ (1+k)(1-\nu) \left[ 1 + \frac{a_1}{1-2\nu} \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] - (1-k) \frac{1-\nu}{1-2\nu} \right. \\ \left. \left[ 1 + a_2 \left( \frac{r}{r'} \right)^4 + 4(1-\nu)a_3 \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] \cos 2\theta \right\} \quad (3.64)$$

$$v = \frac{1}{2} p \frac{r'}{M} \frac{1-\nu}{1-2\nu} (1-k) \left[ 1 - a_2 \left( \frac{r}{r'} \right)^4 + 2(1-2\nu) a_3 \left( \frac{r}{r'} \right)^2 \right] \sin 2\theta \quad (3.65)$$

Bu eşitliklerde;

Boru zemin arayüzeyinde kayma olmadığı durumlarda;

$$a_1 = \frac{(1-2\nu)(C-1)}{(1-2\nu)(C+1)} \quad (3.66)$$

$$a_2 = \frac{(1-2\nu)(1-C)F - \frac{1}{2}(1-2\nu)^2 C + 2}{[(3-2\nu) + (1-2\nu)C]F + (\frac{5}{2} - 8\nu + 6\nu^2)C + 6 - 8\nu} \quad (3.67)$$

$$a_3 = \frac{[1 + (1-2\nu)(C)]F - \frac{1}{2}(1-2\nu)^2 C - 2}{[(3-2\nu) + (1-2\nu)C]F + (\frac{5}{2} - 8\nu + 6\nu^2)C + 6 - 8\nu} \quad (3.68)$$

Boru zemin arayüzeyinde kama olduğu durumlarda

$$a_1 = \frac{(1-2\nu)(C-1)}{(1-2\nu)(C+1)} \quad (3.69)$$

$$a_2 = \frac{2F + 1 - 2\nu}{2F + 5 - 6\nu} \quad (3.70)$$

$$a_3 = \frac{2F - 1}{2F + 5 - 6\nu} \quad (3.71)$$

Eşitliklerde yer alan;

D : Boru çapı

r : Boru yarıçapı

t : Boru et kalınlığı

$\tau_{r\theta}$  : Kayma gerilmesi

$\nu$  : Geri dolgu ortamının Poisson oranı

$\nu_c$  : Borunun Poisson oranı

$E_c$  : Borunun Young modülü

$M_s$  : Geri dolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü

$\sigma_r$  : Çembersel gerilme

$\sigma_\theta$  : Teğetsel gerilme

P : Uygulanan düşey gerilme

K : Düşey-yatay gerilme oranı

$r', \theta, z$  : Çembersel koordinatlar

u : Çembersel şekil değiştirme

v : Teğetsel şekil değiştirme

Hoeg boruyu çevreleyen geri dolgu malzemesinin çok gevşek bir malzeme olması durumunda (sızıntı vb. etkenlerle ) boru ve zeminin kompozit bir malzeme gibi davranabileceğini, bu nedenle sıkışabilirlik katsayısında bir düzeltme yapılması gerektiğini vurgulamıştır.

$$C_m = C + \left[ \left( \frac{H}{r+H} \right) \left( \frac{1}{1-\nu} \right) \right] \left( \frac{M_s}{M'_s} \right) \quad (3.72)$$

Eşitlikte, C, hendek ortamında gevşek olmayan zeminin sıkışabilirlik oranı, H, gevşek zeminin kalınlığı, r, boru yarıçapı,  $\nu$ , zeminin Poisson oranı,  $M_s$  ve  $M'_s$  gevşek ve geridolgu zeminin bir boyutlu sıkışma modülü değerleridir.

Elastik çözüm yöntemlerinin en çok bilinen Richard&Burns ve Hoeg yöntemleri de, aynı kabuk teoremine dayanarak geliştirilmiştir.

Elastik yöntemlerin olumlu yönleri şunlardır.

- Duvar kesitinde oluşan gerilme dağılımları, eğilme momentleri ve şekil değişimleri detaylı olarak hesaplanabilir.
- Marston ve Iowa eşitliğinde olduğu gibi herhangi bir basınç dağılımı varsayımına gerek kalmadan hesaplama adımlarına geçilebilir.
- Zemin-boru arayüzündeki etkileşim hesaplamalarda göz önüne alınabilmektedir.
- Kullanılan malzeme değişkenleri kolaylıkla hesaplanabilen zemin mekaniğinin temel değişkenleridir.
- Boru etrafında yer alabilecek gevşek zeminlerin performansa etkisi değerlendirilebilir.

Yöntemlerin olumsuz yönleri ise;

- Zemin lineer elastik olarak modellenmiştir. Bu doğru bir yaklaşım değildir.
- Yataklama koşullarının duraylılığa etkisi göz önüne alınmamıştır.
- Yerleştirme koşulları göz ardı edilmiştir.
- Boru zemin arayüzeyi kayma olduğu ve olmadığı iki sınır şartında değerlendirilmiş, bu sınır şartları arasındaki arageçiş ortamı ise hesaplamara katılamamıştır.
- Hendek ortamındaki gerilme dağılışının eşdeğer olarak yayıldığı kabul edilmiştir. Oysa gerçekte böyle değildir.
- Sığ hendek derinliklerinde ve yüksek rijitlikli borularda uygun olmayan sonuçlar elde edilmektedir.

### 3.7 Chua Ve Lytton Viskoelastik Yöntemi (1998)

Iowa, G.Iowa, Masada, McGrath, Greenwood-Lang, Richard-Burns ve Hoeg eşitliklerinde kullanılan değişkenler değerlendirildiğinde, gömülü boru davranışına etkili olan parametreler kısaca şu başlıklarda sıralanabilir.

- Borunun rijitliği
- Geri dolgu malzemesinin rijitliği
- Zemin ve borunun Poisson oranları
- Yükleme seviyesi
- Hendek boyutları
- Yataklama özellikleri
- Yerleştirme yöntemi
- Zaman etkisi
- Boy eksenindeki boru ve zemin değişimleri

Bu değişkenler içerisinde, termoplastik özellikteki politilen türü bir gömülü bir borunun uzun süreli performansına etkileyen en önemli değişken; borunun zamana bağlı davranış biçimidir. Bu bakımdan boruların uzun dönemli duraylılıklarının belirlenmesi, onların zamana bağlı karakteristiklerinin saptanabilmesi ile olanaklıdır. Her ne kadar Watkins Geliştirilmiş Iowa formülünde bu etkiyi göz önünde tutabilmek için  $D_L$  gecikme faktörünü kullansa da uzun dönemde ve sıcaklık dalgalanmalı ortamlarda  $D_L$  faktörünün yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu amaçla Chuo ve Lytton (1998), Hoeg elastik çözümüne Laplace dönüşümleri uygulayarak viskoelastik bir yöntem geliştirmiştir. Hoeg eşitliğinde yer alan C ve F parametreleri bu yöntemde,

$$C = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{1}{2t}\right)^m M_1 \Gamma(1-m) \left(\frac{D}{T}\right)}{\left[\left(\frac{1}{2t}\right)^{m_c} E_{cl} \Gamma(1-m)\right]} \quad (3.73)$$

$$F = \frac{1}{4} \left( \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \frac{\left(\frac{1}{2t}\right)^m M_1 \Gamma(1-m) \left(\frac{D}{T}\right)^3}{\left[\left(\frac{1}{2t}\right)^{m_c} E_{cl} \Gamma(1-m)\right] (1-\nu_c^2)} \quad (3.74)$$

Bağıntılarda yer alan;

$D$  : Boru çapı

$t$  : Geçen süre (dakika)

$m$  : Zeminin üstel kuvvet sabiti

$m_c$  : Borunun üstel kuvvet sabiti

$M_1$  : Zeminin stres boşaltma modülü (Rölaksasyon)

$T$  : Boru et kalınlığı

$\Gamma$  : Gama Fonksiyonu

$$\Gamma = \int_0^{\infty} e^{-x} . x^{n-1} . dx \quad (3.75)$$

$$\Gamma(n+1) = n.\Gamma(n) \quad (3.76)$$

### 3.8 Sonlu Elemanlar Sayısal Analiz Yöntemleri

Sonlu elemanlar analiz yöntemleri analitik yaklaşımlarla çözümü çok güç olan problemleri çözebilmek için 1940'lı yıllarda Hrennikoff (1941) ve McHenry (1943) tarafından geliştirilmiş bir analiz yöntemidir. Yöntemin en temel farkı, incelenen ortamın şekil değişimlerini bütünsel çözüm yapan diferansiyel denklemlerle değil, basit ve parçalı algoritmik eşitlikler kullanarak analiz edebilmesidir. Bu bakımdan birçok karmaşık mühendislik problemlerin çözümünde yararlanılmaktadır. Gelişen bilgisayar performansları, yöntemin kullanım kolaylığı arttırmış ve ticari programlar halinde pazarlanarak kullanım alanı arttırılmıştır.

Gömülü boru davranışının sonlu elemanlar analiz yöntemleri kullanılarak incelenmesine yönelik birçok araştırma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, Brown (1967), Bjeerrum, Clausen ve Duncan (1972), Abel ve Mark (1973), Katona Forest Odello ve Allgood (1974), Chang, Espinoza ve Selig (1980), Massicotte (2000), Mada(2005), Suleiman (2004) vb'dir. Akademik çalışmalar yanında boru tasarımında Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemlerini kullanan paket programlarda bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, PIPE5 (Wilson 1971), Utah Üniversitesinde geliştirilmiş olan CANDE ( Culvert Analysis and Design) (Allgood 1976) ve (Katona 1980) , Amerika Birleşik Devletlerinde betonarme rijit borularda sıkça kullanılan SPIDA (Heger,Liepens,Selig 1985) ve farklı amaçlarla geliştirilip boruların davranışını belirlemek için de kullanılabilen ABAQUS, ANSYS, FEMAP, PLAXIS, ADINA, DIANA, LUSAS ve SIGMA programlarıdır. Genel bir değerlendirme altında, gömülü boru davranışını sonlu elamanlar paket programlarını kullanarak hesaplamanın olumlu ve olumsuz yanları şu başlıklarda özetlenebilir.

- Boru-zemin sürekli ortamının bütünü modellenerek çözümleme yapar
- Radyal ve aksel şekil değişimleri, çember kesitinde oluşan açılmal gerilmeler, eğilme momentleri, normal ve kesme kuvvetleri detaylı olarak değerlendirilebilir, çözümler grafikler halinde raporlanabilir.
- Borunun aşırı yüklemeler altında hangi şekillerde burulma, burkulma, kırılma veya şekil değişime büyüklükleri gösterdiği incelenebilir. Borunun performansında sınır koşulları görsel olarak değerlendirilebilir.
- Farklı yerleştirme koşullarındaki farklı geometrik özellikteki boruların, davranışı hesaplanabilir.
- Geri dolgu malzemesinin tabakalı olarak yerleştirilmesi modellenerek hendek ortamının inşaatı sırasında boru kesitindeki oluşabilecek deformasyon büyüklükleri hesaplamalara katılabilir. Böylelikle hizmet başlangıcı ve yük taşıma öncesinde borunun şekil değişimleri değerlendirilebilir.
- Boru üzerine gelen yükler yalnızca ölü yükler olarak değil, aynı zamanda canlı yükler olarak ta hesaplanabilir
- Yüklemeler eşdeğer ve eşdeğer olmayan, yayılı, yanal, asimetric ve karmaşık olarak etkilebilir
- Zemin farklı modeller altında değerlendirilebilir (Mohr Columb, Hardening Soil, Cam-Clay vb )
- Zemin-boru arayüzeyinde oluşacak kayma düzlemi dikkate alınabilir.



Bunun yanında farklı zemin koşullarından geçen boru hatları için farklı sonlu eleman analizleri yapmak gerekmektedir. Günümüzde bilgisayar işletim sistemlerinde iki boyutlu analizler oldukça hızlı yapılabilse de, üç boyutlu analizler özellikle uzun boylamsal modellemelerde oldukça zaman alıcı olmaktadır. Kullanılmakta olan sonlu elemanlar analiz programlarında termoplastik kökenli boruların viskoelastik davranışları tam olarak modellenememektedir. Sıklıkla kullanılan iki boyutlu analiz metodunda ise, borunun boylamsal yönde davranışı saptanamamakta, yorulma çatlamları ile beklenmeyen kesme kuvvetleri etkileri de değerlendirilememektedir.

#### 4. GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNDE YAPILMIŞ ARAZİ VE LABORATUAR DENEYLERİ

##### 4.1 Arazi Deneyleri

Arazi ortamında gömülü esnek boruların davranışlarını incelemek için Hurd (1986), Adams (1989), Webb (1996), Ataoğlu (2000), Masada (2002), Suleiman (2002), Kawabata (2004), Sargand (2005) gibi birçok araştırmacı tarafından deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Adams (1989) tarafından Pensilvanya’da yapılan arazi deneylerinde 610 mm’lik esnek kıvrımlı polietilen borular 30 metre yüksekliğindeki kontrollü dolgu altına yerleştirilmiştir. Dolgunun aşamalı olarak serilmesi sırasındaki boruda ortaya çıkan şekil değişimleri incelenmiştir. Kısa süreli yüklemeler göz önüne alınarak yapılan incelemelerde, yanal eksende ortaya çıkan şekil değişimlerinin düşey eksene göre oldukça az olduğu bunun yanında ortalama çembersel şekil değişiminin % 1-1.2 mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Selig (1990) aynı deney ortamına yerleştirilmiş borular üzerinde uzun süreli gözlemler yapmaya devam etmiş, boru davranışının kısa ve uzun süreli dayanımını inceleyerek karşılaştırmalar yapmıştır.

Webb (1996) Massachusetts Üniversitesi kampüs alanında yaptığı arazi deneyinde; hendek ortamına farklı yerleştirme koşulları altında yerleştirilen bir HDPE borunun davranışını incelemiştir. Farklı çaplardaki esnek borular, farklı genişliklerdeki hendeklere farklı geri dolgu malzemeleri kullanılarak yerleştirilmiştir. İncelemeleri sonucunda, özellikle uzun süreli değerlendirmelerde, geri dolgu malzemesinin sıkıştırılmasında kullanılan yönteminin boru davranışına belirleyici bir etkisi olduğunu gözlemlenmiştir.

Bir başka arazi deneyinde Hurd (1986), Ohio’da yaptığı araştırmalarında, 172 farklı özellikteki kıvrımlı polietilen borunun 21 farklı arazi ortamındaki, uzun süreli davranışını incelemiştir. Hurd’un dört yıl süren bu kapsamlı çalışmasında, araştırmacı, en büyük şekil değişimlerinin boru çapları ile orantılı olmadığını, buna karşın şekil değişimlerinin boru esneklik faktörü ile yakından ilgili olduğunu gözlemlenmiştir.

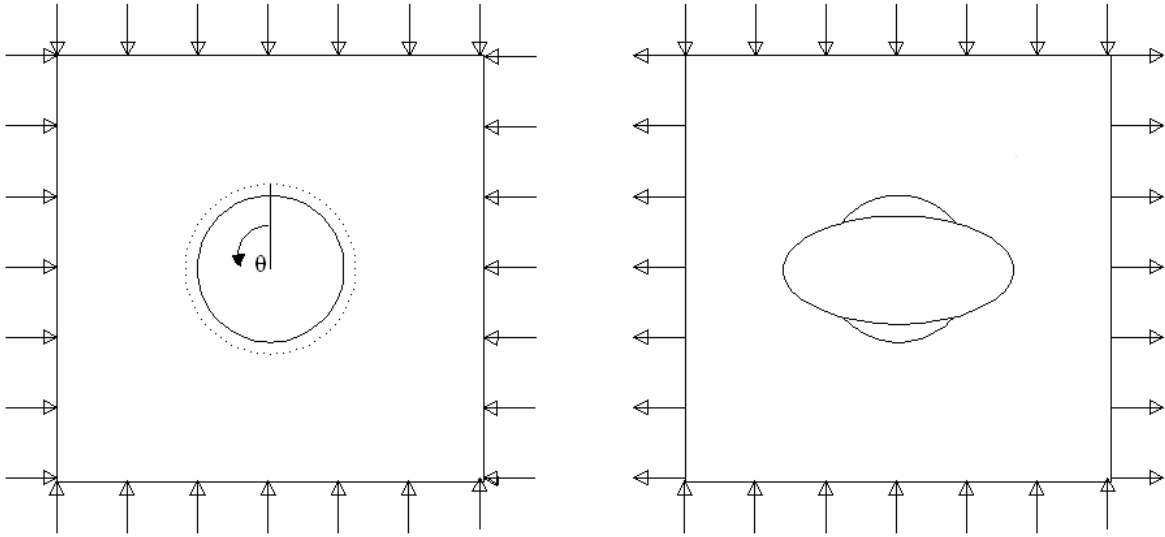
Florida Atlantic Üniversitesinde Ataoğlu (2000) tarafından uzun süreli arazi deneylerinde 305 mm çapındaki kıvrımlı boruların 3200 saatlik davranışı incelenmiştir. Eksenel deformasyonları ve kesitte ortaya çıkan eğilme momentlerinin saptandığı araştırmalarında Ataoğlu sıcaklık etkisinin boru davranışına olan etkisini değerlendirmiştir.

Her ne kadar arazi deneyleri boru-zemin ilişkisinin anlaşılabilmesi için en geçerli ve gerçekçi yöntem olsa bile, bazı önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle arazi koşullarında ayrıntılı akademik çalışmalar yapılmasını zorlaştırması bunlardan biridir. Aynı zamanda çok amaçlı araştırmalar yapılabilmesi için deney koşullarının değiştirme ve parametreler üzerinde oynama olanaklarının güçlüğü de araştırmalar açısından diğer engellerdir. Son olarak, deneylerin tekrarlanması sürecinde katlanması gerekli, zaman, maliyet ve işgücü problemleri çalışmaların verimini azaltmaktadır.

#### 4.2 Laboratuvar Deneyleri

Günümüzde ölçüm alma tekniklerindeki önemli gelişmeler ve fonksiyonel deney kutuları yardımıyla arazi ortamları gerçeğe yakın olarak laboratuvar koşullarında modellenenilmektedir.

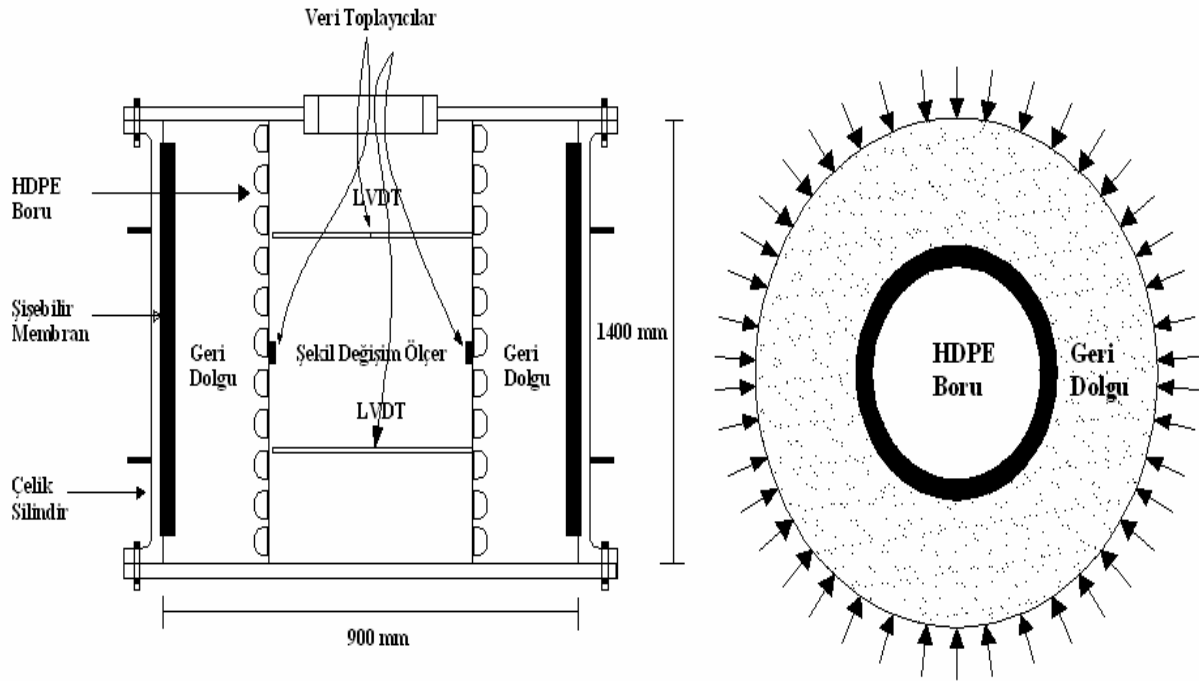
Hendek ortamına yerleştirilmiş bir esnek boruda düşey yüklemeler etkisi altında iki farklı şekil değiştirme formu ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.1de görüldüğü gibi esnek davranış gösteren boru kesitinde çembersel gerilmeler etkisi ile eşdeğer radyal büzülmeler ve/veya eğilme gerilmeleri etkisi ile ovalleşme biçiminde eşdeğer olmayan deformasyonlar oluşur..



Şekil 4.1 Uniform ve Uniform Olmayan Deformasyon Biçimleri

Selig (1993), bu iki farklı gerilme dağılışı ve deformasyon biçiminin birbirlerinde ayrılarak

incelenmesi gerektiğini savunmuş ve yalnızca çembersel deformasyonların ölçülmesine olanak sağlayan bir basınç hücresi tasarlamıştır.

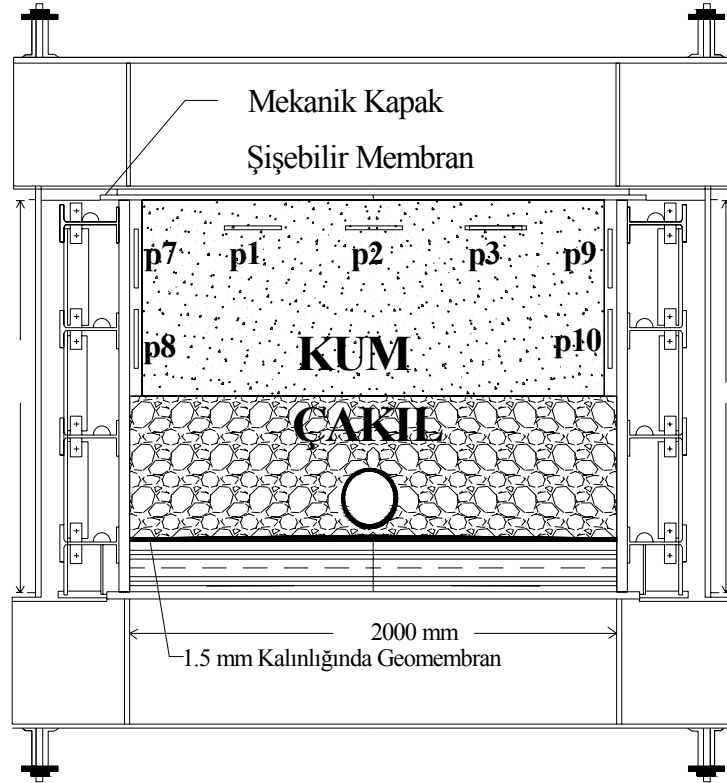


Şekil 4.2 Selig Basınç Hücresi

İlk kez Massachusetts Üniversitesi Araştırma laboratuvarlarında kullanılan ve boyutları Şekil 4.2’de gösterilen Selig basınç hücresinin çalışma prensibi oldukça basittir. Merkeze sabitlenen esnek borunun çevresine istenilen sıklıkta geri dolgu malzemesi yerleştirilmekte ve basınç hücresi duvarlarından hava basınçlı membranlarla çembersel yük aktarımı uygulanmaktadır. Boru kesitine yapıştırılan gerilme ve deplasman ölçerler yardımıyla borunun çembersel gerilme ve şekil değişimleri saptanmıştır. Basınç hücresinin bu ilk örneğinden sonra Western Ontario Üniversitesi’nde de bir benzeri yapılarak Moore (1996) Laidlaw (1999) ve Brachmann (2000) tarafından kullanılmıştır.

Gömülü boruların laboratuvar koşullarında incelenmesine ilişkin bir başka çalışma yine Western Ontario Üniversitesi’nde Brachman (1999) tarafından tasarımı yapılan deney tankıdır. Sonsuz bir ortamdaki gömülü esnek boruyu modelleyebilmek amacıyla tasarlanan deney tankının ayrıntılı çizimi Şekil 4.3’de görülmektedir. 40 mm kalınlığındaki çelik plakalarla güçlendirilen kutu, 2 metre genişlik, 2 metre uzunluk ve 1.6 metre yükseklikte boyutlandırılmıştır. 4MN’luk yüklemelere dayanabilen tank, 1000 kPa’lık düşey yük altında % 1’den daha az yanal deplasman göstermiştir ( $K_0$  koşullarını sağlayabilmektedir). Deneyde

yüklemeye için hava basıncı ile çalışan membran yastıklar kullanılmıştır. Geri dolgu ile duvar yüzeyleri arasında sürtünmeyi azaltmak için duvar yüzeyi yağlanmış ve böylelikle geri dolgunun oturması sırasında duvar-zemin ara yüzeyindeki sürtünme etkisi azaltılmıştır. Dolgu içerisine yerleştirilen oturma plakaları yardımı ile zeminin davranışı da ayrıca göz önüne alınmıştır.



Şekil 4.3 Brachman Deney Kutusu

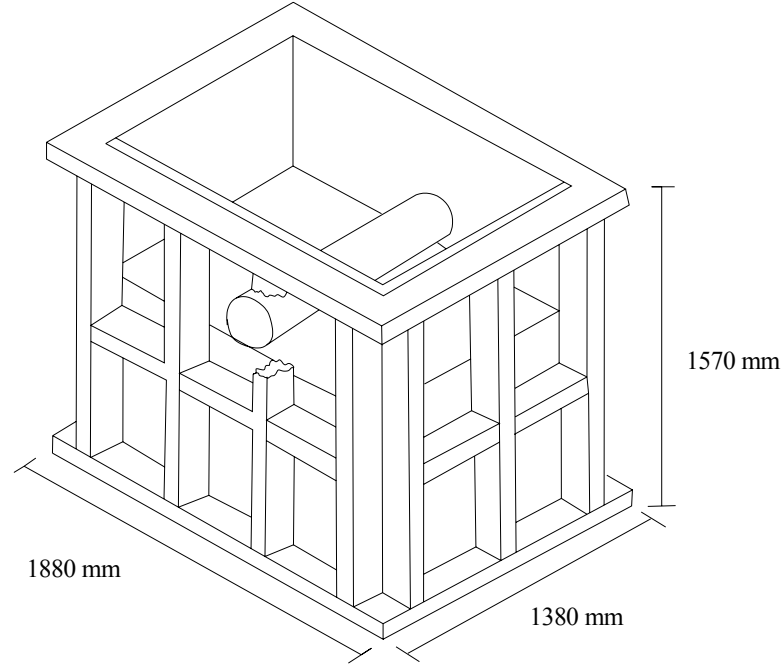
Sungro Cho ve Vipulunandan (2003) tarafından modellenen deney kutuları Şekil 4.4’de görülmektedir. Houston Üniversitesi (CIGMAT) Araştırma laboratuvarlarında kullanılan deney kutularında, hendek ortamına yerleştirilmiş bir PVC esnek borunun davranışı incelenmiştir.



Şekil 4.4 Cho Deney Kutusu

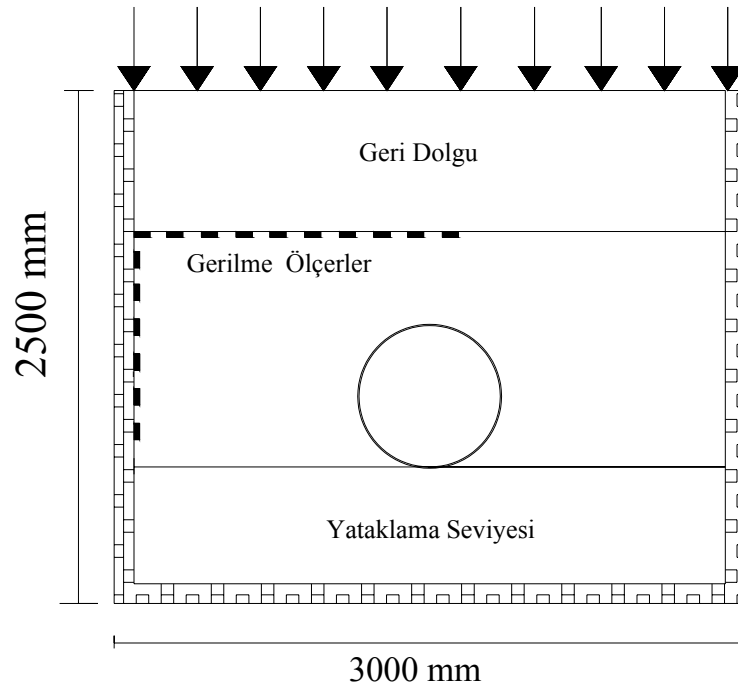
1200x400x900 mm ve 800x600x400 mm boyutlarında iki farklı deney kutusunda yapılan laboratuvar deneylerinde Cho, ortalama 400 kPa'lık düşey yükleme altındaki PVC esnek boruların uzun süreli davranışlarını incelemiştir. Araştırmacılar deneysel çalışma verileri ile Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinin sonuçlarını karşılaştırmışlar ve Watkins'in önerdiği  $D_L$  zaman faktörünün uzun süreli davranışı ne ölçüde yansıtabildiğini değerlendirmişlerdir.

Rogers (1996) tarafından Loughborough Teknoloji Üniversitesi laboratuvarlarında tasarlanan bir başka deney kutusu Şekil 4.5'de görülmektedir. 1880 mm genişlik 1380 mm uzunluk ve 1570 mm yükseklikte olan kutuda yüklemeler için su basıncı ile çalışan membran yastıklar kullanılmıştır. Ancak, deney sırasında gözlemlenen yan duvarlardaki aşırı deformasyonlar, ortamın  $K_0$  koşullarının sağlanmasını engellemiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar değerlendirilirken, Rogers, bu problemi göz önünde bulundurmuş ve kutu tasarımlarında  $K_0$  koşulunun önemini vurgulamıştır.



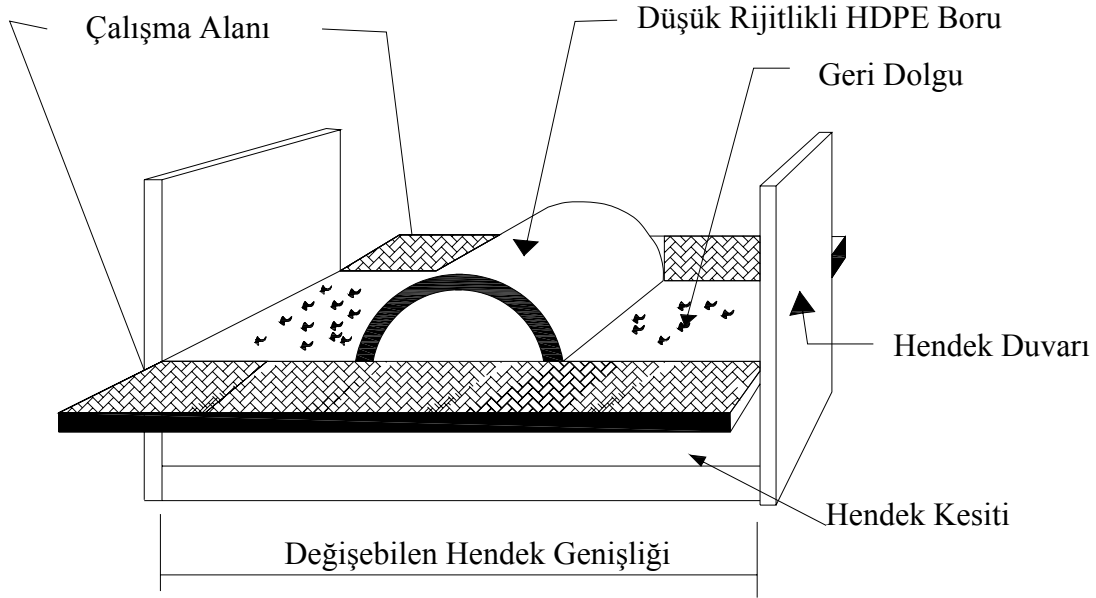
Şekil 4.5 Rogers Deney Kutusu

Goube ve Muller (1981) tarafından tasarlanan bir başka deney kutusu Şekil 4.6’de görülmektedir. 2500 mm yükseklik, 3000 mm genişlik ve 2000 mm uzunlukta boyutlandırılan deney kutusunda, yüklemeler su basıncı ile çalışan membran yastıklarla sağlanmıştır.



Şekil 4.6 Goube Deney Kutusu

Gömülü esnek boruların farklı hendek genişliklerinde ve farklı hendek duvarı rijitliklerindeki davranışlarını incelemek amacıyla Zolad (1996) Şekil 4.7’de görülen kutu tasarımı geliştirmiştir.



Şekil 4.7 Zolad Deney Kutusu

Borunun yataklama seviyesine konulmasından geri dolgu seriminin tamamlanmasına kadar olan süreçte, boru davranışının incelenebildiği deneysel çalışmada, bir yükleme sistemi uygulanmamıştır. Deney kutusu farklı duvar genişliklerinde ve rijitliklerinde hazırlanarak arazi ortamındaki doğal zeminin olası farklılıkları modellenenmiştir. Zolad’ın çalışmalarını yaptığı deney kutusu üzerinde McGrath (2002) bazı küçük değişiklikler yaparak araştırmaları sürdürmüştür.

Smith (2004) tarafından yapılan Şekil 4.8’deki deney kutusunda 100,150 ve 180 mm çaplarındaki HDPE boruların göçme dayanımları incelenmiştir. Boyutları 750 mm genişlik, 600 mm yükseklik 500 mm uzunluğu olan deney kutusunda % 65-85 sıklık aralıklarında geri dolgu yerleştirilmiştir. Hidrolik kırıklar yardımı ortalama 2000 kPa seviyelerine kadar düşey yüklemeler uygulanmış ve boruların aşırı şekil değiştirme biçimleri gözlemlenmiştir.





Şekil 4.8 Smith Deney Kutusu

Sydney Üniversitesi Geoteknik Araştırmaları Laboratuvarında Cameron (2005) tarafından hazırlanan deney kutusu Şekil 4.9’ da görüldüğü gibi hendek ortamındaki bir gömülü esnek boruyu modelleyebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Kutu 750 mm genişlik, 1800 mm yükseklik ve 1800 mm uzunluktadır. Hidrolik basınç tabakaları kullanılarak kutu yüzeyinden 100 kPa’lık düşey yüklemeler uygulanmış ve 300, 375 ve 450 mm çaplarındaki HDPE borular üzerinde deneyler yapılmıştır. Geri dolgu malzemesinin boşaltılması sırasında kolaylık sağlanması için farklı bir asansör sistemi kullanılmış ve deneylerin tekrarlanma sayısı artırılmıştır. Deneyler sırasında yan duvarların deformasyonları kontrol edilerek  $K_0$  koşullarının sağlanmasına özen gösterilmiştir.



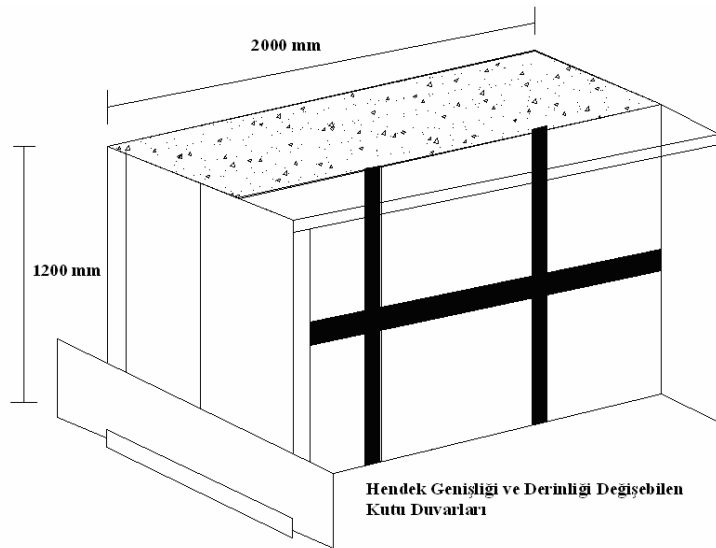
Şekil 4.9 Cameron Deney Kutusu

Kawabata (2002) tarafından sonsuz ortamdaki bir gömülü esnek borunun davranışını incelemek amacıyla Kobe Üniversitesi laboratuvarlarında tasarlanan deney kutusu ise Şekil 4.10'da görülmektedir. 2000 mm genişlik, 1000 mm uzunluk ve 1000 mm yükseklik boyutlarındaki deney kutusuna yüklemeler hidrolik krikolar kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda 150 mm çapındaki esnek borunun ayrıntılı davranışı incelenmiştir. 18° aralıklarla yerleştirilen 20 deplasman ölçerle boru kesitinde ortaya çıkan gerilme dağılımları saptanmıştır.



Şekil 4.10 Kawabata Deney Kutusu

East London Üniversitesi Geoteknik laboratuvarlarında Devapria (1999) tarafından tasarlanan bir başka deney kutusunda, hendek genişliklerinin boru davranışına olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.11'de görülen 5 mm kalınlığındaki kayabilen çelik levhalardan üretilen deney kutusu 1200 mm yüksekliğinde ve 2000 mm derinliğinde olup, 350,450,600,750,ve 800 mm genişliklerinde ayarlanabilmektedir. Çalışmada, 150 mm çapında polietilen esnek bir borunun davranışı incelenmiş ve yüklemeler için geri dolgunun kendi ağırlığı kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Devapria Deney Kutusu

## 5. YTU LABARATUVARLARINDA GELİŞTİRİLMİŞ HENDEK ORTAMINI MODELLEYEN DENEY SİSTEMİ

Ölçüm sistemlerindeki gelişen teknolojik yenilikler laboratuvar koşullarında, arazi ortamlarını gerçeğe çok yakın olarak modellemeyi olanaklı kılmaktadır. Bir önceki bölümde tanıtıldığı gibi, laboratuvar ortamlarında, gömülü boruların sonsuz bir ortamdaki davranışını incelemek için büyük deney tankları, hendek ortamındaki davranışlarını araştırmak için deney kutuları, çembersel şekil değişimlerini saptamak için basınç hücreleri ve çok amaçlı santrifüj deney sistemleri kullanılmaktadır.

Bu deney sistemlerinden hangi türü kullanılırsa kullanılsın, bir deney düzeneğinin tasarımında şu temel adımların izlenmesi gerekmektedir.

- İncelenecek amaca uygun bir deney kutusu türünün seçilmesi
- Seçilen deney kutusu boyutlarının standartlara uygun boyutlarda belirlenmesi
- Deney kutusunun sınır koşulları ve yük altında göstereceği şekil değişimi sınırlarının belirlenmesi
- Yükleme türünün, yükleme yöntemin ve yükleme sınırlarının belirlenmesi
- Deney kutusunda kullanılacak uygun zemin ve boru malzemesinin seçilmesi
- İncelenecek şekil ve biçim değişimleri için amaca uygun ölçüm aygıtlarının seçilmesi ve deney sistemine doğru biçimde konuşturulması
- Veri toplama, filitreleme ve ara yüzey bağlantılarının dış etkilerden en az derecede etkilenecek kalitede seçilmesi ve bağlantılarının uygun yapılması
- Verileri yorumlanabilir değerler haline getirecek uygun bir yazılım dilinin seçilmesi ve programının yazılması.

Bu adımlar göz önünde tutularak YTU Geoteknik laboratuvarlarında bir model deney kutusu ve ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Tasarım aşamasından, kurulum sürecine kadar yapılan çalışmalar aşağıda verilmektedir.

### 5.1 Deney Kutusu

Deney kutusunun tasarım adımı, ayrıntılı bir kaynak taraması yapılmış ve daha önceki çalışmalarda kullanılan deney kutuları değerlendirilmiştir. Kutularının birbirlerine göre olumlu ve eksik yönleri belirlenmiş, kutunun ön tasarımında bu bilgilerden yararlanılmıştır.

Kutu boyutlarının belirlenmesi sürecinde, kullanılacak HDPE borular için Çizelge 5.1’de görülen ASTM D 2321 ve AASTHO Sec 30 standartlarının önerdiği hendek genişlikleri temel alınmıştır.

Çizelge 5.1 ASTM D 2321 ve AASTHO Sec 30’a göre En küçük Hendek Genişliği

| Boru Dış Çapı (mm) | AASTHO Sec 30 (mm) | ASTM D 2321 (mm) |
|--------------------|--------------------|------------------|
| 120                | 480                | 530              |
| 177                | 570                | 580              |
| 233                | 650                | 640              |
| 287                | 740                | 690              |
| 356                | 840                | 760              |

Yapılan değerlendirmeler çerçevesinde, 200, 242 ve 312 mm çaplı HDPE borular için 700 mm genişliğin uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.2’de seçilen 700 mm kutu genişliğinin boru davranışında olan belirleyici etkisini incelemek amacıyla PLAXIS 7.2 (2D) programında bir dizi analiz yapılmıştır. Analizlerde 242 mm boru çapı ve 200 kPa düşey yükleme göz önüne alınarak farklı genişliklerin boru davranışına etkisi değerlendirilmiştir.

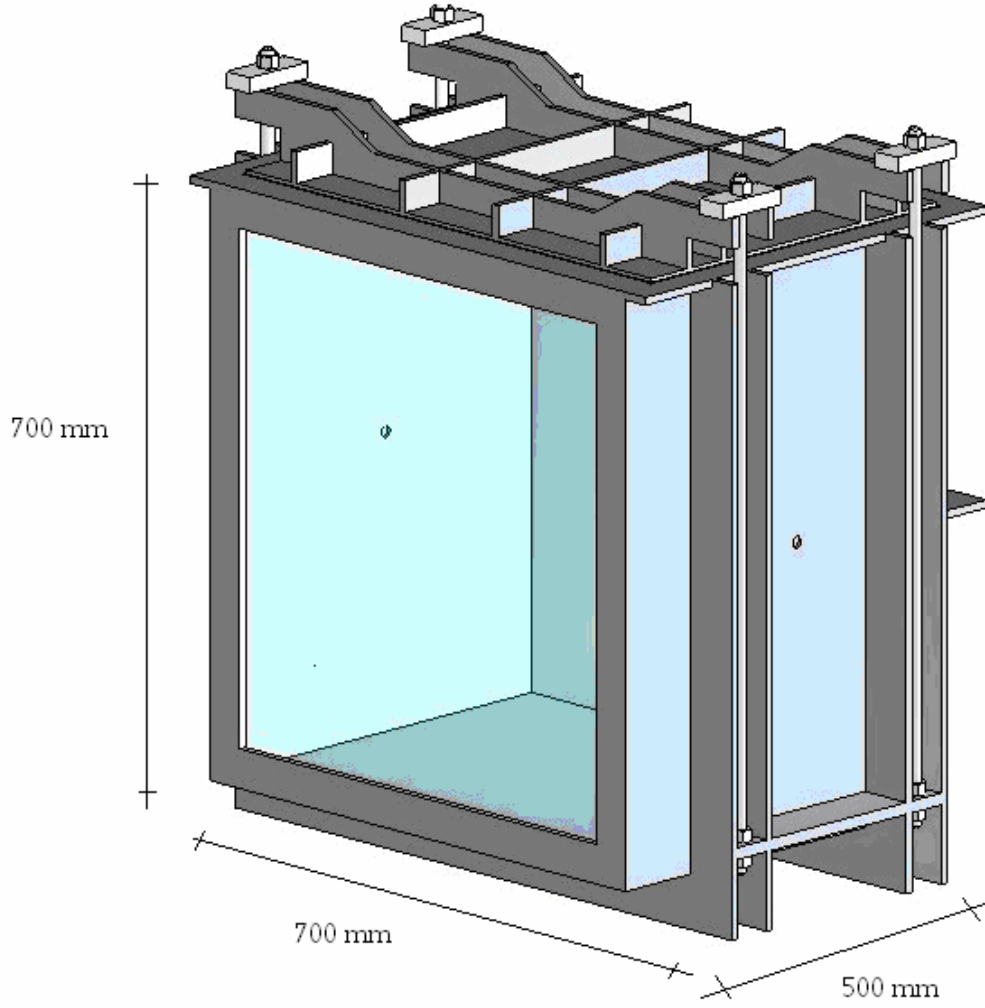
Çizelge 5.2 242 mm Çapındaki HDPE Borunun Farklı Hendek Genişliklerindeki Davranışı

| Kutu Genişliği (mm)       | Oran       | Boru Kesitinin Düşey Yerdeğiştirilmesi (m) | Boru Kesitinde Oluşan Kesme Kuvveti (kN/m) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momenti (kNm/m) |
|---------------------------|------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 350 mm                    | 0.5        | $3.21 \times 10^{-3}$                      | $-111.7 \times 10^{-3}$                    | $5.06 \times 10^{-3}$                        |
| 420 mm                    | 0.6        | $3.32 \times 10^{-3}$                      | $-114.5 \times 10^{-3}$                    | $5.61 \times 10^{-3}$                        |
| 560 mm                    | 0.80       | $3.44 \times 10^{-3}$                      | $-115.1 \times 10^{-3}$                    | $6.59 \times 10^{-3}$                        |
| <b>700 mm<sup>x</sup></b> | <b>1.0</b> | <b><math>3.32 \times 10^{-3}</math></b>    | <b><math>-119.6 \times 10^{-3}</math></b>  | <b><math>7.07 \times 10^{-3}</math></b>      |
| 840 mm                    | 1.2        | $3.37 \times 10^{-3}$                      | $-123.5 \times 10^{-3}$                    | $7.36 \times 10^{-3}$                        |
| 1050 mm                   | 1.5        | $3.42 \times 10^{-3}$                      | $-128.5 \times 10^{-3}$                    | $7.65 \times 10^{-3}$                        |
| 1190 mm                   | 1.7        | $3.45 \times 10^{-3}$                      | $-153.4 \times 10^{-3}$                    | $8.06 \times 10^{-3}$                        |

Boruların çembersel ve teğetsel deformasyonlarının oluşmasında boylemsal rijitliğinin etkisini azaltmak için deney kutusunun derinliğin belirlenmesine özen gösterilmiş ve daha önceki deneysel çalışmalardan edinilen deneyimler ışığında boru çapının 1.5 katı kadar bir uzunluğun kutu derinliği için yeterli olduğu varsayılmıştır (Laidlaw 1999). Bu nedenle, deney kutusunun derinliği 500 mm olarak belirlenmiştir.

Geri dolgu malzemesinin yüklemelerden doğan gerilmeleri eşdeğer oranda dağıtabilmesi için boru çaplarının 2 katı kadar bir dolgu yüksekliği (700 mm) yeterli görülmüştür. (AASHTO H-20 standartı, dolgu yüksekliğin en az 300 mm olmasını önermektedir)

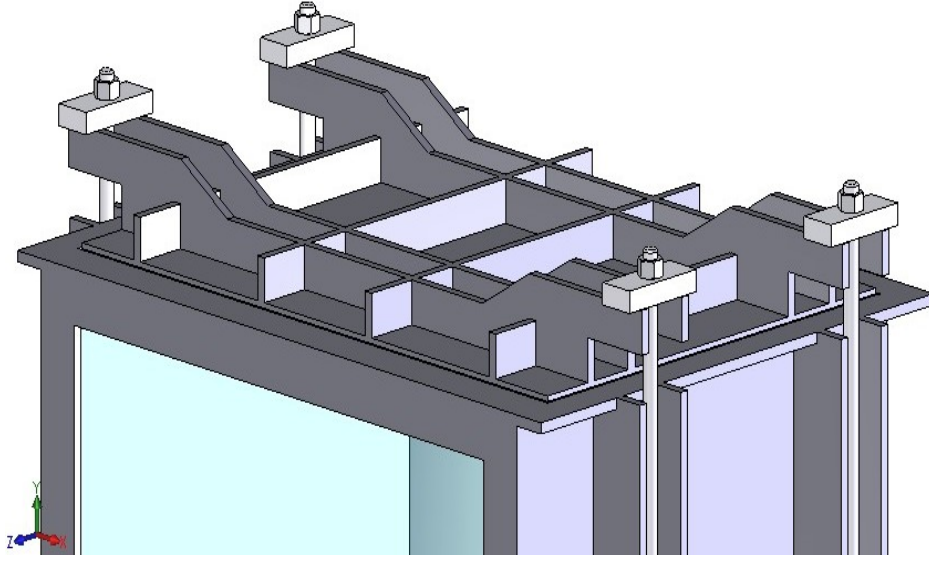
Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, kutunun  $K_0$  koşullarını sağlayabilmesi için 8 mm kalınlığında lazer kesim çelik levhalar kullanılmış ve levhalar çift taraflı olarak yüksek voltajda ve iki katlı olarak kaynaklanmıştır. Bunun yanında rijitliğinin artırılması amacıyla kutu çevresi çelik profillerle güçlendirilmiştir. Kutunun ön yüzünden fotogrametrik görüntülemeler alınabilmesi amacıyla iki tabaka halinde 40 mm kalınlığında pleksiglas cam kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Solid Works Programında Üç Boyutlu Olarak Modellenen Deney Kutusu

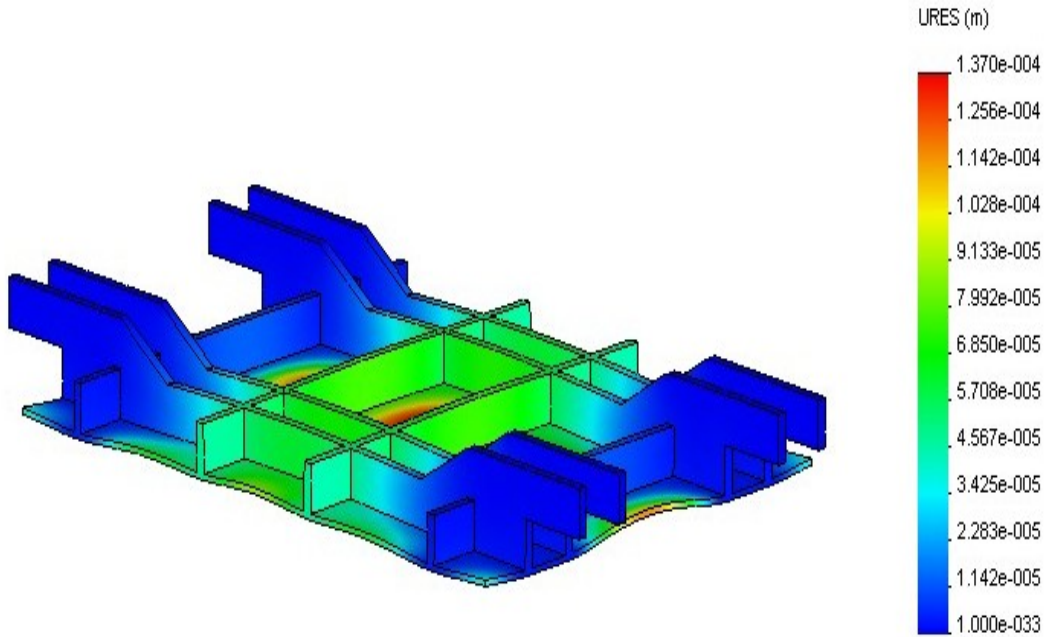
Şişebilen basınçlı membranların kullanıldığı deney kutusunda eşdeğer düşey yüklemelerin uygulayabilmesi amacıyla, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi deney kutusu kapağı ve kilit sistemi ayrıca tasarlanmıştır. Kutu kapağında ve iki yan duvarında membran yastık siboplarının çıkabileceği delikler açılmıştır.

Şekil 5.5’te görüldüğü gibi ara elemanlarla güçlendirilen deney kutusundan beklenen en önemli davranış, yüklemeler altında olabildiğince az deformasyona uğramasıdır. Kutunun şekil değişimi sınırlarını belirlemek için tasarımı yapılan kutu ve kapağın özellikleri SOLID WORKS sonlu elemanlar programında Şekil 5.3 ve 5.4’de görüldüğü gibi üç boyutlu olarak modellenmiş, ve imalat öncesi kutu davranışı değerlendirilmiştir.



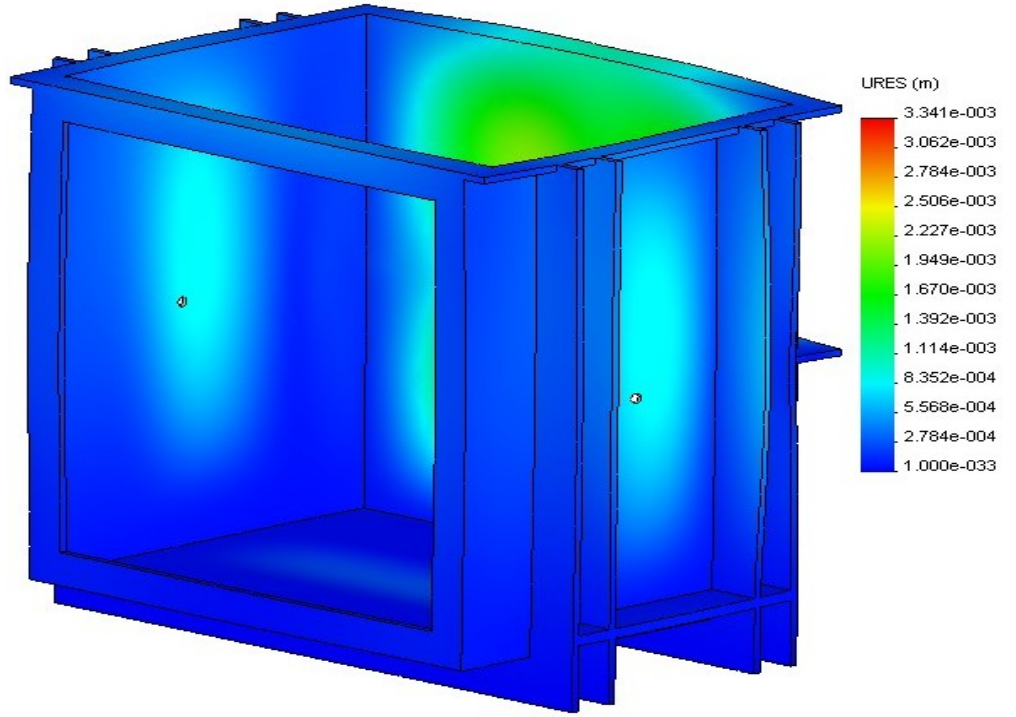
Şekil 5.2 Deney Kutu Kapağı Kilit Sistemi

SOLID WORKS programında yapılan analizlerde Şekil 5.3 ve 5.4’ de görüldüğü gibi 300 kPa yükleme altında kutu yan duvarları ve kutu kapağının şekil değişimi hesaplanmıştır. Yapılan üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde kutu yan duvarlarının 1 mm’nin altında şekil değişimi yaptığı görülmüştür. Bu değerler kutunun  $K_0$  koşullarında davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Nitekim Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, deneyler sırasında alınan duvar sehimleri ile SOLID WORKS analiz sonuçları birbirlerini desteklemektedir.

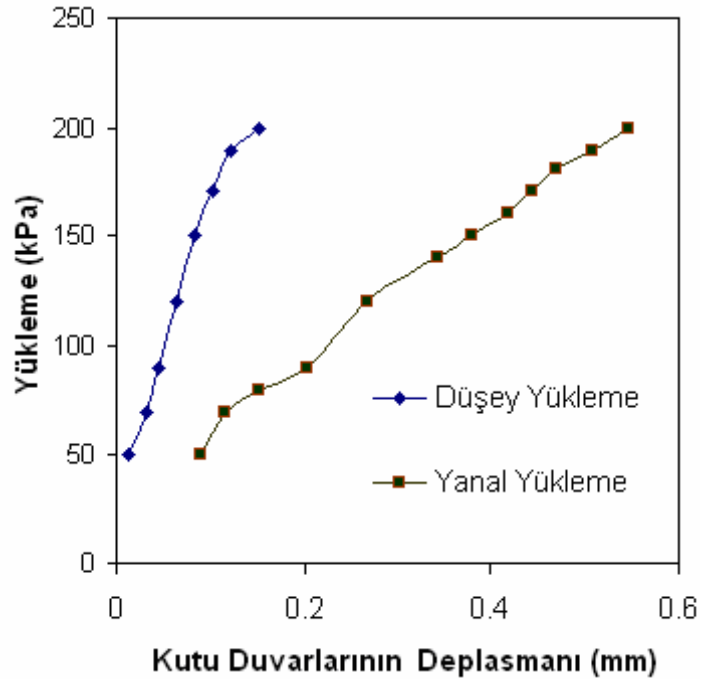


Şekil 5.3 Deney Kutu Kapağının 300 Kpa Yük Altındaki Şekil Değiştirmesi





Şekil 5.4 Deney Kutusunun 300 Kpa Yükleme Altındaki Şekil Değişimi



Şekil 5.5 Deneyler Sırasında Kutu Duvarlarının Gösterdiği Ortalama Deplasmanlar

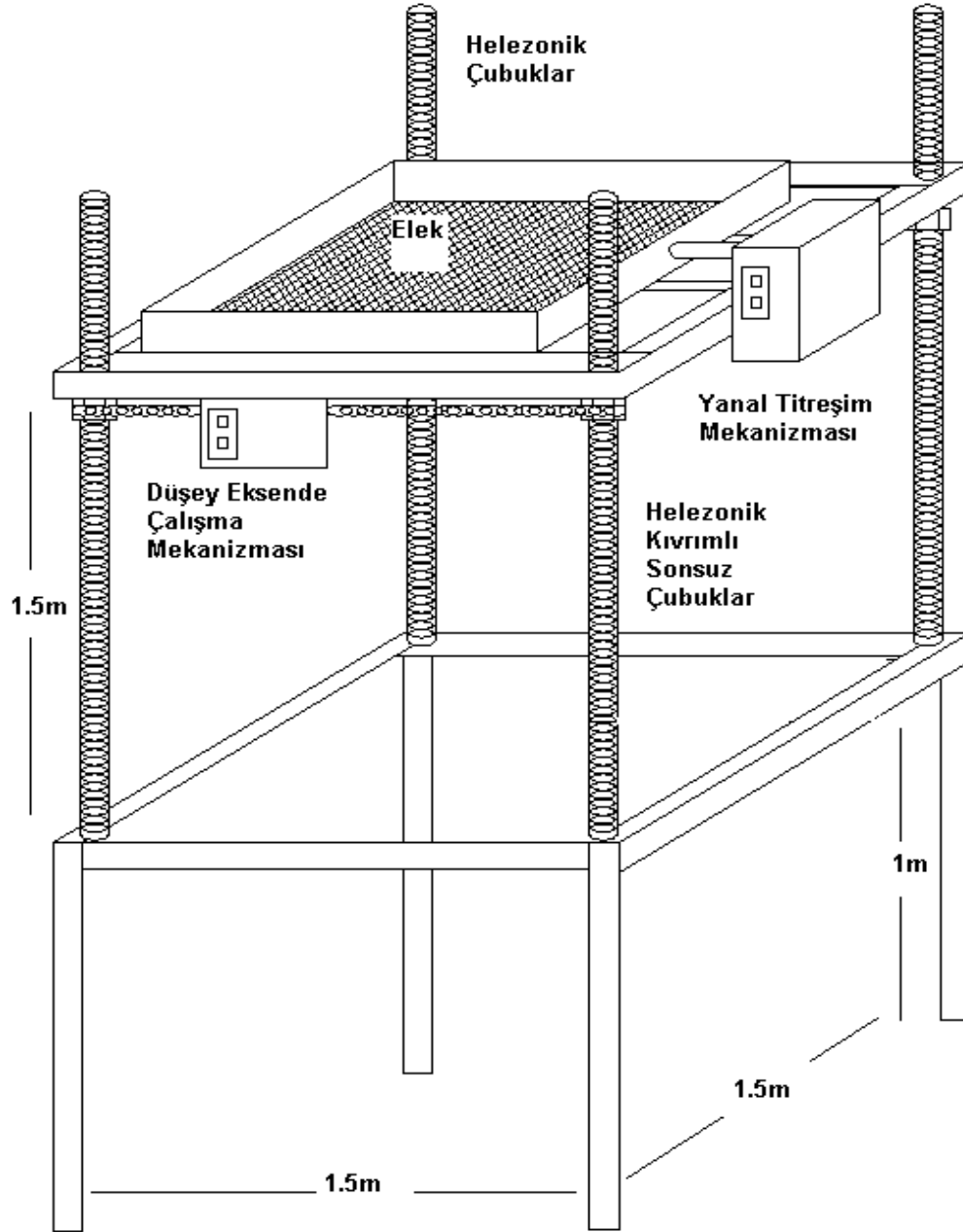




Şekil 5.6 Laboratuvar Deney Sisteminin Genel Görünüşü

## 5.2) Yağmurlama Sistemi

Laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmalarda zeminin deney kutularına eşdeğer sıklıkta yerleştirilmesi için genellikle yağmurlama sistemlerinden faydalanılmaktadır. Kaynak taramalarından ve daha önceki çalışmalardan edinilen deneyimler ışığında, YTU Geoteknik laboratuvarlarında deney kutusu ile birlikte eş zamanlı olarak Şekil 5.7' görülen yağmurlama düzeneği yapılmıştır. Yağmurlama sistemi tabanda 1500mm x 1500mm x 1000mm boyutlarında bir açıklığı vardır. Farklı elek açıklıklarında düzenlenebilen elek sistemi, hız denetimli bir motor ile helezonik çubuklar üzerinde hareket edebilmektedir. Frekansı ayarlanabilir olan bir titreşim mekanizması elek sistemine bağlanmıştır. Dolgunun hedeflenen sıklık seviyesinde yerleştirilmesi için, elek tablası, denetimli hızda ve istenilen titreşim frekansında çalıştırılmaktadır. Elek tablasının helezonik çubuklar üzerinde yağmurlama süresince yükselmesi ve belirlenen bir frekansta salınım yapması, kum tanelerinin yerleştirme süresince her zaman eşit (h) potansiyel enerjisinde deney kutusuna düşmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 5.7 Yağmurlama Sistemi

## 5.2 Yükleme Sistemi

Arazi ortamında

- Trafik yükleri
- Çevrimsel yükler
- Noktasal tekil yükler
- Geri dolgu yükleri
- Sismik yükler
- Yanal yüklemeler (şev kaymaları)
- Hidrostatik yükler (Su altı yerleşimlerinde)
- İç basınç yükleri (vakum veya basınç türü)

gibi bir çok yük türü veya birleşimi boruya etkiyebilir. Kaynaklar incelendiğinde yükleme biçimleri için bir dizi farklı yöntemin uygulandığı görülmektedir. Örneğin laboratuvar deneylerinin ilk öncüleri sayılan Utah State ve Ohio üniversitelerinde dolgu yüklerini modellemek için deney kutuları üzerinden çok sayıda hidrolik plaka ayakları etkitilmiştir. Ancak, yapılan üç boyutlu sonlu elamanlar analizlerinde bu tür bir uygulamanın geri dolgu içerisinde çok karmaşık kayma gerilmeleri oluşturduğunu ve arazi ortamlarındaki gerilme dağılımlarını yansıtamadığı anlaşılmıştır.

Laboratuvar deneylerinde kullanılan bir başka yöntem ilk kez, Hoeg (1968) tarafından kullanılan şişebilen lastik torbalar kullanılmasıdır. İlerleyen yıllarda sertleştirilmiş kükürtle güçlendirilen doğal kauçuk esaslı membran yastıklar laboratuvar deneylerinde sıkça kullanılmıştır. DiFrancesco (1994), Rogers (1996), Brachman (1999), gibi araştırmacıların tasarladıkları deney düzenekleri, bu uygulamalara ilişkin birkaç örnektir. Bunun yanında, Goube (1981), Zanzinger (1995) , Rogers (1996), Gartung (1998) gibi araştırmacılar da şişebilen membran yastıklara hava yerine su basınçları uygulamışlardır.

Yürütülen çalışmalarda denetim kolaylığı nedeniyle hava basıncı ile çalışan membranlar kullanılmıştır. Bu amaçla sanayide, hidrofor sistemleri, su botu üreticileri, paraşüt bezi imalatçıları, çadır kumaşçıları ve geotekstil malzemeleri üreten firmalarla iletişim kurulmuştur. Öncelikli olarak çadır, bot, paraşüt bezi üreten şirketlerden alınan örnekler üzerinde deneyler yapılmış, ancak çelik liflerle güçlendirilmiş bu tür malzemelerin hacim artışı sağlamadığı ve lifli yapılarının eşdeğer basınç dağılımı engellediği (hidrolik ayaklar gibi) görülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasından vazgeçilmiştir.

Bunun üzerine kaynaklarda yer aldığı gibi kükürtle sertleştirilen kauçuk malzemelerden üretilen membranlar üzerinde durulmuştur. Kauçuk ithal eden şirketlerden, doğal kauçuk (Polysopren) temin edilerek, sıcak plastik kalıp atölyesinde sertleştirilmiştir. 22 mm kalınlığında 500x700 mm boyutlarında preslenen membran kumaşlar, özel yapıştırıcılarla kenarlarından katlanarak yapıştırılmış şişebilir düzgün yüzeyli yastıklar haline getirilmiştir.

#### 5.4) Ölçüm Aygıtları

##### 5.4.1 Boru Kesiti Deformasyonları

Deneysel çalışmalarda kullanılan 200,242 ve 312 mm çaplarındaki boruların yerdeğiştirme büyüklüklerini saptayabilmek için sırasıyla 50,75 ve 100 mm ölçüm alma aralıklarına sahip (LPT) doğrusal yer değişimi ölçerler kullanılmıştır. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi özel hazırlanan düzenekler yardımıyla boru içerisine (+) biçiminde yerleştirilen ölçüm aygıtları, 0.01 mm incelikte okumalar almıştır.

##### 5.4.2 Boru Duvarlarında Ortaya Çıkan Şekil Değişimleri

Yüklemeler etkisinde boru çember kesitinde ortaya çıkan düşey ve yanal yerdeğiştirmeler, boru duvar kesitlerinde;

- Eğilme türü biçim değişimleri ( Moser 1990) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_b = 6(t)(\Delta y)/(D^2) \quad (5.1)$$

Burada;  $\Delta y$  = Düşey yerdeğiştirme  $t$  = Boru et kalınlığı,  $D$  = Boru çapıdır.

- Çembersel biçim değişimleri ise

$$\varepsilon_c = P_v D/(2tE) \quad (5.2)$$

$P_v$  = Düşey yük,  $E$  = Borunun Young Modülü

- İç basınç etkisi ile oluşan çembersel biçim değişimleri ( Moser 1990)

$$\varepsilon_p = PD/(2tE) \quad (5.3)$$

ile bulunabilir. Burada;  $P$  = İç basınçtır

- Boylamsal uzamalar (Poisson Oranı etkisi)

$$\varepsilon = -\nu \quad (5.4)$$

İle bulunmaktadır

Bu davranışlar arasında, boruların burulma, burkulma ve ezilme türü göçme mekanizmalarının oluşmasında en etkili olan biçim değişimi parametresi, eğilme türü biçim değişimidir. Bu bakımdan araştırmalar özellikle eğilme momentleri üzerinde odaklanmıştır. Eğilme momentlerinin belirlenebilmesi için, boruların taç, taban, bel, omuz ve yan duvarlarının iç yüzeylerine ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$  açılarında) biçim değişimi ölçer rozetler yapıştırılmıştır. 5 mm x 5 mm boyundaki biçim değişimi ölçerler “Winston” köprüsü prensibinde 350 ohm ve 5 mA akımda çalışmaktadır. Üretici firmadan alınan kullanım bilgileri ışığında, biçim değişimi ölçerlerin  $-20$  ila  $150\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda çalışabildiği ve her  $10\text{ }^\circ\text{C}$  ısı artışında ölçümlerin  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  hata verdiği göz önüne alınmıştır. Laboratuvar koşullarının yaklaşık olarak  $10^\circ$  ile  $30^\circ$  sıcaklık aralıklarında bulunduğu düşünüldüğünde sıcaklık değişiminin biçim değiştirme rozetleri üzerindeki etkisinin gözardı edilebileceği görülmüştür. Bunun yanında biçim değiştirme ölçer rozetler ile yapıştırıldığı HDPE boru yüzeyinin farklı Poisson oranlarında olması, ölçümlerin kalibre edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu amaçla iki farklı Poisson oranının yer aldığı bir malzemeyi tek malzemeye dönüştüren Dalley ve Riley (1978) eşitliğinden yararlanılmıştır.

$$CF = (1 - \nu_0 K_t) / (1 + K_t / -\nu) \quad (5.5)$$

Eşitlikte yer alan;

$\nu_0$  ; Biçimdeğiştirme rozetlerinin Poisson Oranı

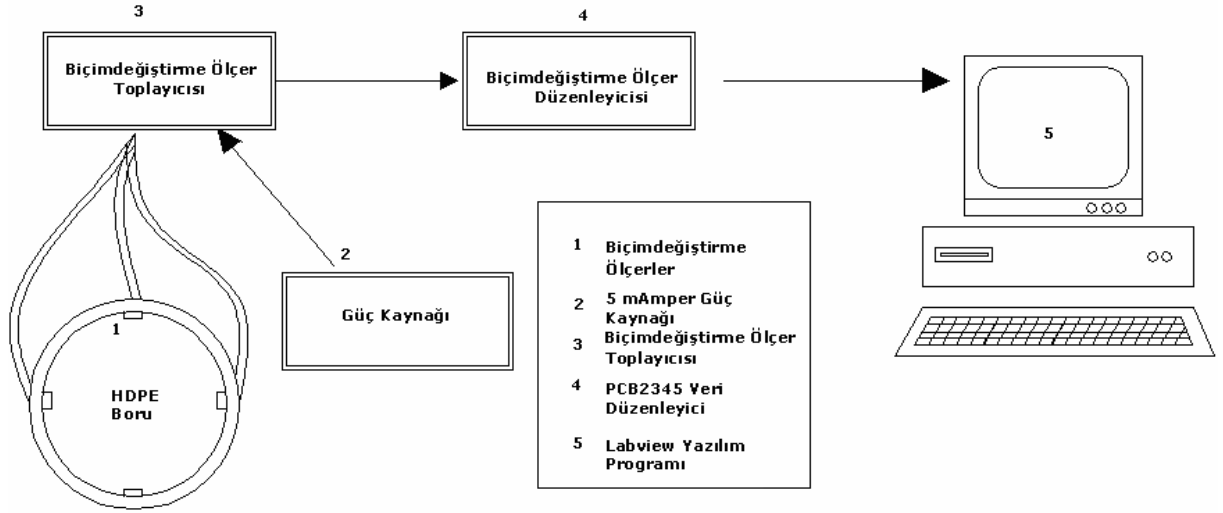
$\nu$  ; Yapıştırılan yüzeyin Poisson Oranı

$K_t$  ; Üretici firmanın önerdiği duyarlılık katsayısı

Biçim değiştirme ölçerlerin Poisson Oranı 0.285, HDPE malzemenin Poisson Oranı 0.40-0,45 ve hassaslık katsayısı 0.004 değerlerinde alınmıştır.

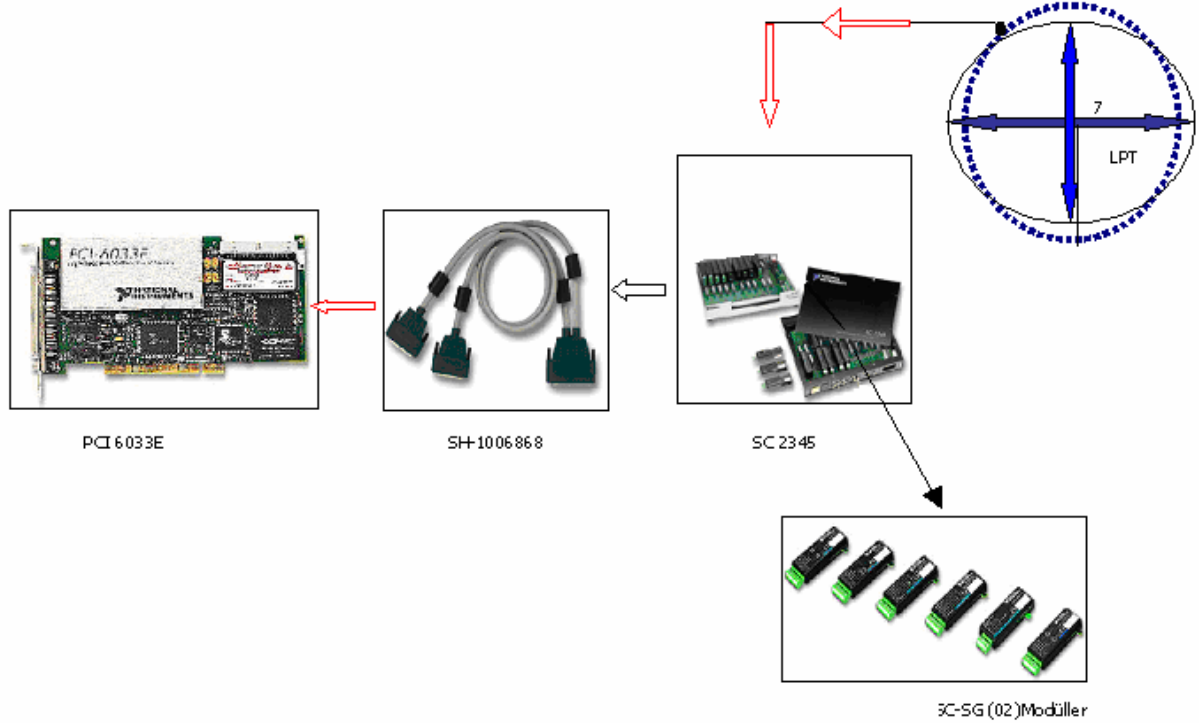
Rozetlerin yapıştırılması özenle yapılması gerekmektedir. Yapıştırılacak yüzey saf alkol ile temizlenerek rozetler HDPE yüzeye  $45^\circ$  açılarda ve özel yapıştırıcılar kullanılarak bütünleşik bir yapıda konuşlandırılmıştır. Deney sırasında olası zedelenmelere karşı rozet yüzeyleri silikon kaplamalarla sırlanmış ve sistemi elektrik kaynağından doğan gürültülerden korumak için, topraklama düzeneği bilgisayar ve ara bağlantı kablolarında sürekli olarak sağlanmıştır.

Ölçüm aygıtları Şekil 5.8 görülen sıralamada düzenlenmiştir.



Şekil 5.8 Ölçüm Agytlarının Yerleşimi

Birleştirme ölçer toplayıcı olarak National Instrumentation firmasından temin edilen SC-SG Modüller ve SC 2345 kullanılmış, SH10006868 kablolar ile bilgisayar ana kartına takılan PCI603E okuma kartına aktarılmıştır.



Şekil 5.9 Laboratuar Deneylerinde Kullanılan Ölçüm Agytları

### 5.3 Fotogrametrik Ölçümler

Model kutusunun şeffaf ön yüzü fotogrametrik yöntemlerle boru davranışının eş zamanlı görüntüler altında saptanabilmesini olanaklı kılmıştır. Fotogrametrik incelemelerde Şekil 5.10 a' da görülen BASLER A302b isminde, üç adet kamera kullanılmıştır. Kameralardan alınan verilerin bilgisayar ortamına aktarımında Şekil 5.10 b'de görülen PCI IEEE 1394 veri aktarım kartından yararlanılmıştır.



a) BASLER A302b



b) PCI IEEE 1394

Şekil 5.10 Fotogrametrik Ölçümlerde Kullanılan Ölçüm Aygıtları

## 6. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Gömülü boruların yük altındaki davranışlarında, boru özellikleri kadar zemin (geri dolgu) malzemesinin de etkisi bulunmaktadır. Bu bakımdan zemin değişkenlerinin iyi bilinmesi ve ayrıntılı laboratuvar ve arazi deneyleri ile mühendislik özelliklerinin saptanması tasarımcılar açısından önemlidir. Deneysel çalışmalarda gömülü esnek boruların, farklı geri dolgu malzemelerinin farklı göreceli sıkılıklardaki davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla Şekil 6.1’de görülen uygun özellikteki kumlu ve çakıllı malzemeler seçilmiştir.

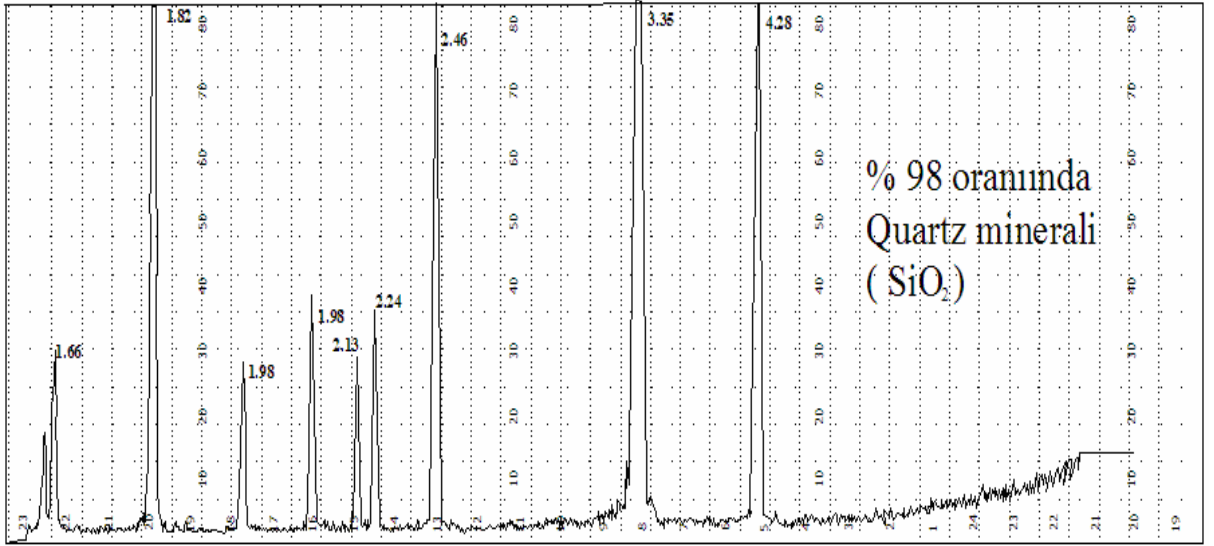


Şekil 6.1 Geri Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılan Zeminler

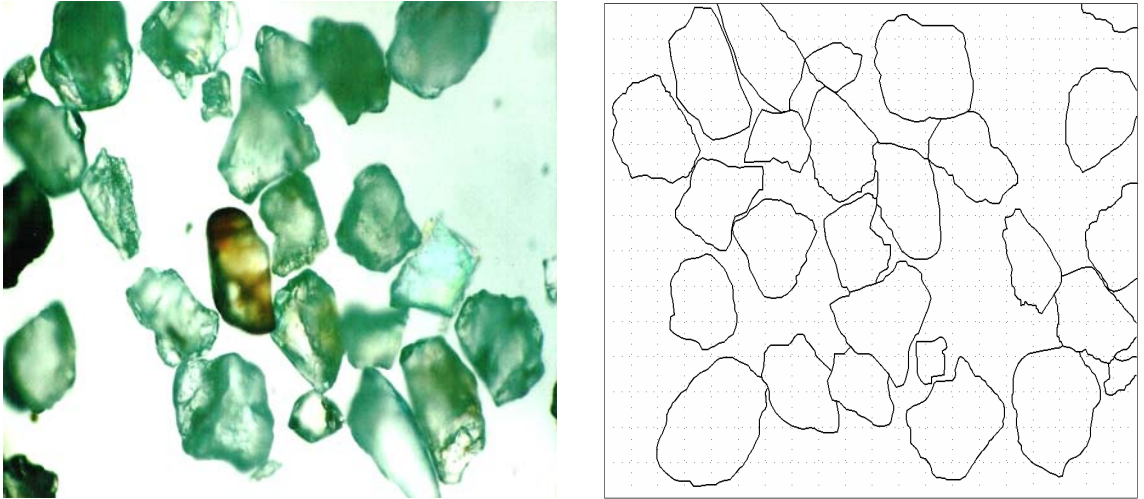
Seçilen kumlu ve çakıllı zemin malzemesinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için standart zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Bunun yanında kum malzemesi üzerinde üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır. Çakıllı malzeme için ise deney sistemi boyutlarına uygun ölçülerde hazırlanmış olan plakalarla, plaka yükleme deneyleri yapılmıştır.

Zemin-yapı etkileşiminde makro doku ile birlikte mikro dokunun da belirleyici bir etkisi olduğu bilinmektedir. Kum zemininin mikro dokusunun ve kimyasal bileşenlerinin belirlenmesi için kum örnekleri üzerinde X-Ray elektron yansıtma deneyleri yapılmıştır. Şekil 6.2’de görülen X Ray deneyleri sonucunda kum geri dolgu zeminin % 98 oranında ( $\text{SiO}_2$ ) Quartz’dan oluştuğu geri kalan kısmını ise farklı bileşenlerden oluşan feldspatlar içerdiği görülmüştür. Bunun yanında kumun, yoğunluklu ışık altında mikroskobik incelemeleri yapılarak ve Şekil 6.3’te görülen fotoğrafları çekilmiştir.





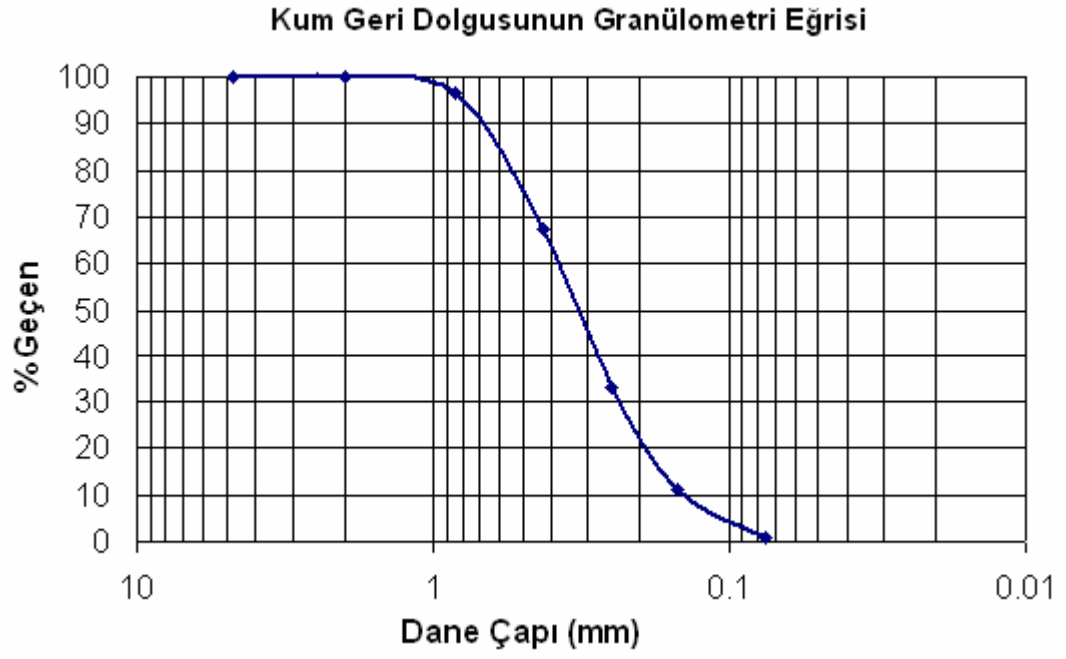
Şekil 6.2 Kum Malzemesinin X-Ray Deneyi Sonucu



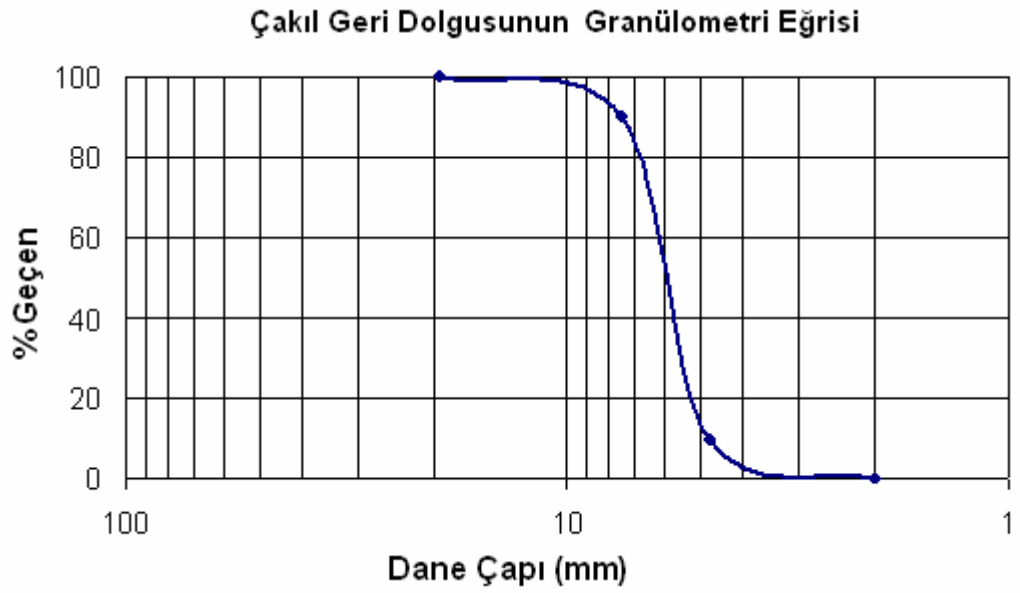
Şekil 6.3 Kum Malzemesinin Mikroskopik Fotoğrafları

### 6.1 Zeminlerin İndeks Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan kum ve çakıl malzemeleri Şile yöresinden temin edilmiştir. Malzeme örnekleri üzerinde yapılan elek analizi deneylerinin sonuçları Şekil 6.4 ve 6.5’de görülmektedir.



Şekil 6.4 Kum Malzemesine İlişkin Elek Analizi



Şekil 6.5 Çakıl Malzemesine İlişkin Elek Analizi

Analiz sonuçlarından görüleceği gibi, çakıl ve kum zeminler USC Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre; kötü derecelendirilmiş kum (SP) ve kötü derecelendirilmiş çakıldır (GP). Kullanılan zeminlerin en büyük ve en küçük boşluk oranı değerlerini belirleyebilmek için Adalier (1992) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. İç çapı 152 mm ve derinliği 117 mm olan, 2123 cm<sup>3</sup> hacmindeki Proktor kabı içerisine etüvde kurutulmuş olan örnekler 10 tabaka halinde yerleştirilmiştir. Kabın çevresine yanlardan çekiçle vurularak her bir tabakanın en büyük sıkışma yüzdesine ulaşması sağlanmış ve en küçük boşluk oranı elde edilmiştir. En büyük boşluk oranının belirlenmesinde ise, örneklerin aynı Proktor kabı içerisine ASTM standartlarında boyutları verilen bir huni yardımı ile küçük bir yükseklikten dökülmesi sonucu elde edilmiştir. Zeminlerin en küçük ve en büyük boşluk oranı değerleri Çizelge 6.1’de görülmektedir.

Çizelge 6.1 Kum Malzemesinin İndeks Özellikleri

|                                            |      |
|--------------------------------------------|------|
| Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü | SP   |
| Özgül Ağırlık, $G_s$                       | 2.65 |
| En Büyük Boşluk Oranı, $e_{max}$           | 0.87 |
| En Küçük Boşluk Oranı, $e_{min}$           | 0.52 |

Çizelge 6.2 Çakıl Malzemesinin İndeks Özellikleri

|                                            |      |
|--------------------------------------------|------|
| Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü | SP   |
| Özgül Ağırlık, $G_s$                       | 2.61 |
| En Büyük Boşluk Oranı, $e_{max}$           | 0.89 |
| En Küçük Boşluk Oranı, $e_{min}$           | 0.57 |

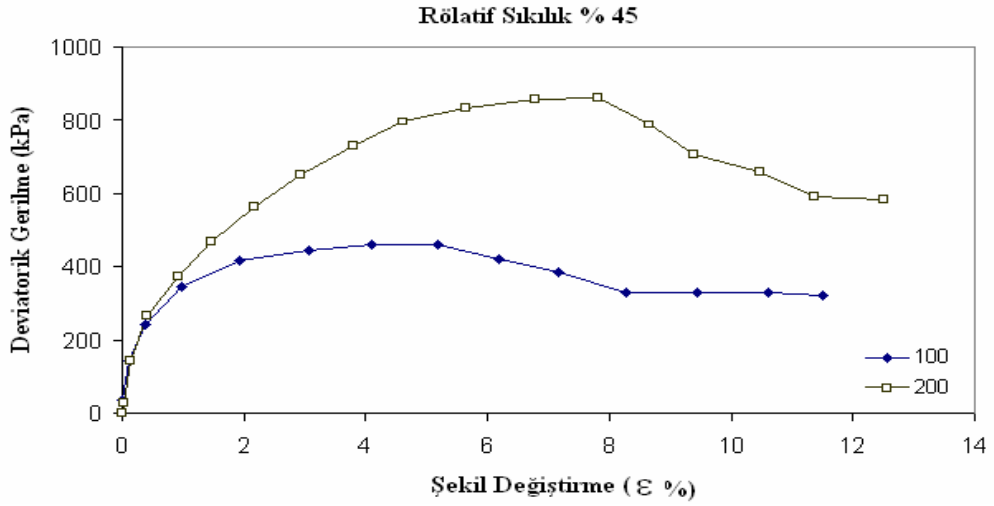
## 6.2 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Kum malzemesinin kayma dayanımı parametrelerini belirlemek amacıyla bir dizi üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Örneklerin farklı sıklıklarda hazırlanabilmesi için, sıklık-boşluk oranı ilişkisi incelenmiştir. Çizelge 6.3 bu sıklık-boşluk oranı değerleri görülmektedir.

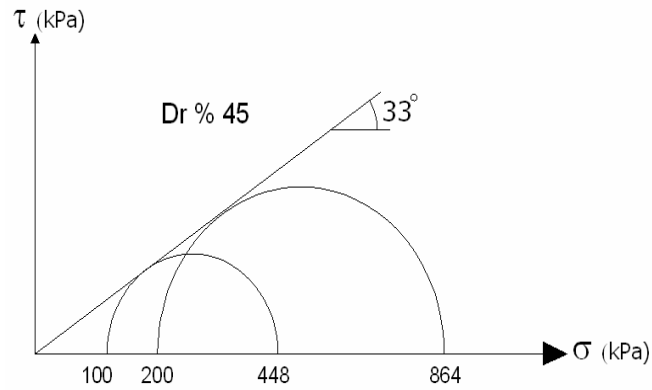
Çizelge 6.3 Kum Zemine ilişkin Sıkılık- Boşluk Oranı İlişkisi

| $D_r$ (%) | Boşluk Oranı (e) | $\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------|------------------|--------------------------------|
| 45        | 0.698            | 1.56                           |
| 60        | 0.644            | 1.61                           |
| 75        | 0.505            | 1.66                           |
| 85        | 0.536            | 1.72                           |

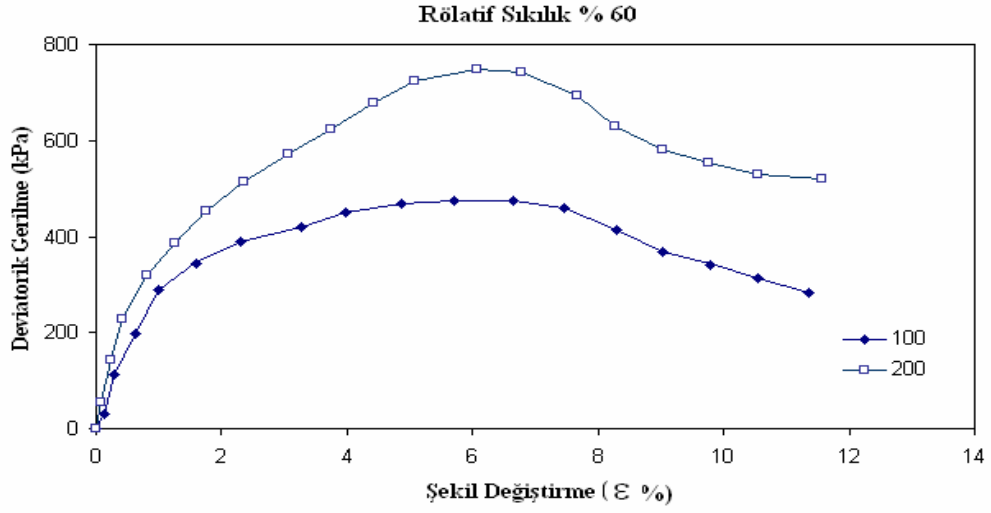
Basınç deneyleri, konsolidasyonlu drenajlı durum göz önünde alınarak yapılmış, 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde hazırlanan farklı sıkılık değerlerine sahip örnekler üzerinde, 100 kPa ve 200 kPa'lık hücre basınçları uygulanmıştır. Elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.6 , 6.8, 6.10 ve 6.12'de görülmektedir.



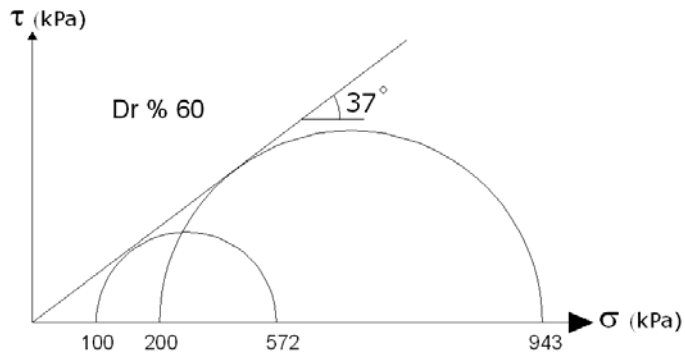
Şekil 6.6 Kum Geri Dolgusunun % 45 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi



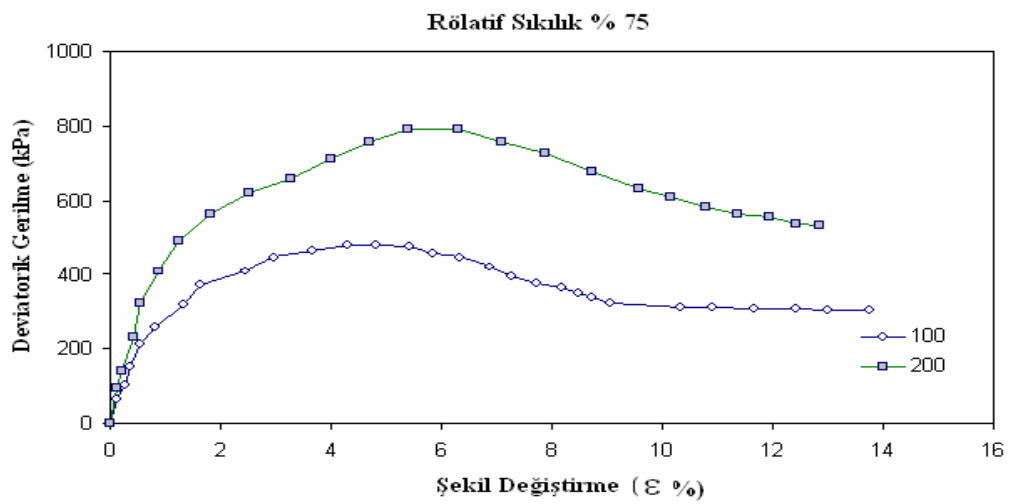
Şekil 6.7 Kum Geri Dolgusunun % 45 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı



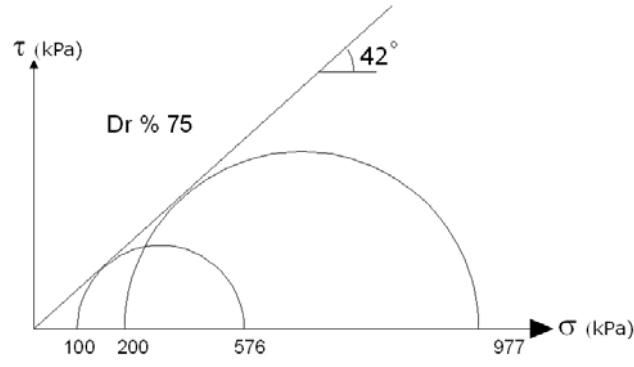
Şekil 6.8 Kum Geri Dolgusunun % 60 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değişirme Eğrisi



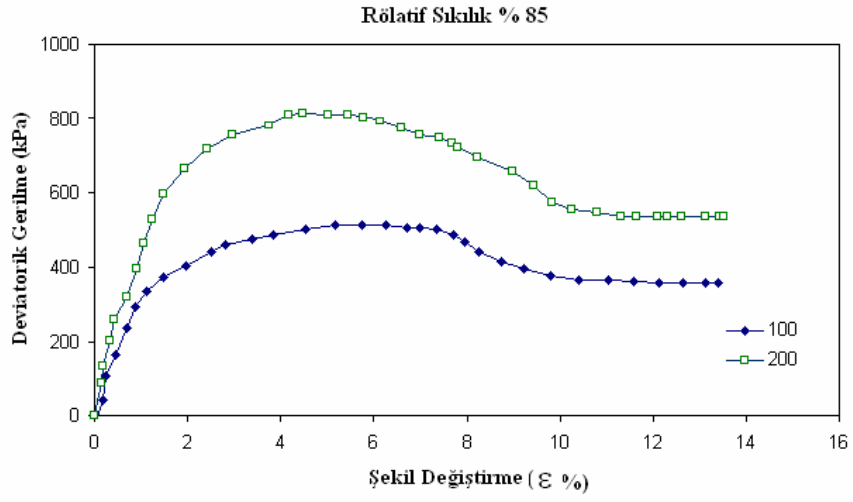
Şekil 6.9 Kum Geri Dolgusunun % 60 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı



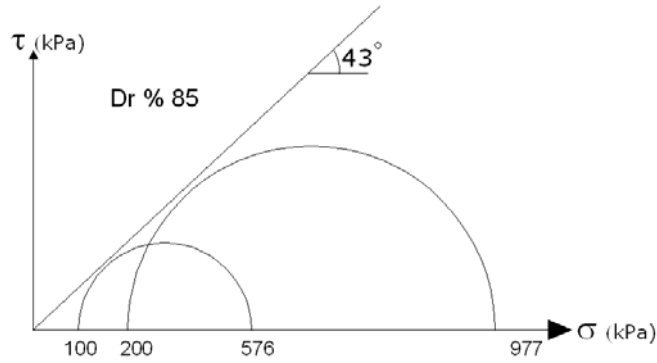
Şekil 6.10 Kum Geri Dolgusunun % 75 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değişirme Eğrisi



Şekil 6.11 Kum Geri Dolgusunun % 75 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı



Şekil 6.6 Kum Geri Dolgusunun % 85 Sıkılıktaki Gerilme Şekil Değişirme Eğrisi



Şekil 6.7 Kum Geri Dolgusunun % 85 Sıkılıktaki İçsel Sürtünme Açısı

Göreceli sıkılıkları % 45,60,75 ve 85 değerlerinde hazırlanan kum örnekleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinin toplu sonuçları Çizelge 6.4’de görülmektedir.

Çizelge 6.4 Kum Malzemesinin İçsel Sürtünme Açıları

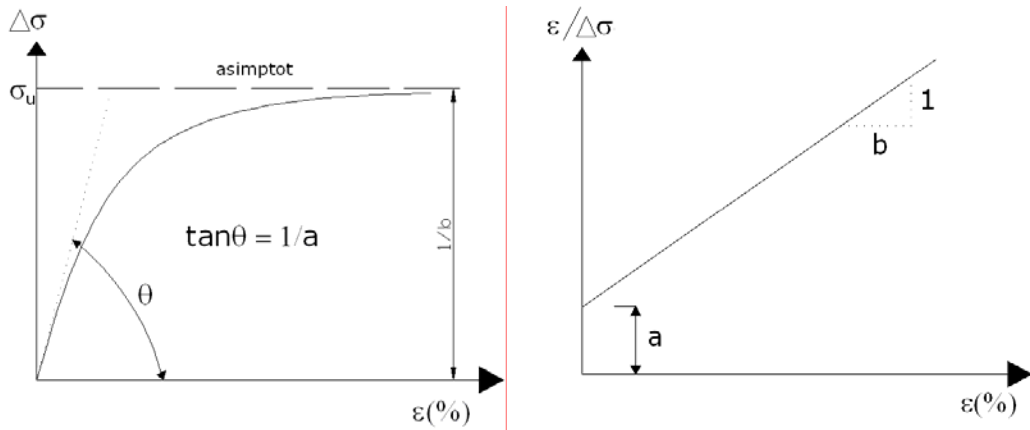
| $D_r$ (%) | $\sigma_3$ (kPa) | $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa) | $\phi$ (°) |
|-----------|------------------|-----------------------------|------------|
| 45        | 100              | 348.74                      | 33         |
|           | 200              | 664.79                      |            |
| 60        | 100              | 402.24                      | 37         |
|           | 200              | 703.37                      |            |
| 75        | 100              | 476.42                      | 42         |
|           | 200              | 777.42                      |            |
| 85        | 100              | 523.9                       | 43         |
|           | 200              | 761.57                      |            |

### 6.3 Hiperbolik Model

Üç eksenli basınç deney sonuçlarının değerlendirilmesinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar olan kesiminin, bağıntı 6.1’de bulunan hiperbolik bir fonksiyon ile tanımlanabileceği gösterilmiştir. (Duncan& Chang 1970)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (6.1)$$

Şekil 6.12’de gösterilen a ve b değişkenleri, malzeme parametreleri olup, 6.2 ve 6.3 bağıntıları ile elde edilir.



Şekil 6.8 Hiperbolik Modelde a ve b değişkenlerinin gösterimi

$$a = \frac{1}{E_i} \quad (6.2)$$

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (6.3)$$

Başlangıç tanjant modülü  $E_i = 1/a$  ise; herhangi bir  $\varepsilon$  değeri için;

$$\frac{\Delta \sigma_i}{\varepsilon} = \frac{1}{a + b\varepsilon} \quad (6.4)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (6.5)$$

Bağıntıları elde edilebilir.

6.12'deki grafikler yardımı ile  $a$  ve  $b$  parametrelerinin yanı sıra kumun farklı sıkılık ve hücre basınçlarına karşın başlangıç elastisite modülleri de belirlenebilir.  $E_i$  başlangıç (tanjant) elastisite modülü değişik çevre basınçları için Janbu (1963) tarafından önerilen;

$$E_i = K \sigma_p \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_p} \right)^n \quad (6.6)$$

bağıntısından yararlanılarak bulunabilir. Burada  $K$  ve  $n$  malzeme değişkenleri olup üç eksenli basınç deneylerinden bulunabilir.  $\sigma_3$  çevre basıncı  $\sigma_p$  ise atmosfer basıncını göstermektedir.

Duncan ve Chang (1970) kırılma anındaki asal gerilme farkının asimptotik asal gerilme farkı oranına kırılma oranı ismini vermişlerdir.

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (6.7)$$

6.7 bağıntısının kohezyonsuz zeminlerde;

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2\sigma_3 \sin \phi}{(1 - \sin \phi)} \quad (6.8)$$

biçiminde olduğuna göre, hiperbolik gerilme-şekil değiştirme bağıntısı;

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \varepsilon_a} = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{(1 - \sin \phi) R_f}{2\sigma_3 \sin \phi} \varepsilon_a} \quad (6.9)$$



halinde yazılabilir. 6.9 eşitliğinin  $\varepsilon_a$  ya göre türevi herhangi bir gerilme seviyesindeki tanjant sıkışma modülü değerini vermektedir. Kohezyonsuz zeminler için üç eksenli basınç deneyinde tanjant sıkışma modülü büyüklüğü;

$$E_t = \left( 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} \times \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} \right)^2 E_i \quad (6.10)$$

Bağıntısı ile açıklanabilir.

Değerlendirmekler sonucunda; kum örneği üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen  $E_i$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  ve  $R_f$  büyüklükleri Çizelge 6.5’de görülmektedir.

Çizelge 6.5 Üç Eksenli Deneylerinden Elde Edilen Kum Zeminin Mekanik Parametreleri

| $D_r$ | $\sigma_3$ (kPa) | $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kPa) | $a$ (kPa) <sup>-1</sup> | $b$ (kPa) <sup>-1</sup> | $E_i$ (kPa) | $R_f$ | $\phi$ (°) |
|-------|------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------|------------|
| 45    | 100              | 348.74                          | 0.0000181               | 0.0026                  | 55320       | 0.907 | 33         |
|       | 200              | 664.79                          | 0.0000109               | 0.0011                  | 91460       | 0.731 |            |
| 60    | 100              | 402.24                          | 0.0000147               | 0.0018                  | 68240       | 0.724 | 37         |
|       | 200              | 703.37                          | 0.0000084               | 0.0011                  | 118650      | 0.774 |            |
| 75    | 100              | 476.42                          | 0.0000118               | 0.0016                  | 84970       | 0.762 | 42         |
|       | 200              | 777.42                          | 0.0000057               | 0.001                   | 174480      | 0.777 |            |
| 85    | 100              | 523.9                           | 0.0000099               | 0.0015                  | 100660      | 0.786 | 43         |
|       | 200              | 761.57                          | 0.0000051               | 0.009                   | 197700      | 0.685 |            |

Sonuçlardan anlaşılabileceği gibi kum örneklerinin göreceli sıklık değerleri arttıkça başlangıç elastisite modüllerinin de arttığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte eşit sıklık kum örnekleri için  $E_i$ ’nin çevre basıncı ile orantılı olarak yaklaşık iki kat büyüdüğü görülmektedir.

#### 6.4 Plaka Yükleme Deneyleri

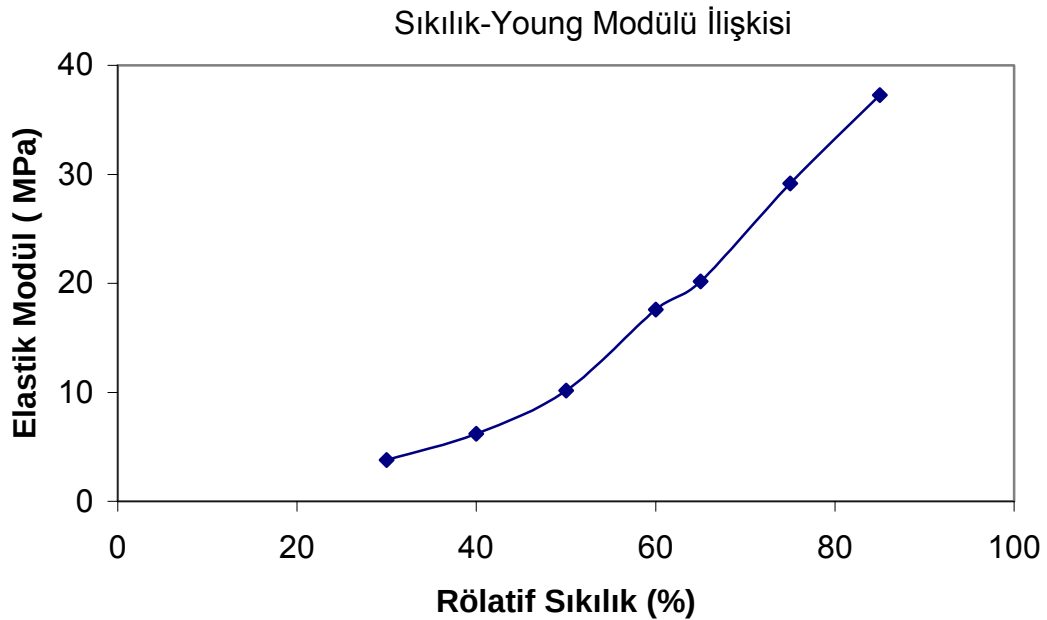
Laboratuar ortamında modellenen bir deneysel çalışmanın, matematiksel analizlerle yorumlanabilmesi için deneyde kullanılan malzeme özelliklerinin doğru olarak bilinmesi gereklidir. Kum geri dolgu malzemesi üzerinde yapılabilen üç eksenli basınç deneyleri ile kum zeminin kayma dayanımı değişkenleri bulunabilmektedir. Ancak, üç eksenli basınç deneylerini çakıllı malzeme örneklerinde tekrarlama olanağı olmamıştır. Bu nedenle çakıl örneklerinin mühendislik özelliklerinin saptanabilmesi amacıyla farklı yöntemler denenmiş, sonuçta deney kutusu yüzeyinden plaka yükleme deneyleri yapılması uygun bulunmuştur. Kutu yüzeyi boyutlarında özel üretilen bir plakaya şişebilir membranlar ile yük uygulanmış ve

aşamalı yüklemeler altında LVDT ölçüm aygıtları ile plakanın oturması saptanmıştır. Farklı geri dolgu sıklıklarında plaka yükleme deneyleri yinelenmiş ve  $\Delta L$  oturma değerleri 6.11 bağıntısı kullanılarak  $E_s$  zeminin ikincil Young modülü bulunmuştur. (ASTM D 1194).

$$E_s = \frac{q \times r \times \pi (1 - \nu^2)}{4 \Delta L} \quad (6.11)$$

Bağıntıda yer alan  $E_s$  Zeminin ikincil Young modülü (kPa),  $q$ , düşey gerilme (kPa),  $r$  plaka çapı (m),  $\nu$  zeminin Poisson oranı,  $\Delta L$  plaka oturması (m) dir.

Zeminin Poisson oranı yaklaşık olarak 0.3 varsayılırsa  $(1-\nu^2)$  değeri 1'e yakın bulunur. Yapılan plaka yükleme deneylerinde, çakıl malzemesine ait, göreceli sıklık, Young modülü ilişkisi Şekil 6.14'te gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Çakıl Zemine Ait Sıklık Elastik Modül İlişkisi

Sonlu Elemanlar Analiz programında, çakıl malzemesi üzerinde yapılan plaka yükleme deneyleri bire bir modellenmiş, bağıntıdan elde edilen Young Modülü kullanılarak farklı plakaların oturma büyüklükleri karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan elastik modüller ile plaka yükleme deneyinden saptanan düşey yöndeki oturma büyüklükleri birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## 7. HDPE BORU ÖZELLİKLERİ

### 7.1 Polietilen

Polietilen, 1930'lu yıllarda kimyasal sentezler sonucu elde edilmiştir. İlerleyen yıllarda çeşitli soğutma ve kristalize yöntemleri kullanılarak değişik polietilen türleri geliştirilmiştir. PE' nin ilk uygulama örneklerine savunma sanayi alanında karşılaşılr. II. Dünya savaşında yeraltı borularının kaplanması, geçici uçak iniş pistleri, radar yalıtımı gibi alanlarda polietilen malzemesinden yararlanılmıştır. Polietilenler genel olarak yoğunluklarına göre sınıflandırılır. (Düşünceli, 2005).HDPE türü boruların diğer rijit ve esnek boru türlerine göre en belirgin üstünlükleri; Uzun süre korunabilen dayanım özellikleri, iç ve dış yüklere kırılma ve çatlama olmaksızın dayanım gösterebilmesi, diğer hammaddelere göre HDPE'nin yoğunluk ve ağırlığın oldukça düşük olması ve bu nedenle, inşa alanına taşınma, yerleştirme kolaylığı bulunması, pürüzsüz bir yüzeyi bulunması nedeniyle aşınma problemi olmaması, organik zemin ortamlarında veya farklı PH zemin ortamlarında kimyasal bozunuma uğramaması,su tutmayan ve geçirimsiz bir mikrodokuya sahip olması, kemirgenler tarafından zedelenememesi, kolaylıkla uygulanan sıcaklık veya mekanik bağlama yöntemleri ile eklemeler yapılabilmesi, istenilen renklerde üretilebilmesi nedeniyle boyamaya gerek duyulmaması,farklı amaçlar için üretim sürecinde polietilen malzemenin kimyasal yapısı veya soğrulma süreci ile oynanabilmesi (Allison, 2004) olarak sıralanabilir.

Bu üstünlükleri nedeniyle HDPE boruların çok uzun sürelerde servis yeteneğini sürdürebilme olanağı vardır. Günümüzde 100 yıllık servis ömrü garanti edilebilen HDPE boruların üretimi yapılabilmektedir. İncelemelerde kullanılan HDPE borunun mühendislik özellikleri Çizelge 7.1 özetlenmektedir

Çizelge 7.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan HDPE Boruların Özellikleri

| Boru Çapı | 200 mm                    | 242 mm                    | 312 mm                    |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| E         | 900 MPa                   | 900 MPa                   | 900 MPa                   |
| EA        | 6372 kN/m                 | 5432 kN/m                 | 4640 kN/m                 |
| EI        | 0.126 kNm <sup>2</sup> /m | 0.023 kNm <sup>2</sup> /m | 0.115 kNm <sup>2</sup> /m |
| d         | 0.012 mm                  | 9.097 E-3 mm              | 0.017 mm                  |
| ν         | 0.40-0.45                 | 0.40-0.45                 | 0.40-0.45                 |

## 8. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMLERİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), katı cisim mekaniği, termoelastisite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, manyetizma vb. birçok mühendislik dalında sıklıkla kullanılmaktadır. SEY diğer bütün yöntemlerden ayrılan en önemli farkı; klasik yöntemler gibi problemleri bütünleşik diferansiyel denklemleri kullanarak değil, sonlu ve ayrık sayıda algoritmik iterasyonlarla çözebilmesidir. Klasik yöntemlerde problemler sonsuz homojen, izotropik doğrusal elastik ortamdaki elastik bir malzemenin limit denge sınırlarındaki dayanımı ve şekil değişimi belirlenebilirken, SEY’de ortamın ve malzemenin doğrusal olmayan, zamana bağlı davranışları incelenebilmektedir. Bununla birlikte karmaşık sınır koşulları ve yükleme biçimleri de SEY yönteminde göz önünde tutulabilmektedir. SEY’de incelenen ortam sonlu birimlere ayrılarak hesaplama adımlarına geçilir. Bu elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin en küçük olması prensibi göz önünde tutularak ayrık hesaplamalar tamamlanır ve tümevarım mantığı içerisinde, elemanlar birleştirilerek bütünsel davranış hesaplanır.

Geoteknik mühendisliğinde SEY’nin uygulamalarının ilk örnekleri 1960’lı yıllara dayanır Reyes ve Dene (1966) yeraltında kazı uygulamalarında, Clough ve Woodward (1967) dolgudaki gerilme ve yanal hareketleri belirlemek amacıyla SEY’lerini kullanmışlardır. Geçen 40 yıllık süreç içerisinde bilgisayar ve yazılım teknolojisindeki olağanüstü ilerleme, SEY’nin akademik araştırmacılar yanında tasarımcılar tarafından da kullanılmasına olanak sağlamıştır. Özellikle geoteknik mühendisliği problemlerinde SEY’nin kullanılması yanal ve düşey gerilme-şekil değiştirme büyüklüklerinin, boşluk suyu basınçlarının, ve zamana bağlı konsolidasyon davranışlarının analiz edilebilmesinde önemli katkılar sağlamaktadır.

Gömülü boruların davranışlarını belirlemek amacıyla SEY’de bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Duncan ve Chang (1970) , Allgood ve Takahasi (1972), Abel vd (1973), Hurd (1977). Byrne ve Duncan (1979), Brown ve Lytton (1984), Katona (1988), Hashash ve Selig (1990), Moore (1994) Zhang ve Moore (1997) vd, Akademik çalışmalar yanında tasarımcıların SEY kullanarak analizler yapabilmeleri için özel ticari paket programlarda da bulunmaktadır. Bu ticari programlardan en çok bilinenler CANDE, SSTIP, NLSSIP, PIPE, SOILCON, DIANAPIPE ve AFENA’dır. Bununla birlikte LUSAS, AYNISYS, PLAXIS, FEMAP, DIANA gibi çok amaçlı SEY programları ile de gömülü boruların yük altındaki davranışlarını analiz etmek olanaklıdır.

Bu çalışmada PLAXIS 7.2 ve PLAXIS 3D TUNNEL programları kullanılarak 2 ve 3 boyutlu sayısal çözümler yapılmıştır.

## 8.1 Plaxis Programı

PLAXIS programı geoteknik mühendisliği problemlerinin sayısal analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program analizlerde gerilme artışları, şekil değişimleri ve ani ve zamana bağlı oturmaların hesaplanmasında elasto-plastik davranışı, statik ve dinamik koşullar altında analiz edilebilmektedir. Programın malzeme modellerini tanımlamada sağladığı olanaklardan dolayı zemin ortamı iki fazlı (katı ve sıvı) olarak göz önüne alınmakta ve drenajlı veya drenajsız çözümler yapılabilmektedir. (PLAXIS Manual 1998)

## 8.2 PLAXIS Bütünleşik Gerilme – Şekil Değiştirme Analizi

Zeminler ile mühendislik malzemelerinin davranış mekanizması arasındaki en önemli fark zeminlerin üç fazlı (katı daneler – boşluk suyu ve daneler arasında kalan hava) bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Bu üç fazın farklı davranmasından dolayı zemin davranışının modellenmesi oldukça karmaşıktır. Eğer zemin bütünüyle suya doygunsa, efektif gerilmelere göre yapılan analizler oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Malzeme modelleri gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişkileri tanımlayan sayısal denklemlerdir ve gerilme şekil değiştirme bağıntısı artımsal formda ifade edilir. PLAXIS'te bütün malzeme modelleri efektif gerilme değişim hızı ( $\sigma'$ ) ve şekil değiştirme ( $\varepsilon$ ) biçiminde belirtilmiştir. Gerilme ve şekil değiştirme biçimi, altı kartezyen gerilme ve şekil değiştirme bileşeni içermektedir. Düzlem şekil değiştirme ve eksenel simetri durumlarında sadece dört bileşen gereklidir. Çünkü  $\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  değerleri sıfırdır. Pozitif gerilme bileşenleri çekme gerilmelerini negatif gerilme bileşenleri basınç gerilmelerini yansıtmakta, şekil değiştirmeler yer değiştirme bileşenleri  $u_x, u_y$ 'nin kısmi türevi alınarak belirlenmektedir. Buna göre;

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (8.1)$$

$$\varepsilon_{zz} = 0 \quad (\text{Düzlem şekil değiştirme}) \quad (8.2)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{r} u_r \quad (\text{Düzlem şekil değiştirme}) \quad (8.3)$$

Kartezyen gerilmelerden belirlenen asal gerilmeler;

$$\sigma'_1 = \frac{1}{2} x(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}) - \sqrt{\frac{1}{4} x(\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \tau'^2_{xy}} \quad (8.4)$$

$$\varepsilon_2 = \sigma'_{zz}$$

$$\sigma'_{33} = \frac{1}{2} x(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}) - \sqrt{\frac{1}{4} x(\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \tau'_{xy}} \quad (8.5)$$

Gerilme invariantları aşağıdaki biçimde ifade edilebilir;

$$p' = \frac{1}{3} x(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (8.6)$$

$$q' = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (8.7)$$

p izotropik gerilme veya ortalama gerilme, q ise eşdeğer kayma gerilmesidir. Sıkışma (basınç) durumunda “p” ’nün nün işareti diğer gerilme ölçümlerinin tersine pozitiftir. Üç eksenli gerilme durumunda  $q = |\sigma_1 - \sigma_3|$  şeklinde belirtilir.

### 8.3 Gerilme-Şekil Değiştirme Analizi

PLAXIS programı ile efektif değişkenlerle drenajsız analiz yapabilme olanağı vardır. Gerilme-şekil değiştirme analizlerinde drenajsız durum göz önüne alındığından malzeme değişkenleri ( Poisson oranı kohezyon ve içsel sürtünme açısı ) efektif gerilmeler türünden göz önüne alınmaktadır. Bu durum ortamın iki fazlı malzemeden meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Buna göre ortamdaki toplam gerilmeler  $\sigma$ , efektif gerilmeler  $\sigma'$  ve boşluk suyu basıncı  $u$  cinsinden;

$$\sigma_{xx} = \sigma'_{xx} + u \quad (8.8)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma'_{yy} + u \quad (8.9)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma'_{zz} + u \quad (8.10)$$

$$\tau_{xy} = \tau'_{xy} \quad (8.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada (u) toplam boşluk suyu basıncı ( $u_0$ ) yer altı su seviyesinden dolayı başlangıç boşluk suyu basıncı ile ( $\Delta u$ ) fazla boşluk suyu basıncının toplamı olarak;

$$u = u_0 + \Delta u \quad (8.12)$$

şeklinde gösterilebilir. Başlangıç boşluk basıncı değeri başlangıç arazi verilerinden su seviyesi yüksekliği hesaplanmakta, fazla boşluk suyu basıncı ise drenajsız malzeme davranışı durumunda gerilme-şekil değiştirme analizleri ile bulunmaktadır. Kararlı durum bileşenlerinin zamana göre türevi sıfır olduğundan 8.13 eşitliği geçerli sayılır.

$$u' = \Delta u' \quad (8.13)$$

Buna göre boşluk suyu basıncındaki değişim nedeniyle jeolojik ortamda meydana gelecek elastik şekil değiştirme değişimleri  $[\varepsilon^e]$  (elemanlarda) lineer elastik malzeme davranışı için geçerli Hook Yasası'ndan yararlanılarak tanımlanabilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^e \\ \varepsilon_{yy}^e \\ \varepsilon_{zz}^e \\ \tau_{xy}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - u \\ \sigma_{yy} - u \\ \sigma_{zz} - u \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (8.14)$$

Suyun pratik olarak az sıkıştığı göz önüne alınırsa boşluk suyu basıncının değişimi;

$$u = \frac{K_w}{n} (\varepsilon_{xx}^e + \varepsilon_{yy}^e + \varepsilon_{zz}^e) \quad (8.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $K_w$  , suyun kütle modülü,  $n$  ise zeminin porozitesini göstermektedir.

$$\frac{K_w}{n} = 300 \frac{0.495 - \nu'}{1 + \nu'} K' > 30 K' \quad (8.16)$$

Burada  $K'$  zeminin kütle modülü  $\nu'$  Poisson oranıdır. Drenajsız gerilme analizlerinde malzeme parametresi olarak kayma modülü  $G'$  ve Poisson oranı verilmekte ve bu parametreler drenajsız malzeme değişkenlerine dönüştürülmektedir. Buna göre toplam şekil değişimlerinin analizi için 8.16 bağıntısı aşağıdaki eşitliğe dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^e \\ \varepsilon_{yy}^e \\ \varepsilon_{zz}^e \\ \tau_{xy}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E_u} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_u & -\nu_u & 0 \\ -\nu_u & 1 & -\nu_u & 0 \\ -\nu_u & -\nu_u & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

Burada

$$E_u = 2G.(1 + \nu_u) \text{ ve } \nu_u = \frac{\nu' + \mu(1 + \nu')}{1 + 2\mu(1 + \nu')} \quad (8.18)$$

$$\mu = \frac{K_w}{3nK'} \quad (8.19)$$

Bu tanımlardan anlaşılacağı üzere fazla boşluk suyu basınçları küçük hacimsel şekil değiştirme artımlarından hesaplanabilir.

$$u = \frac{K_w}{n} \varepsilon_v^e \quad (8.20)$$

8.19 ve 8.20 bağıntıların ışığında, PLAXIS programı ile yapılan drenajsız gerilme şekil değiştirme analizlerinde ortam iki fazlı olarak düşünüldüğü, özetle zemin ve suyun farklı deformasyon parametreleri olan iki malzeme olarak davrandığı varsayıldığı için zemin parametrelerinde drenajlı durum varsayılmaktadır. Elastik-plastik analizin temeli elastik ve plastik şekil değiştirmeler veya şekil değiştirme hızlarının ayrılmasına dayandığından, analizlerde elastik bileşen  $\varepsilon^e$  eşitliğinden belirlenmiş plastik şekil değiştirmelerin  $\varepsilon^p$  bulunmasında ise bileşen olmayan akış kuralı göz önüne alınarak, göçme Mohr-Coulomb göçme kriterine göre belirlenmiştir. Genel elostoplastik gerilme – şekil değiştirme davranış analizi

$$\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (8.21)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada  $g$ , plastik potansiyel fonksiyonu  $\lambda$  skaler bir çarpan, tam elastik davranışta  $\lambda=0$ , plastik davranışta  $\lambda>0$  olarak alınmıştır. Elasto-plastisite için gerilme ve şekil değiştirmeler;

$$\sigma = \left[ D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e \right] \varepsilon \quad (8.22)$$

eşitliğinden belirlenebilir. Bu eşitlikte  $d$ ;

$$d = \left[ \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right] \quad (8.23)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer malzeme davranışı elastik se bağıntıda  $\alpha = 0$  veya plastik davranışta  $\alpha = 1$  olarak alınabilir.

Burada  $\alpha$  ,

$$\alpha = \left[ \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e \right] \varepsilon \text{ eşitliği ile tanımlanabilir.} \quad (8.24)$$

#### 8.4 Sonlu Elamanlar İterasyonları

Bu çalışmada uygulanan sonlu elemanlar formülasyonunda deplasman yöntemi kullanılmıştır. Deplasmanların esas bilinmeyen olarak seçildiği sonlu elemanlar uygulamaları için adım adım şu bağıntılardan yararlanılmıştır.



$$[L^T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (8.25)$$

denge eşitliğine ek olarak kinematik ilişki aşağıdaki gibi yazılırsa;

$$[\varepsilon] = [L]\{u\} \quad (8.26)$$

8.26 bağıntısı elde edilir. Eşitlikte  $\{u\}$  üç yer değiştirme bileşeninin kısmi türevi ve  $[L]$  ise diferansiyel operatörüdür. Bu iki bağıntı kullanılarak malzeme davranışını temsil eden bünye ilişkileri ;

$$\{\sigma'\} = [M]\{\varepsilon\} \quad (8.27)$$

Burada  $[M]$  bünye matrisidir ve şekil değişimi eşitliklerinin birleşimine Galarkin (1987) varyasyonu prensibi uygulanarak denge eşitliği belirlenir. Bu eşitliğe Gren Teoremi (1990) uygulandığında 8.28 bağıntısındaki virtüel iş eşitliği elde edilir.

$$\int \delta\{\sigma\} dV = \int \delta\{\varepsilon^T\} \{p\} dV + \int \delta\{\varepsilon^T\} t dS \quad (8.28)$$

Eşitlikteki  $\{t\}$  vektörü  $S$  yüzeyindeki kuvvetleri ve  $\{p\}$  ise  $V$  hacmindeki cismin kütle kuvvetlerini göstermektedir.  $\{\varepsilon^T\}$   $V$  hacmindeki cismin şekil değiştirme matrisini ifade eder.. Ortaya çıkan gerilmeler artımsal biçimde bağıntı 8.29'da gösterilmektedir. .

$$\{\sigma'\} = \{\sigma^{i-1}\} + \{\Delta\sigma\} \text{ ve } \{\Delta\sigma\} = \int \sigma dT \quad (8.29)$$

Eşitlikteki  $\{\sigma^i\}$  bilinmeyen gerilmenin başlangıç durumunu  $\{\sigma^{i-1}\}$  bilinmeyen gerilmenin bir adım önceki değerini gerilme artımını  $\{\Delta\sigma\}$ 'da küçük bir zaman artışı üzerinden integre edilen gerilme hızını belirtir. Eşitlik yeniden düzenlenirse;

$$\int \delta\{\varepsilon^T\} \{\sigma\} dV = \int \delta\{u^T\} \{p^i\} dV + \int \delta\{u^T\} t^i dS - \int \delta\{\varepsilon^T\} \{\sigma^{i-1}\} dV \quad (8.30)$$

8.30 bağıntısı elde edilebilir. Bağıntılarda yer alan bütün büyüklükler üç boyutlu uzayda düşünülmelidir. Sonlu elemanlar yöntemine göre bir sürekli ortam birçok elemana ayrılır ve her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları bir serbestlik derecesine sahiptir. Deformasyon teorisinde serbestlik derecesi yer değiştirme bileşenlerine karşılık gelir ve bir eleman içindeki yer değiştirme vektörü  $\{u\}$  ile herhangi bir noktada  $\{u\}$  deplasmanlarının düğüm noktasındaki

ifadesi  $\{v\}$  ile şekil fonksiyonlarını içeren matris ise  $[N]$  ile gösterilir ve deplasmanların düğüm noktasındaki ifadesi aşağıdaki eşitlikte belirtilmektedir.

$$\{u\} = [N] \{v\} \quad (8.31)$$

8.31 eşitliği kinematik durum yazılırsa;

$$\{\varepsilon\} = [L][N]\{v\} = [B]\{v\} \quad (8.32)$$

bağıntısı elde edilir. Bu eşitlikteki  $[B]$  matrisi deplasmanları şekil değiştirmelere dönüştüren deformasyon matrisidir.  $\{\varepsilon\}$  ve  $\{u\}$  terimleri bilinmeyenlerdir ve eleman deplasmanları  $\{v\}$  cinsinden tanımlanır. (8.31) ve (8.32) eşitlikleri değişken ve artımsal hız formunda da yazılabilir. (8.30)' denklemini kısaltacak şekilde dönüştürmeler yapılırsa;

$$\int \{B^T\} \{\delta v\}^T \{\Delta \sigma\} dV = \{\delta v\}^T \int [N]^T \{p^i\} dV + \{\delta v\}^T \int [N]^T \{\delta_v^T\}^i dS - \int [B] \{\delta_v\}^T \{\sigma^i\} dV \quad (8.33)$$

ve aşağıdaki bağıntıya dönüşür.

$$\int [B] \{\Delta \sigma\} dV = \int [N]^T \{p^i\} dV + \{\delta v\}^T \int [N]^T \{\delta_v^T\}^i dS - \int [B] \{\delta_v\}^T \{\sigma^{i-1}\} dV \quad (8.34)$$

Eşitlikte sağ taraftaki birinci ve ikinci terim dış kuvvet vektörünü son terim ise iç reaksiyon vektörünü belirtmektedir. Dış kuvvet vektörü ile iç reaksiyon vektörü arasındaki fark  $\Delta \sigma$  gerilme artımı arasındaki ilişki genellikle doğrusal olmayan davranıştır. Sonuç olarak şekil değiştirme artımları doğrudan hesaplanamaz. Bütün malzeme noktaları için global iterasyon yöntemi uygulanarak (8.34) eşitliğinde denge durumu sağlanır.

Bu eşitlikteki  $K$  rijitlik matrisi  $\Delta v$  artımsal yer değiştirme vektörü  $f_{ex}$  dış kuvvet ve  $f_{in}$  iç kuvvet vektörüdür ve üst indisi adım numarası belirtilir. Ancak gerilme ve şekil değiştirme artımları arasındaki ilişki genellikle doğrusal olmadığından rijitlik matrisi yukarıdaki gibi önceden belirlenemez. Bu nedenle denge durumu ve bünye ilişkisinin her ikisini de sağlayan global iterasyon yöntemi gereklidir. Global iterasyon yöntemi aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$[K^i](\Delta \delta^i) = \{f_{ex}^i\} - \{f_{in}^{i-1}\} \quad (8.35)$$

8.35 eşitliğindeki  $i$  üst indis iterasyon sayısını belirtir.  $\Delta \delta$   $i$  adımıdaki yer değiştirme adımına yardım eden alt artımsal yer değiştirmeleri içeren bir vektördür.

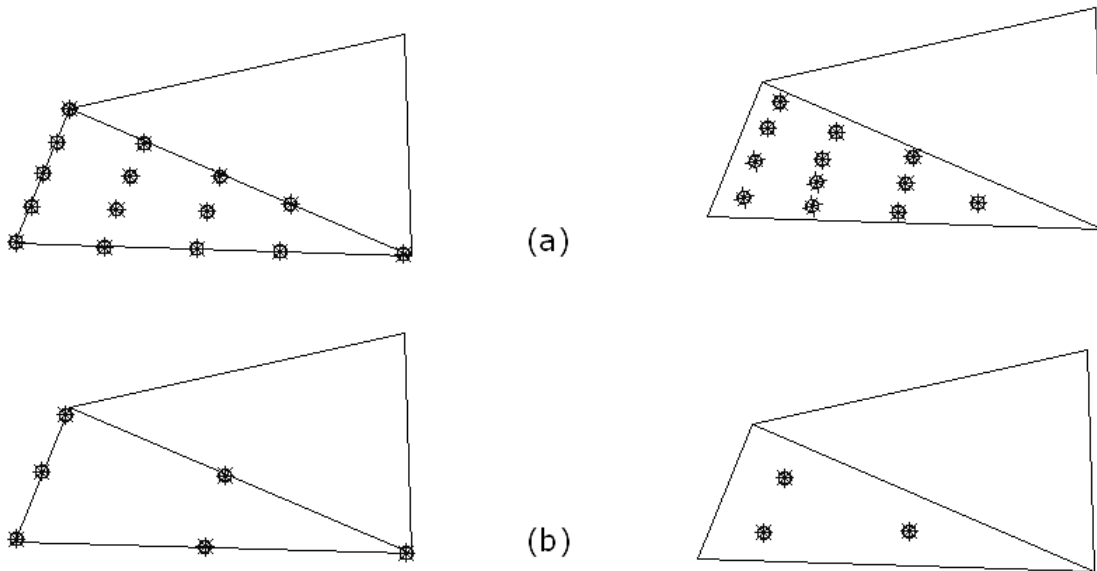
$$\{\Delta v^i\} = \sum_{j=1}^n (\delta v^j) \quad (8.36)$$

K rijitlik matrisi yaklaşık olarak malzeme davranışını temsil eder. K'yı daha incelikli belirlemek için belirli bir yanlışlık payı ile daha az sayıda iterasyonla denge sağlanır. K lineer-elastik davranışı belirtilir ve bu durum aşağıdaki biçimde gösterilebilir.

$$[K] = \int [B][D^e][B]dv \quad (8.37)$$

### 8.5 Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Eleman Türleri

Deney sisteminin sayısal modellemesinde üçgen elemanlar kullanılarak sonlu ağ ortamı sağlanmıştır. PLAXIS kullanım seçeneklerinde üçgen elemanlar 6 veya 15 düğüm noktalı olarak uygulanabilir. Düğüm noktalarının elemanlar üzerindeki dağılım Şekil 8.1'de gösterilmiştir. Analizlerde yer değiştirmeler düğüm noktalarında gerilme değerleri ise gerilme noktalarında hesaplanmıştır. 6 düğüm noktalı üçgen elemanlarda 3 gerilme noktası 15 düğüm noktalı üçgen elemanlarda ise 12 gerilme noktası bulunur.



Şekil 8.1 Analizlerde kullanılan elemanlar, düğüm ve gerilme noktaları

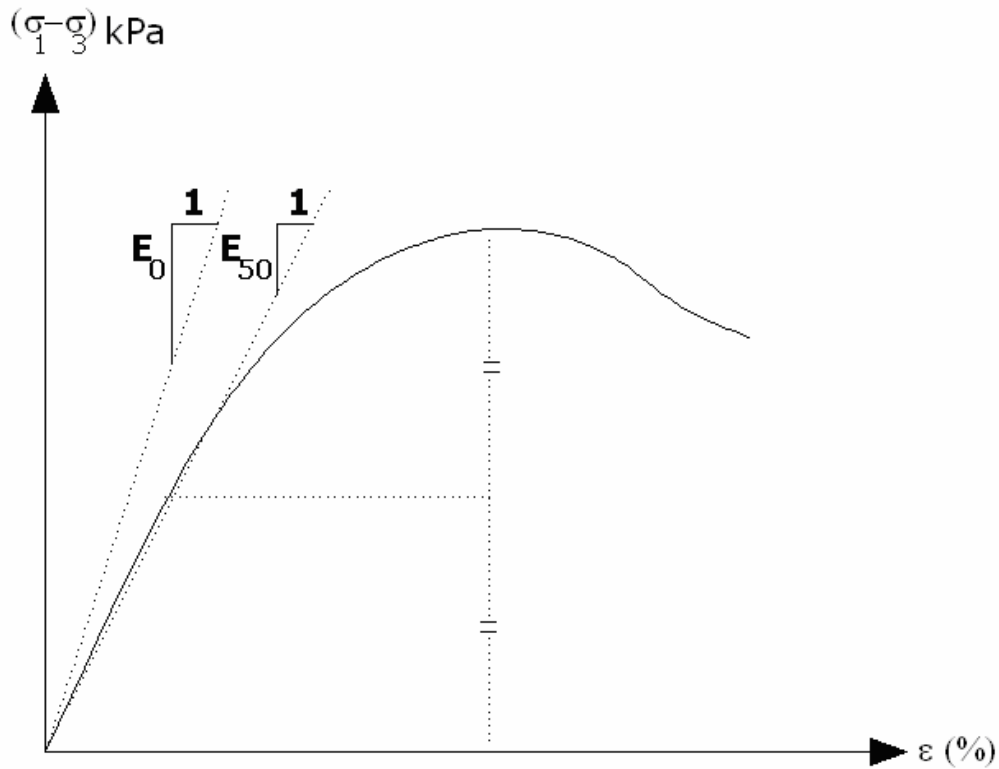
Bu çalışmada gerilme-şekil değiştirme analizlerinde gerilme ve şekil değiştirmelerin ayrıntılı olarak belirlenmesi için 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır.

### 8.6 Analizlerde Kullanılan Malzeme Modeli

Bu çalışmada analizlerde Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmış ve bu modelde malzeme davranışı ideal elasto-plastik olarak alınmıştır.

### 8.6.1 Mohr-Coulomb Modeli

Bu modelde plastik davranışı modellenmek için üç zemin parametresi  $c'$  (kohezyon)  $\phi'$  (içsel sürtünme açısı)  $\psi$  (genleşme açısı) ve elastik davranışı modellemek için ise  $E'$  (elastisite modülü) ve  $\nu$  (Poisson oranı) kullanılmaktadır. Geleneksel üç eksenli deneylerde genellikle gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıç eğimi başlangıç rijitlik  $E_i$  ve deviatorik gerilmenin % 50'sine karşılık gelen rijitlik modülü ise ikincil modülü olarak  $E_{50}$  tanımlanabilir.



Şekil 8.2 Zeminlerin Young Modülleri

Bu modelde kumlar ve normal konsolide killer için ikincil modülünü kullanmak daha doğru sonuçlar vermektedir. Mohr-Coulomb modelinde akma durumu asal gerilmelere göre belirtilen üç akma fonksiyonuna göre tanımlanmıştır.

$$f_1 = \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) (\sin \phi' - c' \cos \phi') \geq 0 \quad (8.38)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) (\sin \phi' - c' \cos \phi') \geq 0 \quad (8.39)$$

$$f_3 = \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) (\sin \phi' - c' \cos \phi') \geq 0 \quad (8.40)$$

Akma fonksiyonundaki iki plastik model değişkeni için içsel sürtünme açısı  $\phi'$  ve kohezyon  $c'$  dir. Bu üç akma fonksiyonu asal gerilme uzayında bir hegzogonal koniyi temsil etmektedir. Mohr-Coulomb modelinde plastik davranışı tanımlamak için bu üç akma fonksiyonuna ek olarak üç plastik potansiyel fonksiyon tanımlanmıştır.

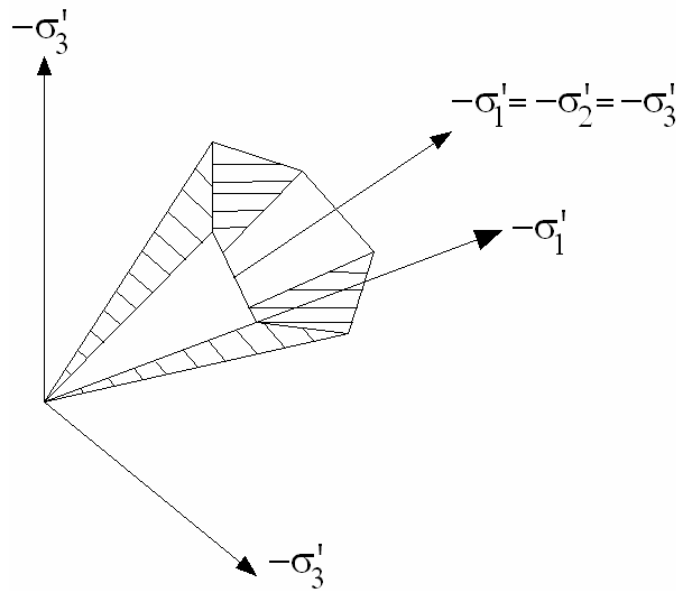
$$g_1 = \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \psi \quad (8.41)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \psi \quad (8.42)$$

$$g_{31} = \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \psi \quad (8.43)$$

Plastik potansiyel fonksiyonları üçüncü bir plastisite değişkeni genişleme açısı  $\psi$  içerir, modelin ayrıntıları Smith ve Griffith (1982)'de verilmiştir.

Bu modelde iki basitleştirme yapılmıştır. Bunlardan birincisi sabit bir elastisite modülünün kullanılması diğeri ise zeminin göçtükten sonra limitsiz genişleme eğiminde olmasıdır. Gerçek davranışta zemin göçtükten sonra zemin boşluk oranı kritik bir değere ulaşmakta ve genişleme sona ermektedir. Analizlerde aşamalı yüklemelerden dolayı rijitlik modülündeki plastik potansiyel fonksiyonundaki efektif gerilme değerinin değişimi göz önüne alınmıştır. Şekil 8.2'de asal gerilme uzayında Mohr Coulomb akma yüzeyi ( $c' = 0$ ) gösterilmiştir.



Şekil 8.3 Asal gerilme uzayında Mohr Coulomb akma yüzeyi

## 9. GEOTEKNİK UYGULAMALARINDA FOTOGREMETRİK YÖNTEM

İnşaat mühendisliği malzeme deneyi uygulamalarında, değişen koşullar altında deney nesnesi geometrik şeklinin izlenmesi son yıllarda özellikle labaratuvar deney sistemlerinde kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında alınan fotogrametrik veriler yardımıyla geometrik ölçümlerin kalibrasyonları ve mekanik modellerin veri aktarımı inceliğiyle denetlenmektedir. Görüntüleme yöntemi ile ölçüm alma sistemlerinden, statik, yarı statik dinamik kısa ve uzun süreli yük deneylerinin birçoğunda yararlanılmaktadır. Bu bakımdan fotogrametrik eş zamanlı görüntüleme sistemleri, deformasyon, gerilme, yer değiştirme, sünme, zamana bağlı oturma ve yorulma çatlaklarının belirlenmesi ölçümlerinde yararlı katkılar sağlamıştır. Biçim değiştirme ve deplasman büyüklükleri genel olarak biçim değişimi ölçer rozetler (strain gauges) ve doğrusal yer değiştirme transformatörleri (LVDT ve LPT) ile saptanır. Aygıtların çalışma yöntemi, mekanik deformasyon altındaki malzemenin elektriksel direncinin değişmesi esasına dayanır. Bu ölçü sistemleri uygun kalibrasyon ve yüksek süzme altında yüksek güvenilirlikte sonuçlar verebilirler. Ancak en olumsuz yanları noktasal ve tek boyutlu ölçüm yetenekleridir. Eğer farklı konumlarda eş zamanlı iki ya da üç boyutlu ölçümler gerekli olursa, sistemin oldukça çok sayıda LVDT ve biçim değiştirme ölçer sayısına ve birbirinden bağımsız sonuçların zaman gerektiren bütünleşik yorumlamalarına gereksinim duyulur. Diğer yandan söz konusu teknikler, bir nesne yüzeyi üzerindeki çok sayıda ölçüm noktasının gerekli olduğu durumlarda veya karmaşık yüzey ölçümleri için uygun değildir. Bu durumlarda, sayısal fotogrametrik teknikler, güçlü ve esnek bir ölçüm yöntemi olarak değerlendirilebilir. Özellikle fotogrametrik sistemlerde, malzeme deneyi uygulamalarında veri görüntüleme işleme ve yorumlama aşamaları oldukça kolay, hızlı ve ucuz yapılabilir. Uygun bir görüntü alımı ve kırılmasız bir ışınım ortamında fotogrametrik tekniklerin prezisyon potansiyeli odaklanılan nesne boyutunun 1:100.000 oranında bir koordinat standart sapması altında değerlendirilebilir. Kaynaklar incelendiğinde fotogrametrik yöntemlerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanıldığı araştırmalar şunlardır;

Yük altındaki 10x10 cm boyutlarındaki beton örnek üzerindeki çatlakların ilerleme hızları ve büyüklükleri (Hampel and Maas,2003), çelik kirişlerin ısısal deformasyonlar altında gösterdikleri şekil değişimlerinin belirlenmesi (Fraser 2000), beton kirişteki düşey hareketin uygulanan tekil ve yayılı yükler altında beton kirişteki düşey hareketin belirlenmesi (Whiteman vd, 2002) , kompleks yapıların yapısal sapmalarının ölçümü (Fraser and Brizzi, 2003), beton plaka ve kolonların deplasman deneyleri ve büyük su toplama baraj yapılarını deformasyonlarının izlenmesi (Maas, 1998) gibi benzer amaçlı malzeme deneyi ve

deformasyon ölçüsü işlemlerinde, fotogrametrik teknikler başarıyla kullanılmıştır. Bir deney nesnesi üzerindeki işaretlenmiş noktaların hareketi ve mutlak koordinatlarının ölçüsü ticari fotogrametrik yazılımlar tarafından çözülürken, standart olmayan izleme uygulamaları ya da gerçek zamanlı (veya gerçek zamana yakın) uygulamalar özelleştirilmiş yazılım araçlarının geliştirilmesini gerektirir. Maas (2006), bu amaçla, yapı mühendisliği malzeme deneyi uygulamalarının geniş bir malzeme aralığında kullanılmak üzere bir sistem tasarlanmıştır. Sistemin yazılım bileşenleri İTÜ Fotogremeri Labaratuvarlarında Fotogremetrizt Y. Müh. Ferruh Yılmaztürk tarafından Borland C++ Builder programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ilk kez YTÜ Geoteknik Lab, gömülü boruların davranışlarının saptaması çalışmasında kullanılmıştır. Bu uygulama aynı zamanda gömülü esnek boruların yük altındaki davranışlarının fotogrametrik yöntemlerle belirlenmesine ilişkin kaynaklarda yer alan ilk uygulama olmuştur. Boru deformasyonları düşey yatay ekseninde yerleştirilen LPT'lerle ölçülürken, fotogrametrik görüntüler eş zamanlı alınmıştır. Yazılımda, kameralardan eş zamanlı görüntü alma, önceden tanımlanan özel dairesel hedefler için resim tarama ve hedefleri piksel altı doğrulukta otomatik ölçme, görüntü eşleme, ışın demetleri dengelemesi, ölçümleme ve farklı yükleme oturumlarına ilişkin uzaysal ileriden kestirme sonucu elde edilen verilerin karşılaştırılması gibi birçok fonksiyon kullanılmıştır. Sistemin donanım bileşeninde ölçüm aygıtları bölümünde tanıtılan üç adet Basler A302 video kamera kullanılmıştır. Bunun yanında görüntülerin bilgisayar ortamına taşınması ve değerlendirilmesi için bağlantı kabloları PCI IEEE 1394 veri toplayıcı arabirim kartından yararlanılmıştır. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 9.1'de görülmektedir..



Şekil 9.1 Fotogrametrik Deney Düzeneği



## 10. DENEYSEL ve SAYISAL ÇALIŞMALAR

Hendek ortamına gömülü esnek bir HDPE borunun farklı yükleme koşulları, yerleştirme biçimleri ve geri dolgu ortamlarındaki davranışının incelendiği kapsamlı araştırmada 30 hendek modeli denenmiştir. Uygulanan deney modellerinin özellikleri Çizelge 10.1’de görülmektedir.

Çizelge 10.1 Model Deneylerin Özellikleri

| No | Boru Çapı (mm) | Dolgu | R.S (%) | Yerleştirme Biçimi | Yükleme Şekli | Yük Sınırı (kPa) | Deplasman (mm) | Matematiksel Analizler | Biçim Değiştirme Ölçer Yerleşimi |
|----|----------------|-------|---------|--------------------|---------------|------------------|----------------|------------------------|----------------------------------|
| 1  | 200            | Kum   | 57      | Serbest            | Düşey         | 250              | 2.20           | Amp/ Say               | Çarpı                            |
| 2  | 200            | Kum   | 70      | Yağmurlama         | Düşey         | 250              | 1.87           | Amp/ Say               | Çarpı                            |
| 3  | 200            | Kum   | 50      | Serbest            | Düşey         | 250              | 3.74           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 4  | 200            | Kum   | 92      | Serbest            | Düşey         | 350              | 1.18           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 5  | 200            | K/Ç   | 56/60   | Serbest            | Düşey         | 400              | 5.09           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 6  | 200            | Ç/K   | 63/50   | Serbest            | Düşey         | 400              | 4.55           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 7  | 242            | Kum   | 55      | Serbest            | Düşey         | 350              | 3.07           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 8  | 242            | Kum   | 65      | Yağmurlama         | Düşey         | 200              | 2.27           | Amp/ Say               | Çarpı                            |
| 9  | 242            | Kum   | 55      | Serbest            | Düşey         | 500              | 6.62           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 10 | 312            | Kum   | 60      | Yağmurlama         | Düşey         | 250              | 4.14           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 11 | 312            | Kum   | 88      | Serbest            | Düşey         | 400              | 2.92           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 12 | 200            | Çakıl | 65      | Serbest            | Düşey         | 220              | 2.90           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 13 | 200            | Çakıl | 80      | Serbest            | Düşey         | 250              | 1.26           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 14 | 242            | Çakıl | 55      | Serbest            | Düşey         | 200              | 3.30           | Amp/ Say               | Çarpı                            |
| 15 | 242            | Çakıl | 64      | Serbest            | Düşey         | 200              | 1.96           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 16 | 312            | Çakıl | 60      | Serbest            | Düşey         | 300              | 5.74           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 17 | 312            | Çakıl | 85      | Serbest            | Düşey         | 250              | 3.20           | Amp/ Say               | Artı                             |
| 18 | 200            | Kum   | 50      | Yağmurlama         | Yanal         | 250              | 5.05           | Sayısal                | Çarpı                            |
| 19 | 200            | Kum   | 55      | Yağmurlama         | Yanal         | 250              | 4.36           | Sayısal                | Artı                             |
| 20 | 242            | Kum   | 55      | Yağmurlama         | Yanal         | 100              | 1.70           | Sayısal                | Çarpı                            |
| 21 | 312            | Kum   | 60      | Yağmurlama         | Yanal         | 100              | 1.83           | Sayısal                | Çarpı                            |
| 22 | 200            | Çakıl | 50      | Serbest            | Yanal         | 250              | 4.36           | Sayısal                | Artı                             |
| 23 | 242            | Çakıl | 70      | Serbest            | Yanal         | 100              | 1.00           | Sayısal                | Çarpı                            |
| 24 | 312            | Çakıl | 70      | Serbest            | Yanal         | 150              | 2.53           | Sayısal                | Artı                             |
| 25 | 200            | Kum   | 60      | Yağmurlama         | Düşey         | 110              | 1.22           | Am/ Say /Foto          | Artı                             |
| 26 | 200            | Çakıl | 62      | Serbest            | Düşey         | 100              | 1.13           | Am/ Say /Foto          | Artı                             |
| 27 | 242            | Kum   | 65      | Yağmurlama         | Düşey         | 100              | 1.10           | Am/ Say /Foto          | Artı                             |
| 28 | 242            | Çakıl | 88      | Serbest            | Düşey         | 100              | 0.71           | Am/ Say /Foto          | Artı                             |
| 29 | 312            | Kum   | 62      | Yağmurlama         | Düşey         | 150              | 2.31           | Am/ Say /Foto          | Artı                             |
| 30 | 312            | Çakıl | 90      | Serbest            | Düşey         | 15               | 1              | Am/ Say /Foto          | Artı                             |

Deneysel çalışmalar 5 gruba ayrılarak incelenmiştir. 1 Grupta (1 No’lu Deney - 11 No’lu Deney) kum geri dolgu ortamına yerleştirilmiş 200,242,312 mm çaplı HDPE esnek boruların düşey yüklemeler altındaki davranışı saptanmıştır. Bu kapsamda farklı sıklık seviyelerinde hazırlanan hendek modellerinde, geri dolgu sıklığının boru davranışına olan etkisi gözlemlenmiştir. Bununla birlikte geri dolgu dolgu malzemesi model kutusuna yağmurlama sistemi kullanılarak ve kullanılmadan (denetimli ve denetimsiz) olarak yerleştirilmiş ve boru davranışında, yerleştirme yönteminin ne ölçüde etkili olduğu değerlendirilmiştir. 1. Grup

deneylerde son olarak iki tabakalı hendek ortamlarının modellenmesi yapılmış ve kum/çakıl, çakıl/kum tabakalarından oluşan geri dolgu ortamlarındaki boru davranışları incelenmiştir.

2. Grup deneylerde, ( Deney No 12-17) 1. Grup deneylerdeki çalışmalar çakıl geri dolgu ortamı yansıtılarak tekrarlanmıştır.

3. Grup deneylerde (Deney No 18-21) farklı sıklıklarda ve yerleştirme yöntemlerinde hazırlanan HDPE esnek boruların kum geri dolgusunda ve yanal yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir.

4. Grup deneylerde (Deney No 22-24) 3. Grup deneylerdeki çalışmalar çakıl geri dolgu ortamı yansıtılarak tekrarlanmıştır.

Son olarak 5. Grup deneylerde (Deney No 25-30) düşey yükler altında kalan HDPE boruların davranışı fotogrametrik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Boruların pleksiglas şeffaf yüzeye denk gelen ön kesitlerine eşlenik noktalar yapıştırılmıştır. Bu noktaların yüklemeler etkisinde gösterdikleri üç boyutlu davranışları yüksek çözünürlüklü özel kameralar yardımı ile saptanmış çember kesitinde oluşan yerdeğişimleri özel geliştirilen bir yazılımla sürekli bir video/fotografalama kaydı ile izlenerek değerlendirilmiştir.

En kapsamlı çalışma olan kontrollü bir dolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE borunun fotogrametrik ve standart yöntemler kullanılarak davranışının incelendiği deneysel çalışma özetle şu adımlarda yürütülmüştür.

1. Adım'da, deney kutusu, deney borusu ve deney ölçüm ekipmanları deneye hazırlanmıştır. Bu amaçla, kutu içerisinde bir önceki deney çalışmasından kalması olası geri dolgu malzemesi boşaltılmış ve pleksiglas cam yüzey silinmiştir. Deneyde kullanılacak olan borunun, iç kesitine LPT'ler konuşlandırılmış ve pleksiglas yüzeye denk gelecek olan ön kesite Şekil 10.28'de görüldüğü gibi kamera merceklerinin odaklanacağı eşlenik noktalar yapıştırılmıştır. Borunun bu süre zarfında oluşan gerilmelerinin "0" lanması için boru bağlantı kabloları ana kartına bağlantıları yapılmış, kalibrasyonu tamamlanmıştır.

2. Adım'da yağmurlama sistemi tekerlekli ayaklarından yararlanılarak deney kutusu düzlemine çekilmiştir. Elek kısmında bulunan dolgu haznesine kum kovanı yardımı ile geri dolgu malzemesi doldurulmuştur. Elek mekanizmasının sonsuz vida ekseninde yükselme hızı, yanal yönde gösterdiği salınım frekansı ayarlanmış ve sistem kutu kesiti üzerinde çalıştırılmıştır. Kum akışının hız ve yoğunluğunun aynı seviyede kalabilmesi için, dolgu haznesine kum takviyesi yağmurlama süresince sürekli uygulanmıştır. Kutu kesitinde 10–15 cm yükseklikte bir yataklama seviyesi oluştuğunda yağmurlama sistemi kapatılmış ve kutu

üzerinden çekilmiştir. Yataklama düzlemi düzeltilmiş ve borunun yerleştirilmesine hazır hale getirilmiştir. Kalibrasyonu tamamlanmış HDPE boru bilgisayar ara kartından sökülmüş, kabloları boru kesitinin içine katlanarak yerleştirilmiştir. Boru özenle kutu kesitinde bulunan yataklama seviyesine indirilmiştir. Bu aşamada ön yüzeye yapıştırılmış eşlenik noktaların yerleştirmeden en az derecede etkilenmesine özen gösterilmiştir. Bunun yanında, boru ve pleksiglas arakesitinden kum akışının engellenmesi için ince bir film tabakası kullanılarak arayüzey boşlukları kapatılmıştır. Kutu arka yüzünde bulunan küçük bir delik yardımı ile boru kabloları çıkartılmış ve bilgisayar ana kartlarına takılmıştır.

3. Adımda yağmurlama sistemi yeniden kutu üzerine çekilerek, hendek doluncaya kadar geri dolgunun yerleştirmesi sürdürülmüştür. Hendek modeli dolduğunda, yağmurlama sistemi geri çekilmiş ve hendek yüzeyi düzlenmiştir. Yüzeyin bütün alanını kapalayacak biçimde membran yastık serilmiş ve yaklaşık 65 kg ağırlığındaki kutu kapağı kapatılmış ve dört köşesinden kutu gövdesine kilitlenmiştir.

4. adımda, fotogremetrik uygulamada kullanılacak olan kamera sistemlerinin yerleştirilmesi aşaması yer almaktadır. Bu adımda, üç adet kamera, boru çember kesitine yapıştırılmış eşlenik noktaları odaklayabilecek bir uzaklıkta konuşturulmuştur. Kameraların, parlaklık, çözünürlük, hassaslık ve netlik ayarları yapılmış ve bilgisayar ara kartına bağlantıları kurulmuştur. Bilgisayar ortamında eşlenik noktaların “0” okumaları alınmış ve görüntüleme işlemleri hazır hale getirilmiştir.

Yapılan bütün deneylerin bu aşamaya kadar olan süreçlerinde, geri dolgu malzemesinin yerleştirmesinden doğan boru deplasmanlarının % 0.3 , % 0.6 mertebelerinde ortaya çıktığı görülmüştür.

5. adımda 800 kPa gücündeki basınç kaynağından yararlanılarak, kutu kapağı altına serilmiş membran yastığa 10 kPa’lık artış adımlarında yüklemeler yapılmıştır. Her yükleme aşamasında fotogremetrik kamera, LPT ve biçim değiştirme aygıtlarından 1’er saniye aralılda 20 saniye boyunca okumalar alınmıştır. C++ ve Labview yazılım dillerinde geliştirilen görüntüleme ve veri toplama programlarında bu veriler düzenlenerek EDIT dosyası olarak depolanmıştır.

6. adımda son yükleme ile deney tamamlanmış ve tarih belirtilerek veriler kaydedilmiştir. Kutu kapağı açılmış, membran ve yastık kaldırılmıştır. Kutu kesitinde yer alan geri dolgu malzemesinin ağırlığının belirlenebilmesi için darası alınmış kum kabı ile yaklaşık 350 kg ağırlığındaki kum geri dolgusu tartılarak boşaltılmıştır. Başlangıç dolgu yüksekliği, kutu ve

boru hacmi göz önüne alınarak toplam hacim hesaplanmış ve tartılan toplam kum ağırlığı ile boşluk oranı belirlenmiştir. Kayıtlı dosyaya borunun yerleştirme bilgileri, zemin sıklık seviyesi ve yük adımları kaydedilerek deney sonuçlandırılmıştır.

Yürütülen deneysel çalışmaların niceliğini büyük ölçüde sayısal modellerinin ortaya koyduğu sonuçlarla olan uyumu belirlemektedir. Bu bakımdan laboratuvar ortamında yapılmış olan model deneylerin sayısal analizlerinin yürütülmesi ve sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla inceleme kapsamında Geliştirilmiş Iowa amprik, PLAXIS 2D, PLAXIS 3D TUNNEL sayısal ve Fotogrametrik yöntemler kullanılmıştır.

Geliştirilmiş Iowa yönteminde, küçük deplasman aralıkları için tam elipsoit bir şekil değiştirme göstererek düşey ve yatay şekil değişimlerinin birbirlerine eşit olduğu varsayılmıştır. Bunun yanında dairesel gerilme dağılımları altında kalan boruda çembersel deformasyonların göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmıştır.  $K_0$  koşullarının ve yüksek dolgu yüklerinin modellendiği deneylerde Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan zemin reaksiyonu değişkeni için zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar sayısal analizlerinde PLAXIS 7.2 (2D) ve PLAXIS TUNNEL (3D) programları kullanılmıştır. PLAXIS 7.2' de hendek ortamı bir düzlem kesit olarak modellenirken, 3D TUNNEL programında kutu ve boru boyutları gerçekte olduğu gibi modellenmiştir. Sayısal analizlerde boru çember kesitinde oluşan eğilme momentleri ve yerdeğişimleri yükleme adımı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Fotogrametrik görüntüleme yönteminde boru ön yüzeyine yapıştırılan eşlenik noktalara odaklanmış yüksek çözünürlüklü kameralar yardımıyla şekil değişimleri izlenmiş ve bu noktaların üç boyutlu şekil değişimleri saptanmıştır.

Yapılan tüm deneysel, sayısal ve fotogrametrik çalışmaların kolaylıkla değerlendirilebilmesi amacıyla bütünleşik bir sunumda düzenlenmiştir. Böylelikle her bir deney başlığı altında yapılan tüm çalışmaların genel değerlendirmesi görülebilmektedir.

1 ile 30 No'lu deneylerin sunumu 5 ayrı gruba ayrılarak aşağıda görüleceği gibi özetlenmiştir.

## 10.1. Kum Geri Dolgusunda Yapılan Düşey Yüklü Deneyler

### 10.1.1 1 No'lu Deney

1 No'lu deneyde çapı 200 mm olan bir HDPE borunun düşey yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Boru kesitinin düşey eksenine yerleştirilen yer değişimi ölçer aygıtından yararlanılarak boru tacının gösterdiği deplasman büyüklüğü saptanmıştır. Çember kesitinde oluşan eğilme momentlerinin değerlendirilmesi için boru uzunluğunun orta kesitine ( $45^0, 135^0, 225^0, 315^0$ ) açısal aralıklarda 4 adet biçim değişimi ölçer (strain gage) yapıştırılmıştır. İncelenen 200 mm çapındaki HDPE boru, 15 cm kalınlığındaki yataklama düzlemine  $180^0$ 'lik yataklama açısı göz önüne alınarak yerleştirilmiştir.

1 No'lu deneyde geri dolgu malzemesi olarak silis kumu kullanılmış ve model kutusuna kontrolsüz olarak (yağmurlama sistemi kullanılmadan) %57 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiştir. Yerleştirme tamamlandıktan ve hendek yüzeyi düzlendikten sonra yüzeyinin bütününe kaplayacak biçimde membran yastık serilmiş ve kutu kapağı kilitlenmiştir. Boru ve geri dolgu malzemesinin yerleştirilmesi sırasında boru kesitinde ortaya çıkan yerdeğişimi ve gerilme dağılımları kalibre edilerek birincil okuma değerleri “0” lanmıştır. Yaklaşık 800 bar gücündeki komprasör hava basıncı kaynağında yararlanılarak membran yastığa 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar ( $\sim 15$  m dolgu yükü) düşey sürsarj yükü uygulanmıştır. Her yükleme adımımda 2'ser dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının sönümlenmesi sağlanmıştır. Yükleme adımlarında 4'ü şekil değişimi ölçerlerden 1'i doğrusal yerdeğişimi ölçerden olmak üzere 5 veri kaynağından 20'ser okuma alınmıştır. Alınan deney okumaların aritmetik ortalamaları alınarak, geliştirilen özel yazılım programında anlamlı değerlere dönüştürülmüştür. Bu veriler ileriki aşamalarda karşılaştırmalar yapılabilmesi için EXCEL programında grafiklendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda, 1 No'lu deney için elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.2.'de görülebilir.

Çizelge 10.2 1 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük<br>(kPa) | Boru Tacının Δy<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |        |        |        |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                    |                                     | 45°                                             | 135°   | 225°   | 315°   |
| 20                 | 0.105                               | 0.0010                                          | 0.0000 | 0.0001 | 0.0007 |
| 40                 | 0.104                               | 0.0010                                          | 0.0000 | 0.0001 | 0.0007 |
| 60                 | 0.178                               | 0.0018                                          | 0.0003 | 0.0003 | 0.0010 |
| 80                 | 0.396                               | 0.0042                                          | 0.0011 | 0.0010 | 0.0015 |
| 100                | 0.601                               | 0.0062                                          | 0.0019 | 0.0016 | 0.0019 |
| 120                | 0.801                               | 0.0079                                          | 0.0028 | 0.0023 | 0.0023 |
| 140                | 1.105                               | 0.0100                                          | 0.0041 | 0.0032 | 0.0026 |
| 160                | 1.292                               | 0.0110                                          | 0.0051 | 0.0038 | 0.0029 |
| 180                | 1.568                               | 0.0130                                          | 0.0067 | 0.0048 | 0.0032 |
| 200                | 1.739                               | 0.0150                                          | 0.0076 | 0.0056 | 0.0034 |
| 220                | 1.935                               | 0.0160                                          | 0.0086 | 0.0065 | 0.0035 |
| 250                | 2.209                               | 0.0180                                          | 0.0100 | 0.0078 | 0.0035 |

% 57 sıklıktaki bir kum ortamında 250 kPa düşey yük etkisinde kalan 200 mm çapındaki HDPE boru, düşey ekseninde 2.2 mm yerdeğişimi göstermiştir. Bu yerdeğişimi altında boru omuzlarında sırasıyla (45° 135°) 0.018, 0.01 kNm/m, bel bölgesinde ise (225°,315°) 0.0078 ve 0.0035 kNm/m eğilme momentleri ortaya çıkmıştır. Boru kesitinden oluşan en büyük eğilme momenti boru omuzlarında görülürken en küçük eğilme momenti boru belinde ortaya çıkmıştır. Eşdeğer özellikte bir yataklama düzleminin varlığını yansıtan bu tür bir davranış biçiminde, en büyük ve en küçük eğilme momentleri arasındaki oran, ise 5.14 mertebelerinde oluşmuştur.

#### i) 1 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

1 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak sayısal çözümleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde tasarımcılar tarafından kullanıldığı gibi, küçük yerdeğişimi aralıkları için düşey ve yatay şekil değişimlerinin birbirlerine eşit, ve çembersel deformasyonların göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu kabul edilmiş, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride deplasman göstereceği varsayılmıştır. Bu kabuller çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.3 görülmektedir.

Çizelge 10.3 1 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                                     |
|-------|-----------------------------------------------------|
| K     | Yatak Katsayısı (0.083) ( $180^0$ Yataklama Açısı)  |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa)                           |
| $E_p$ | HDPE Young Modülü ( 900 MPa) ( Kısa Süreli Yükleme) |
| I     | HDPE Borunun Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$   |
| $E_s$ | Zeminin ikincil Young Modülü 18.5 MPa               |

Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde yer alan  $E_s$  zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Boruya ilişkin kısa süreli Young Modülü için üretici firmanın ve daha önceki yapılmış çalışmaların önerileri gözönüne alınarak 900 MPa seçilmiştir. Gecikme Faktörü  $D_L$ , kısa süreli yüklemeler için 1 alınmıştır. Çizelge 10.3'de yer alan değişkenler kullanılarak yapılan Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.4'te görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.4 1 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |            |       |                 |
|----------------------------|----------|------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ kPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 20                         | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 0.25763         |
| 40                         | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 0.51526         |
| 100                        | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 1.28815         |
| 120                        | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 1.54578         |
| 140                        | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 1.80342         |
| 180                        | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 2.3186          |
| 200                        | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 2.57631         |
| 250                        | 108.8    | 18.5       | 0.083 | 3.22039         |

Geliştirilmiş Iowa Yönteminde yapılan çözümlerde % 57 sıklıktaki bir kum geri dolgusunda 200 mm boru çapındaki HDPE borunun 3.22 mm düşey deplasman göstereceği hesaplanmıştır.

## ii) 1 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

1 No'lu deneyin malzeme, kutu ve yükleme koşulları sayısal analiz yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde 2 Boyutlu PLAXIS 7.2 programında yapılmıştır. Kullanılan zemin ve boru malzemelerine ilişkin özellikler Çizelge 10.5te özetlenmektedir.

Çizelge 10.5 1 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Silis Kumu           | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                  | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| E <sub>50</sub>     | 18.5 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

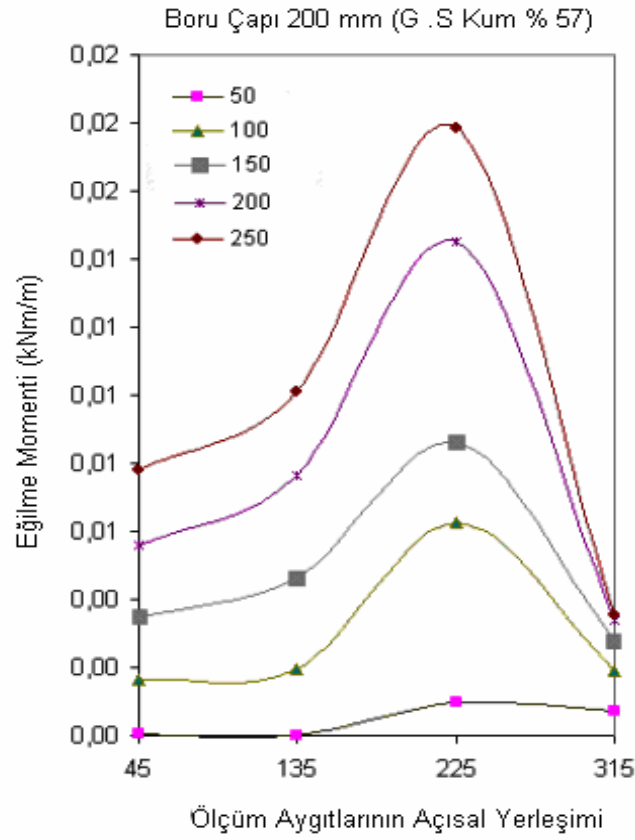
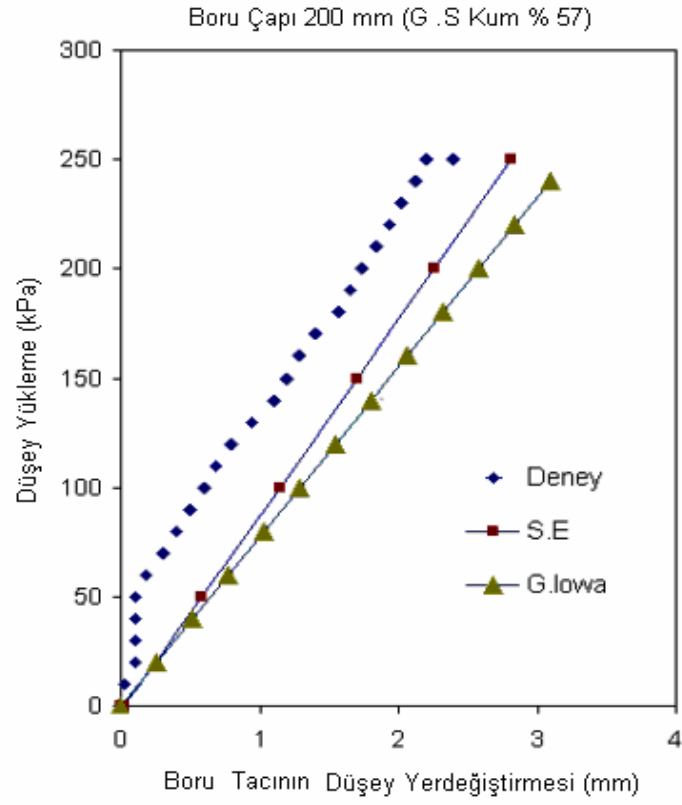
Yapılan analizlerin sonuçları Çizelge 10.6 görülmektedir.

Çizelge 10.6 1 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                          |
|---------------------------------|------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) |
| 50                              | 0.5865                                   |
| 100                             | 1.144                                    |
| 150                             | 1.702                                    |
| 200                             | 2.260                                    |
| 250                             | 2.837                                    |

PLAXIS 2D Sayısal Analiz çözümünden elde edilen edilen boru tacının göstereceği düşey deplasman büyüklüğü 2.83 mm olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneysel, amprik ve sonlu elemanlar sayısal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçların karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.1'de sunulmuştur. Boru çemberindeki eğilme momentlerinin dağılımları değerlendirildiğinde en büyük eğilme momentleri borunun bel bölgelerinde ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.





Şekil 10.1 1 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.2 2 No'lu Deney

200 mm çaplı HDPE boru üzerinde yapılan 2 No'lu deneyde geri dolgu olarak silis kumu kullanılmış ve model kutusuna yağmurlama sisteminden yararlanılarak % 70 göreceli sıklıkta uniform olarak yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada membran yastık kullanılarak hendek yüzeyinden 10 kPa'lık adımlarda 250 kPa kadar (~15 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 10.7 görülmektedir.

Çizelge 10.7 2 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük<br>(kPa) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |         |          |          |
|--------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|----------|----------|
|                    |                                             | 45°                                             | 135°    | 225°     | 315°     |
| 20                 | 0.17216                                     | 0.00282                                         | 0.00202 | 0.000537 | 0.000733 |
| 40                 | 0.20072                                     | 0.00454                                         | 0.00396 | 0.001052 | 0.001115 |
| 60                 | 0.23842                                     | 0.00679                                         | 0.00664 | 0.00153  | 0.001726 |
| 80                 | 0.30108                                     | 0.00897                                         | 0.0095  | 0.001843 | 0.002339 |
| 100                | 0.42643                                     | 0.01103                                         | 0.01359 | 0.002342 | 0.003129 |
| 120                | 0.64050                                     | 0.01355                                         | 0.01895 | 0.002992 | 0.004127 |
| 140                | 0.82815                                     | 0.01579                                         | 0.02369 | 0.003569 | 0.004984 |
| 160                | 0.97417                                     | 0.01761                                         | 0.02725 | 0.003784 | 0.00579  |
| 180                | 1.1678                                      | 0.01976                                         | 0.03146 | 0.004185 | 0.006831 |
| 200                | 1.37413                                     | 0.02205                                         | 0.03597 | 0.004381 | 0.007864 |
| 220                | 1.54861                                     | 0.02383                                         | 0.03965 | 0.004539 | 0.008721 |
| 250                | 1.87321                                     | 0.02708                                         | 0.04609 | 0.00418  | 0.011197 |

Çizelge 10.7'de görüldüğü gibi, 250 kPa düşey sürsarj yükü altında boru tacının 1.87 mm yerdeğişimi yaptığı saptanmıştır. Bu deplasman altında boru omuzlarında sırasıyla (45°, 135°) 0.027 ve 0.046 kNm/m, bel bölgelerinde ise (225°,315°) 0.0041 ve 0.011 kNm/m eğilme momenti saptanmıştır. Boru kesitinden oluşan en büyük eğilme momenti omuzlarında görülürken en küçük eğilme momenti boru belinde olduğu saptanmıştır. İyi ve eşdeğer özellikte bir yataklama düzleminin varlığını yansıtan bu türlü bir davranışta en büyük ve en küçük eğilme momentleri arasındaki oran 11.2 mertebelerinde oluşmuştur.

### i) 2 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

2. No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.8'te görülmektedir.

Çizelge 10.8 2 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                 |                                             |
|-----------------|---------------------------------------------|
| K               | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub>  | Uygulanan Düşey Yük (250 kPa)               |
| E <sub>p</sub>  | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I               | Atalet Momenti ( 1.83E-7) m <sup>4</sup> /m |
| R               | Ort. Boru Yarı Çapı ( 106 mm)               |
| E <sub>50</sub> | Zeminin ikincil Young Modülü 31 MPa         |

Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.9'da görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.9 2 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 50                         | 108.8             | 31                   | 0.083 | 0.49668 |
| 100                        | 108.8             | 31                   | 0.083 | 0.82781 |
| 150                        | 108.8             | 31                   | 0.083 | 1.15893 |
| 200                        | 108.8             | 31                   | 0.083 | 1.65562 |
| 250                        | 108.8             | 31                   | 0.083 | 2.06952 |

Yapılan hesaplamada, 250 kPa sürşarj yükü altında HDPE borunun 2.07 mm düşey ekseninde yerdeğiştirme yapacağı belirlenmiştir.

## ii) 2 Nolu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

2 No'lu deneyin PLAXIS 7.2 sonlu elemanlar programı kullanılarak sonlu elemanlar sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerde yeralan zemin ve boru malzemesi özellikleri Çizelge 10.10 gösterilmektedir.

Çizelge 10.10 2 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

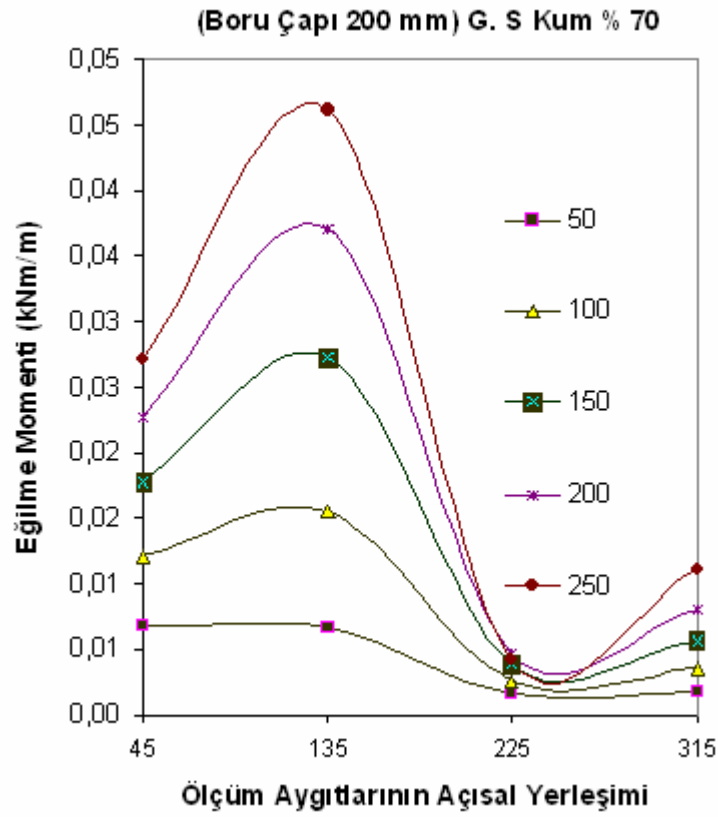
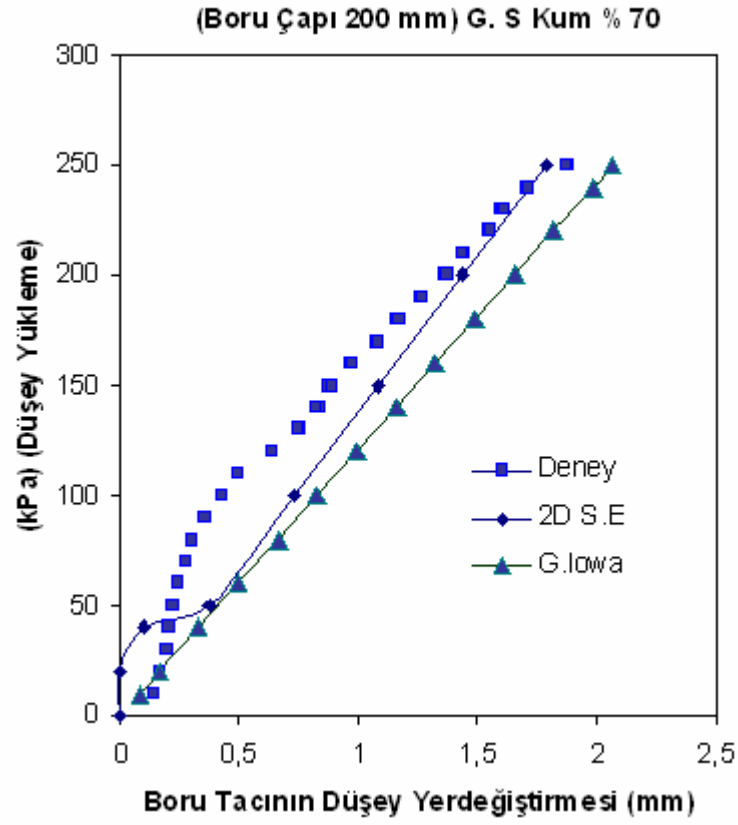
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 38°                  | EI                  | 0.126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 31 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

2 No'lu deneyin sonlu elemanlar sayısal analiz yöntemi çözümlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 10.11 'de gösterilmiştir.

Çizelge 10.11 2 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                          |
|---------------------------------|------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) |
| 50                              | 0.37                                     |
| 100                             | 0.73                                     |
| 150                             | 1.08                                     |
| 200                             | 1.44                                     |
| 250                             | 1.79                                     |

Yapılan deneysel, sayısal çalışmalarından elde edilen değerlerin karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.2'de görülmektedir.



Şekil 10.2 2 No'lu Deneyin Deneyisel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.3 3 No'lu Deney

3 No'lu deneyde % 50 sıklıkta kontrolsüz olarak yerleştirilen bir kum geri dolgusunda bulunan 200 mm çapındaki HDPE borunun düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaçla boru çember kesitine yan duvarları, taç ve taban bölgelerindeki  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  açılardaki noktalara biçim değişimi ölçerler yapıştırılmış ve borunun düşey ekseninde doğrusal yer değişimi ölçer (LPT) konuşturulmuştur. Deneyde, 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar (~15 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 10.12'te özetlenmiştir.

Çizelge 10.12 3 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük<br>(kPa) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |            |             |             |
|--------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                    |                                             | $0^\circ$                                       | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 30                 | 0.22074                                     | 0.005332                                        | 0.00373    | 0.002875    | 0.00408     |
| 50                 | 0.43482                                     | 0.009097                                        | 0.00669    | 0.00526     | 0.00614     |
| 100                | 1.28308                                     | 0.023594                                        | 0.01868    | 0.013916    | 0.01205     |
| 150                | 2.08759                                     | 0.037255                                        | 0.03008    | 0.020392    | 0.01747     |
| 200                | 2.82602                                     | 0.05057                                         | 0.04058    | 0.026132    | 0.02238     |
| 250                | 3.74357                                     | 0.066831                                        | 0.05296    | 0.032583    | 0.02784     |

Çizelge 10.12'de görüldüğü gibi 200 mm çaptaki HDPE boru % 50 sıklıktaki kum geri dolgusunda ve 250 kPa yük altında 3.74 mm düşey ekseninde yerdeğişimi göstermiştir. Yan duvarlara, taç ve taban kısımlarına yapıştırılan şekil değişimi ölçerlerden alınan eğilme momentleri sırasıyla boru sağ duvarında ( $0^\circ$ ) 0.066, boru tacında ( $90^\circ$ ) 0.052, boru sol duvarında ( $180^\circ$ ) 0.032 ve boru tabanında ( $270^\circ$ ) 0.027 kNm/m değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Beklendiği gibi boru kesitindeki en büyük eğilme momenti boru yan duvarlarında ortaya çıkmıştır. Yan duvarların yükü karşılayarak hendek kesitine aktardığı boru davranışlarında en büyük eğilme momentlerinin,  $0^\circ$  ve  $180^\circ$ 'lerde ortaya çıkması beklenen bir davranış biçimidir. Deneyde saptanan bir başka değerlendirme en büyük ve en küçük eğilme momentlerinin oranı 2.44 mertebelerinde olduğu belirlenmiştir.

### i) 3 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

3 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.13'te görülmektedir

Çizelge 10.13 3 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                              |
|-------|----------------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                        |
| $K$   | Yatak Katsayısı (0.083)                      |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (250 kPa)          |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa kPa)     |
| $I$   | Borunun Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$ |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Elastik Young Modülü 14 MPa  |

Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde yer alan  $E_s$  zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli deneylerden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.14'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.14 3 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 50                         | 108.8    | 14          | 0.083 | 0.93102         |
| 80                         | 108.8    | 14          | 0.083 | 1.48963         |
| 100                        | 108.8    | 14          | 0.083 | 1.86204         |
| 150                        | 108.8    | 14          | 0.083 | 2.60686         |
| 200                        | 108.8    | 14          | 0.083 | 3.72409         |
| 250                        | 108.8    | 14          | 0.083 | 4.6551          |

Geliştirilmiş Iowa Yöntemi sonuçlarına göre, 250 kPa düşey yük altında boru tacının 4.65 mm deplasman göstereceği hesaplanmıştır.

### ii) 3 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

3 No'lu deneyin PLAXIS 7.2 sonlu elemanlar programı kullanılarak sonlu elemanlar sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin ve boru özellikleri Çizelge 10.15'te gösterilmektedir.

Çizelge 10.15 3 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli           | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin                  | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{\text{kuru}}$ | 16 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$    | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$                 | 33°                  | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$                  | 14 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Kullanılan zemin ve boru malzemeleri ile yapılan analiz sonuçları Çizelge 10.16'da görülmektedir.

Çizelge 10.16 3 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

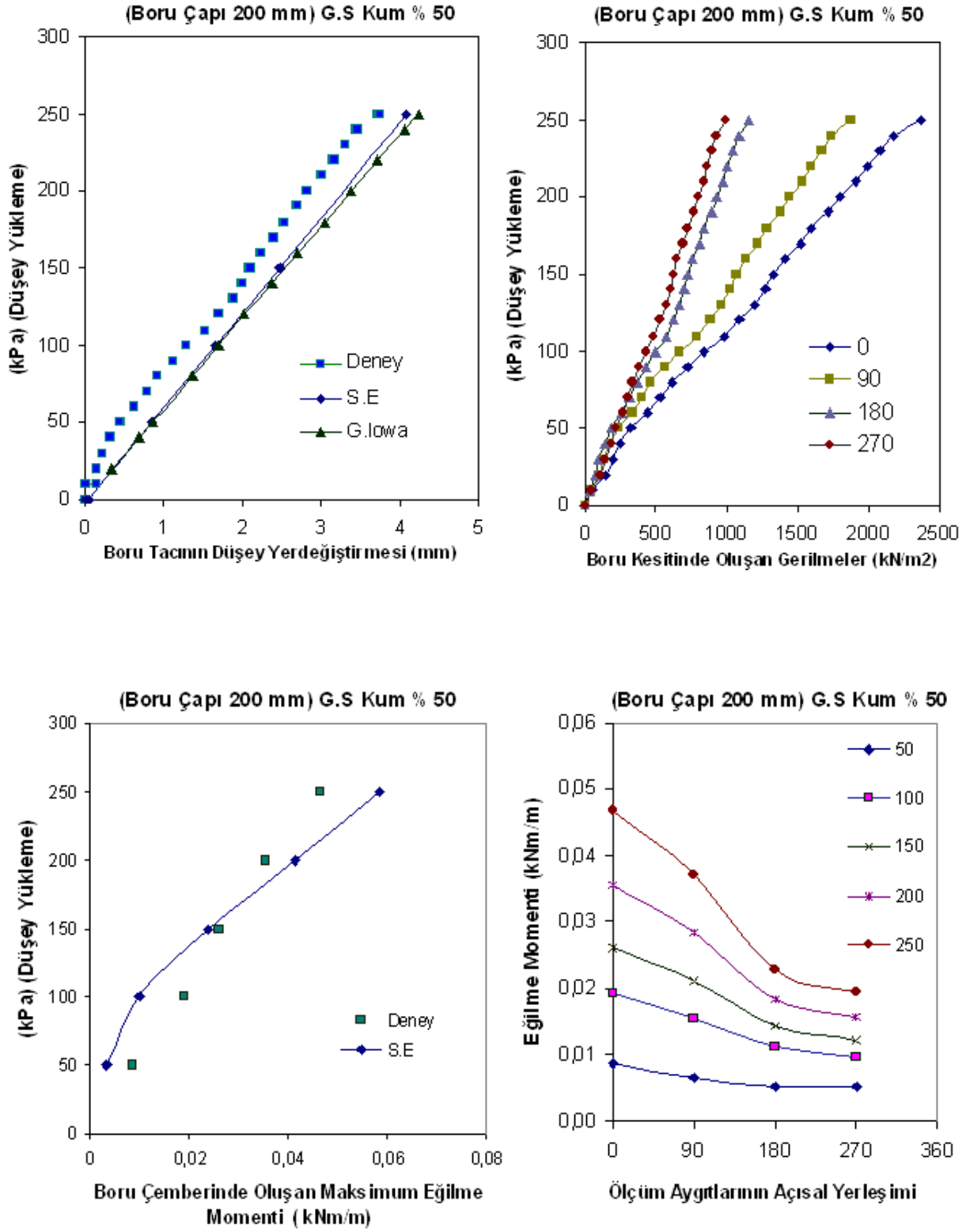
| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                              |                                                       |
|---------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğiştirmesi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Momenti (kNm/m) |
| 50                              | 0.0343333                                    | 0.0034                                                |
| 100                             | 0.846184                                     | 0.0100                                                |
| 150                             | 1.65781                                      | 0.0240                                                |
| 200                             | 2.46931                                      | 0.0415                                                |
| 250                             | 4.09224                                      | 0.0586                                                |

Sonlu elemanlar sayısal analiz sonuçlarına göre 200 mm çaplı HDPE boru, 250 kPa düşey yük altında 4.09 mm yerdeğişimi göstermiş ve bu deplasmana karşılık boru yan duvarlarında 0.0586 kNm/m'luk eğilme momenti oluştuğu hesaplanmıştır.

Amprik ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırıldığında yapılan sonlu elemanlar sayısal analizlerinin oldukça gerçekçi çözümler ortaya koyduğu



görülmektedir. Boru tacının düşey yerdeğişimi deneysel çalışmada 3.74 mm olarak saptanırken, Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde boru tacı 4.64 mm, sonlu elemanlar sayısal analizinde ise 4.09 mm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti deneysel ve sayısal sonuçlarda sırasıyla 0.066 ve 0.058 kNm/m olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçların tüm yük kademelerindeki karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.3 gösterilmektedir



Şekil 10.3 3 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 10.1.4 4 No'lu Deney

4 No'lu deneyde sıkı bir kum geri dolgusunda yer alan HDPE borunun düşey yüklemeler altındaki davranışını incelemek amaçlanmıştır. 200 mm HDPE boru üzerinde yapılan deneyde, geri dolgu olarak silis kumu kullanılmış ve model kutusuna % 92 göreceli sıklıkta denetimsiz olarak yerleştirilmesi sağlanmıştır. Amaçlanan sıklık seviyesine ulaşabilmek için 10 cm kalınlığındaki dolgu tabakalarına 10 kg ağırlığındaki bir plaka 10 cm'lik yükseklikten eşit sayıda düşürülmüştür. Sıkıştırma işlemi ve membran yastık serimi tamamladıktan sonra kutu kapağı kilitlenmiş ve 10 kPa'lık yükleme adımlarında 350 kPa mertebesine kadar düşey yükleme uygulanmıştır. Boru çember kesitinin  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  yerleştirilen biçim değişimi ölçerler ve doğrusal yer değişimi ölçer aygıtları ile boru davranışı belirlenmiştir. Yürütülen çalışmalar ışığında elde edilen 4 No'lu deney sonuçları Çizelge 10.17'de görülmektedir.

Çizelge 10.17 4 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük<br>(kPa) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |            |             |             |
|--------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                    |                                             | $0^\circ$                                       | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 50                 | 0.00954                                     | 0.00738                                         | 0.00513    | 0.002856    | 0.00181     |
| 100                | 0.32403                                     | 0.0164                                          | 0.0104     | 0.006504    | 0.00208     |
| 150                | 0.49001                                     | 0.02168                                         | 0.01294    | 0.008364    | 0.00194     |
| 200                | 0.69821                                     | 0.028                                           | 0.01587    | 0.010446    | 0.001751    |
| 250                | 0.87706                                     | 0.0341                                          | 0.01865    | 0.012388    | 0.00165     |
| 300                | 1.04829                                     | 0.03879                                         | 0.02056    | 0.013869    | 0.00147     |
| 350                | 1.18537                                     | 0.04369                                         | 0.02277    | 0.015324    | 0.00139     |

Çizelge 10.17'de görüldüğü gibi 200 mm çaptaki HDPE boru % 92 sıklıktaki kum geri dolgusunda ve 350 kPa yük altında 1.18 mm düşey yerdeğişimi göstermiştir. Yan duvarlara, tac ve taban kısımlarına yapıştırılan biçim değişimi ölçerlerden alınan eğilme momentleri sırasıyla boru sağ duvarında ( $0^\circ$ ) 0,043, boru tacında ( $90^\circ$ ) 0.022, boru sol duvarında ( $180^\circ$ ) 0.015 ve boru tabanında ( $270^\circ$ ) 0.0013 kNm/m büyüklüklerindedir. Esnek boru davranışından beklendiği gibi en büyük eğilme momenti değeri boru yan duvarında oluşmuş ve en büyük eğilme momenti ile en küçük eğilme momenti arasındaki oran yaklaşık 33 mertebelerinde olduğu hesaplanmıştır.

#### i) 4 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi Analizi

4 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.18'te görülmektedir.

Çizelge 10.18 4 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (340 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 1.83E-7) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 106 mm)               |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü (58.4 Mpa)     |

Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.19'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.19 4 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                    |       |             |
|----------------------------|-------------------|--------------------|-------|-------------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> kPa | (K)   | Δy (mm)     |
| 100                        | 108.8             | 58.4               | 0.083 | 0.672499535 |
| 150                        | 108.8             | 58.4               | 0.083 | 0.451785382 |
| 200                        | 108.8             | 58.4               | 0.083 | 0.903570765 |
| 250                        | 108.8             | 58.4               | 0.083 | 1.174641994 |
| 300                        | 108.8             | 58.4               | 0.083 | 1.355356147 |
| 350                        | 108.8             | 58.4               | 0.083 | 1.5360703   |

## ii) 4 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

4 No'lu deneyin sonlu elemanlar sayısal analizi, kutu sınır koşulları ve yükleme adımları göz önünde tutularak yürütülmüştür. Kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.20'de gösterilmektedir.

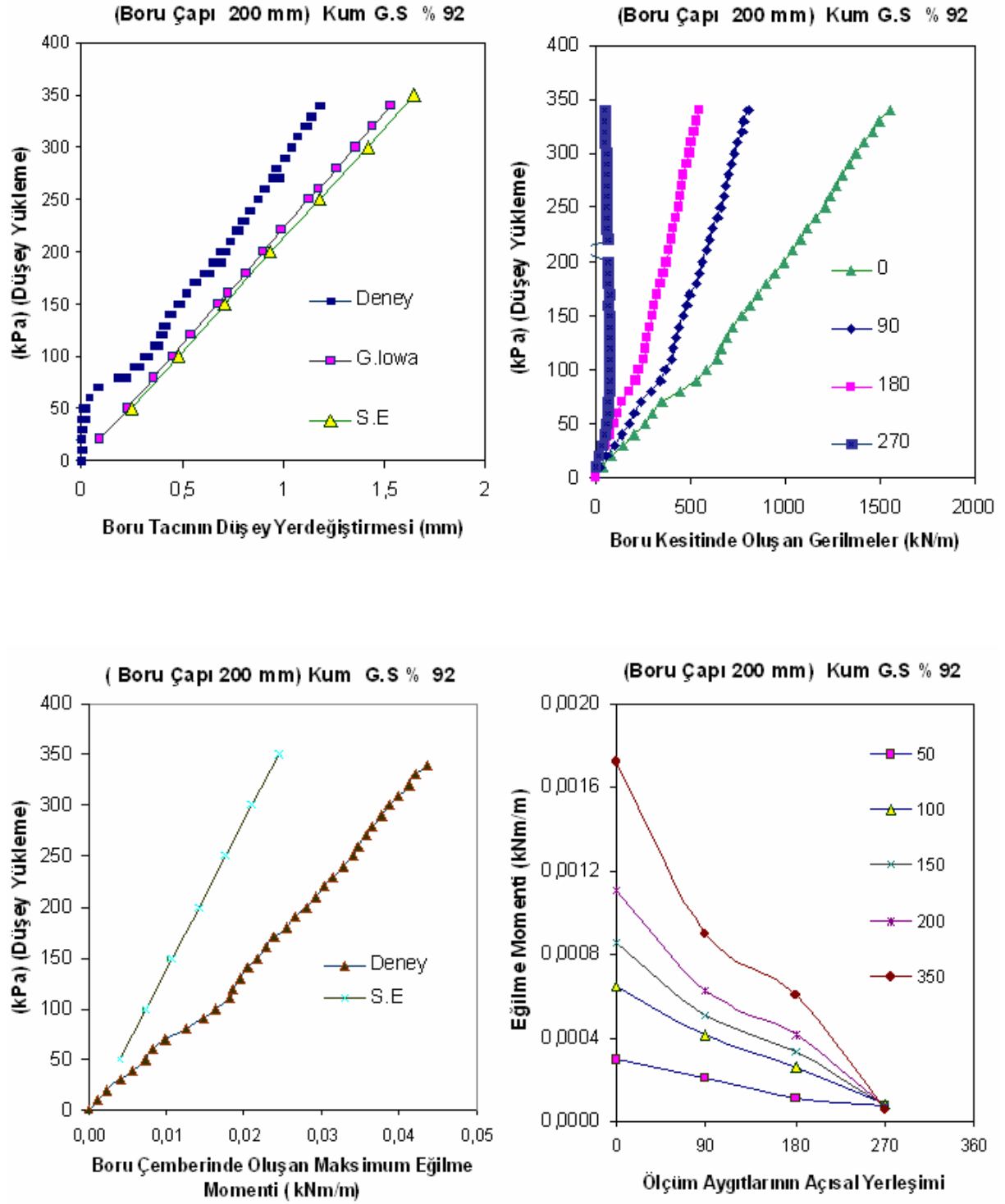
Çizelge 10.20 4 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum                    | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 18.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 43°                    | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 58.4 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.21 4 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                          |                             |
|---------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 100                             | 0.48                                     | 0.00729                     |
| 150                             | 0.71                                     | 0.01073                     |
| 200                             | 0.94                                     | 0.01416                     |
| 250                             | 1.18                                     | 0.01759                     |
| 300                             | 1.42                                     | 0.02102                     |
| 350                             | 1.65                                     | 0.02446                     |

Amprik ve sonlu elemanlar sayısal analizlerinden elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırıldığında yapılan sayısal analizlerin oldukça gerçekçi çözümler ortaya koyduğu görülmektedir. Boru tacının düşey yerdeğişimi deneysel çalışmada 1.18 mm olarak saptanırken, Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde boru tacı deplasmanı 1.53 mm, sonlu elemanlar sayısal analizinde ise 1.65 mm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti deneysel ve sayısal sonuçlarda sırasıyla 0.043 ve 0,024 kNm/m olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçların bütün yük kademelerindeki karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.4'te görülmektedir.



Şekil 10.4 4 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.5 5 No'lu Deney

5 No'lu deneyde 200 mm çapındaki HDPE borunun iki tabakalı geri dolgu ortamlarındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, daha önceki çalışmalardan farklı olarak çakıl ve kum geri dolgu malzemeleri birlikte kullanılmış iki tabakalı bir hendek ortamı modellenmiştir. Hendek tabanından 37.5 cm yüksekliğe kadar % 56 göreceli sıklığa sahip kum, bu seviyeden hendek yüzeyine kadar geriye kalan 30 cm yükseklik ise % 60 sıklığa sahip çakıl malzemesi yerleştirilmiştir. Model kutusuna geri dolgular yerleştirildikten sonra, hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 400 kPa'a kadar (~ 25 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. Deneyde boru davranışını saptayabilmek için, biçim değişimi ve doğrusal yerdeğişimi ölçerler kullanılmıştır. 5 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.22 'de görülmektedir

Çizelge 10.22 5 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük<br>(kPa) | Boru Tacının Δy<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri<br>(kNm/m) |         |          |          |
|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|---------|----------|----------|
|                    |                                     | 0°                                                 | 90°     | 180°     | 270°     |
| 50                 | 0.4859                              | 0.010029                                           | 0.00731 | 0.003597 | 0.00052  |
| 100                | 1.05992                             | 0.021831                                           | 0.01427 | 0.00787  | 0.00011  |
| 150                | 1.72021                             | 0.034282                                           | 0.02139 | 0.02878  | 9.E-05   |
| 200                | 2.52906                             | 0.050168                                           | 0.02936 | 0.018871 | 0.01614  |
| 250                | 3.18758                             | 0.06401                                            | 0.03717 | 0.023834 | 0.00762  |
| 300                | 3.79327                             | 0.066889                                           | 0.04395 | 0.028663 | 0.000615 |
| 350                | 4.40661                             | 0.066889                                           | 0.05148 | 0.033379 | 3.4E-05  |
| 400                | 5.09868                             | 0.066889                                           | 0.05943 | 0.03805  | 0.0013   |

Yürütülen deneysel çalışmada 200 mm çaptaki HDPE borunun düşey eksenli kum-çakıl geri dolgusunda ve 400 kPa yük altında 5.09 mm yerdeğişimi göstermiştir. Boru sağ duvarından (0°) 250 kPa yük seviyesi sonrasında okuma alınamamış (eğilme limitlerinin aşılması nedeniyle), ve eğilme momenti incelemeleri 250 kPa yük seviyesine kadar yapılmıştır.

250 kPa düşey yük altında boru kesitinde oluşan eğilme momentleri sırasıyla boru sağ duvarı ( $0^\circ$ )'nda 0.064, boru tacında ( $90^\circ$ ) 0.037, boru sol duvarında ( $180^\circ$ ) 0.023 ve boru tabanında ( $270^\circ$ ) 0.0076 kNm/m değerlerinde ortaya çıkmıştır. Beklendiği gibi en büyük eğilme momenti değeri boru yan duvarında oluşmuştur. En büyük ve en küçük eğilme momentinin birbirlerine oranları yaklaşık 8.42 mertebelerinde oluşmuştur.

#### i) 5 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi Analizi

5 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.23'te görülmektedir.

Çizelge 10.23 5 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                                         |
|-------|---------------------------------------------------------|
| K     | Yatak Katsayısı (0.083)                                 |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (400 kPa)                     |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)                    |
| I     | Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$                    |
| R     | Ort. Boru Yarı Çapı ( 106 mm)                           |
| $E_s$ | İki Farklı Zeminin Ortalama İkincil Young Modülü 16 MPa |

5 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanılarak çözümünde, 200 mm çapındaki borunun 400 kPa yük altında 6.02 mm düşey ekseninde yerdeğiştirme göstereceği hesaplanmıştır. Diğer yükleme adımlarındaki yerdeğişim büyüklükleri Çizelge 10.24'te özetlenmiştir.



Çizelge 10.24 5 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 100                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 1.50651         |
| 150                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 2.2564          |
| 200                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 3.01303         |
| 250                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 3.7662          |
| 300                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 4.51954         |
| 350                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 5.27215         |
| 400                        | 108.8    | 16          | 0.083 | 6.02606         |

### ii) 5 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

Amprik çözümün yanında 5 No'lu deneyin sonlu elemanlar sayısal modellemesi de yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.25 'te verilmektedir

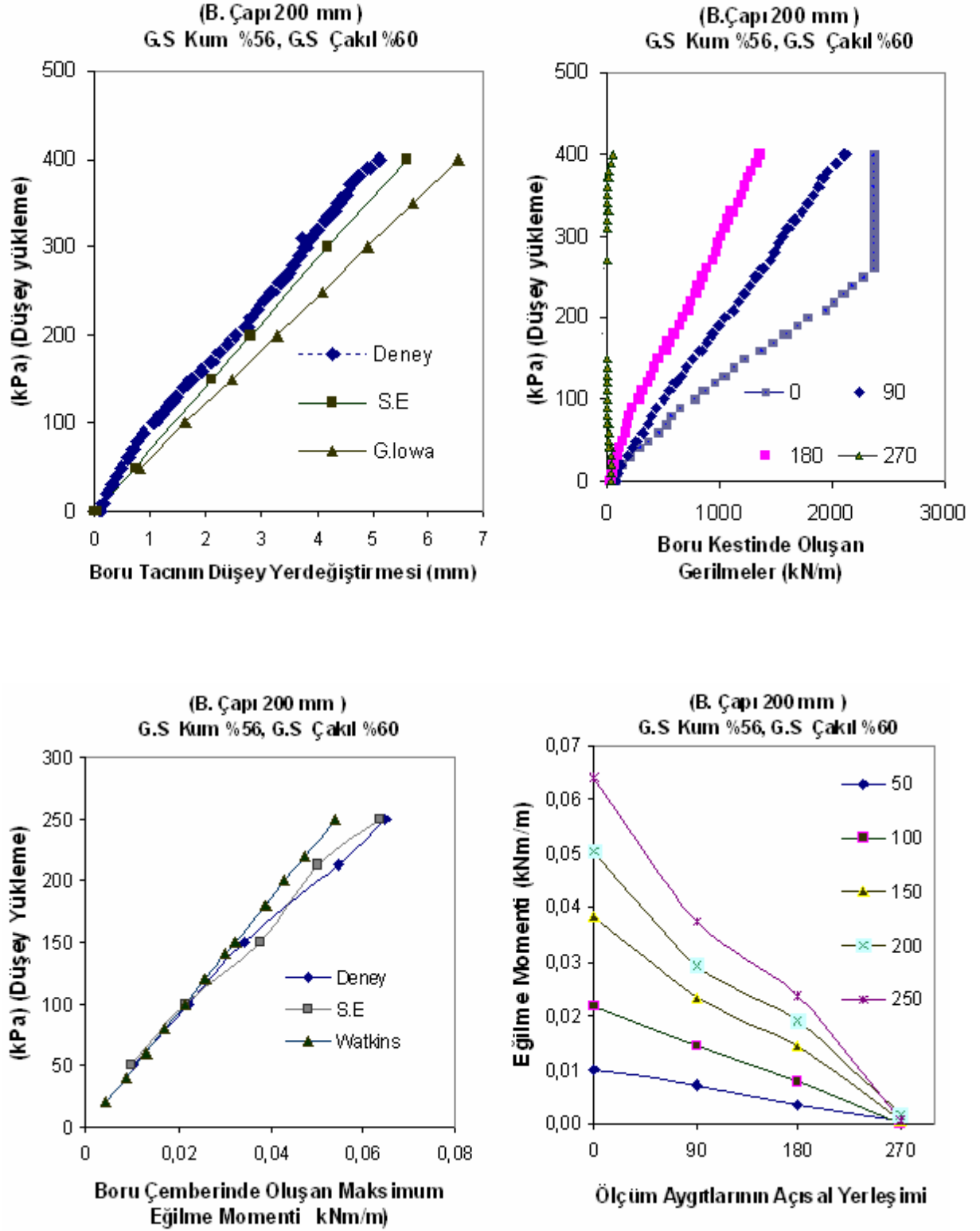
Çizelge 10.25 5 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum/Çakıl            | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°/32°              | EI                  | 0.126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 17/14 MPa            | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.26 5 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                             |                                                      |
|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme<br>(kPa)          | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                              | 0.72                                        | 0.02213                                              |
| 150                             | 2.11                                        | 0.03448                                              |
| 250                             | 2.81                                        | 0.06475                                              |
| 300                             | 4.79                                        | -                                                    |
| 400                             | 5.47                                        | -                                                    |

5 No'lu deneyin sayısal yöntemle çözümünde 400 kPa'lık sürşarj yükü altındaki 200 mm çapındaki borunun tacı 5.47 mm yerdeğişimi gösterdiği hesaplanmıştır. 250 kPa yük seviyesi altında boruda meydana gelen en büyük eğilme momenti değeri ise 0.064 kNm/m olarak bulunmuştur. Deneysel veriler ve sayısal sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Boru tacının düşey deplasmanı deneysel çalışmada 5.1 mm olarak saptanırken, Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde 6.01 mm bulunmuş, sayısal analizde boru tacının düşey deplasmanı ise 5.47 mm olarak hesaplanmıştır. Boru çemberinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti 0.066 kNm/m dir. Yapılan deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçların karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.5'de görülebilir.



Şekil 10.5 5 No'lu Deneyin DeneySEL ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.6 6 No'lu Deney

6 No'lu deneyde tabandan 16 cm yüksekliğe yerleştirilen 200 mm çapındaki HDPE borunun iki tabakalı bir geri dolgu ortamındaki davranışı incelenmiştir. Deneyde çakıl ve kum geri dolgu malzemeleri birlikte kullanılarak bir önceki çalışmaya benzer iki tabakalı bir hendek ortamı modellenmiştir. Hendek tabanından 37 cm yüksekliğe kadar % 63 göreceli sıkılığa sahip çakıl, bu seviyeden hendek yüzeyine kadar olan 33 cm yükseklik % 50 sıkılığa sahip kum malzemesi ile doldurulmuştur. Hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 400 kPa'a kadar ( $\sim 25$  m dolgu yükü) düşey yükleme olarak uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. 6 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.27'de görülmektedir

Çizelge 10.27 6 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük<br>(kPa) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |           |          |          |
|--------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|----------|----------|
|                    |                                             | 0°                                              | 90°       | 180°     | 270°     |
| 50                 | 0.14282                                     | 0.0033409                                       | 0.0046857 | 0.001972 | 0.001877 |
| 100                | 0.57117                                     | 0.010689                                        | 0.0110118 | 0.006934 | 0.002566 |
| 150                | 1.15987                                     | 0.0205973                                       | 0.0185602 | 0.012818 | 0.001438 |
| 200                | 1.87651                                     | 0.0321755                                       | 0.026482  | 0.019233 | 0.00114  |
| 250                | 2.5422                                      | 0.0434704                                       | 0.0341289 | 0.025209 | 0.00505  |
| 300                | 3.6258                                      | 0.0551356                                       | 0.0417656 | 0.031884 | 0.00797  |
| 350                | 3.92113                                     | 0.0647669                                       | 0.048617  | 0.038023 | 0.01068  |
| 400                | 4.55306                                     | 0.0675983                                       | 0.0551295 | 0.043185 | 0.01254  |

Çizelge 10.27'den görüldüğü gibi 200 mm çaptaki HDPE boru çakıl- kum geri dolgusunda ve 400 kPa yük altında 4.55 mm düşey ekseninde yerdeğiştirme göstermiştir. Yan duvarlara, taç ve taban kısımlarına yapıştırılan biçim değişimi ölçerlerden alınan eğilme momentleri sırasıyla boru sağ duvarı (0°)'nda 0,067, boru tacında (90°) 0.055, boru sol duvarında (180°) 0.043 ve boru tabanında 0.012 kNm/m büyüklüklerinde ortaya çıkmıştır. Yapılan değerlendirmelerde boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momentinin en küçük eğilme momentine oranı 5.58 olarak hesaplanmıştır.

### i) 6 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

6 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.28'te görülmektedir.

Çizelge 10.28 6 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                         |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (400 kPa)             |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa kPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 1.83E-7) m <sup>4</sup> /m     |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 106 mm)                   |
| E <sub>s</sub> | İki Farklı Zeminin Ortalama Young Modülü 17 MPa |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç ve plaka yükleme deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.29'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.29 6 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 100                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 1.36034 |
| 150                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 2.04051 |
| 200                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 2.72068 |
| 250                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 3.40085 |
| 300                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 4.08102 |
| 350                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 4.76119 |
| 400                        | 108.8             | 17                   | 0.083 | 5.44136 |

## ii) 6 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

Amprik çözümün yanında 6 No'lu deneyin sonlu elemanlar modellemesi de yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.30'da gösterilmektedir.

Çizelge 10.30 6 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

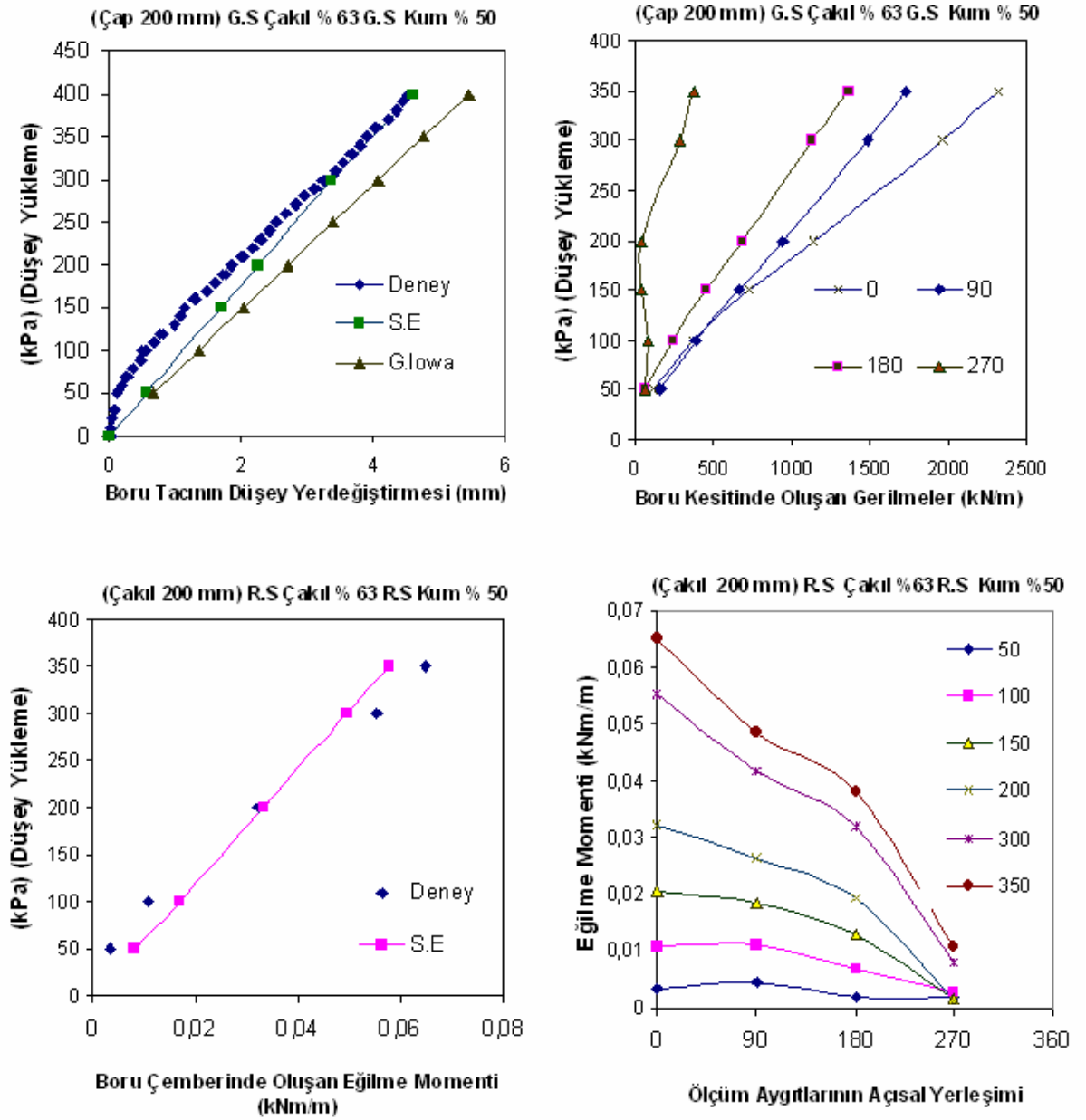
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb            | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Çakıl/Kum               | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16/18 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 213 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                    | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 34°/35                  | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 18.2/14.2 MPa           | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.30'da verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 400 kPa düşey yük etkisinde kalan 200 mm çapındaki HDPE borunun gösterdiği davranış Çizelge 10.31'de özetlenmektedir.

Çizelge 10.31 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                          |                                                   |
|---------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                              | 0.58                                     | 0.0082                                            |
| 100                             | 1.14                                     | 0.015                                             |
| 150                             | 1.70                                     | 0.016                                             |
| 200                             | 2.26                                     | 0.033                                             |
| 250                             | 2.82                                     | 0.042                                             |
| 300                             | 3.47                                     | 0.049                                             |
| 350                             | 3.93                                     | 0.057                                             |
| 400                             | 4.49                                     | 0.065                                             |

Amprik ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırıldığında yapılan sayısal analizlerin oldukça gerçekçi çözümler ortaya koyduğu görülmektedir. Boru tacının düşey yerdeğişimi deneysel çalışmada 4.49 mm olarak saptanırken, Geliştirilmiş Iowa Eşitliğinde boru tacı deplasmanı 5.44 mm, sayısal analizde ise 4.49 mm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti deneysel ve sayısal sonuçlarda sırasıyla 0.067 ve 0,065 kNm/m olarak bulunmuştur. Deneysel ve sayısal sonuçların bütün yük kademelerindeki karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.6'da gösterilmektedir



Şekil 10.6 6 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.7 7 No'lu Deney

7 No'lu deneyde, kontrolsüz olarak yerleştirilmiştir %55 sıklıktaki kum geri dolgu ortamında bulunan 242 mm çaplı bir borunun düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Boru, geri dolgu ve membranın yerleştirmesi tamamlandıktan sonra kutu kapağı kilitlenmiş ve 10 kPa'lık yükleme adımlarında 350 kPa' a kadar düşey yükleme uygulanmıştır. Boru davranışı,  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  noktalarına yapıştırılan biçim değişimi ölçerler ve düşey yatay eksenle konuşturılan doğrusal yer değişimi ölçerler ile saptanmıştır. 7 No'lu deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 10.32 'de görülmektedir.

Çizelge 10.32 7 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük<br>(kPa) | Boru Duvarının<br>$\Delta x$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Tacının<br>$\Delta y$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri<br>(kNm/m) |            |             |             |
|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                       |                                                  |                                                | $0^\circ$                                          | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 0                     | -0.00                                            | -0.00                                          | 2.19E-05                                           | 4.61E-06   | -1.5E-05    | 1.62E-05    |
| 50                    | 0.451                                            | 0.602                                          | 0.006505                                           | 0.0049     | 0.003601    | 0.00493     |
| 100                   | 1.072                                            | 1.545                                          | 0.016585                                           | 0.01249    | 0.009228    | 0.01113     |
| 150                   | 1.634                                            | 2.369                                          | 0.025626                                           | 0.01922    | 0.014033    | 0.01542     |
| 200                   | 2.037                                            | 3.075                                          | 0.033731                                           | 0.02501    | 0.017914    | 0.01816     |
| 250                   | 2.247                                            | 3.695                                          | 0.040868                                           | 0.03022    | 0.021273    | 0.02008     |
| 300                   | 2.542                                            | 4.285                                          | 0.047922                                           | 0.03537    | 0.02445     | 0.02138     |
| 350                   | 3.007                                            | 4.815                                          | 0.054003                                           | 0.03969    | 0.027105    | 0.02206     |

Çizelge 10.32'den görüldüğü gibi 242 mm çaptaki HDPE boru 350 kPa sürşarj yükü altında düşey ve yatay eksenlerde sırasıyla 4.81 ve 3 mm yerdeğişimi göstermiştir. Yan duvarlara, taç ve taban noktalarındaki biçim değişimi ölçerlerden alınan eğilme momentleri sırasıyla boru sağ duvarı ( $0^\circ$ )'nda 0,054, boru tacında ( $90^\circ$ ) 0.039, boru sol duvarında ( $180^\circ$ ) 0.027 ve boru tabanında ( $270^\circ$ ) 0.022 kNm/m büyüklüklerinde ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışmada düşey deplasmanın yatay deplasmana oranı 1.6 mertebelerinde olduğu saptanırken, en büyük ve en küçük eğilme momentleri oranı 2.45 değerinde meydana geldiği görülmüştür.



### i) 7 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

7 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.33'te görülmektedir

Çizelge 10.33 7 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (350 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 8.33E-8) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 121 mm)               |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü 17.8 MPa       |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.34'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.34 7 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 20                         | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 0.2779  |
| 60                         | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 0.8335  |
| 80                         | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 1.1116  |
| 100                        | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 1.3895  |
| 200                        | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 2.7791  |
| 300                        | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 4.1687  |
| 320                        | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 4.4466  |
| 350                        | 108.8             | 17.8                 | 0.083 | 4.8635  |

### ii) 10.1.7 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

7 No'lu deneyin zemin, kutu ve yükleme koşulları sayısal analiz yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Sayısal analizler PLAXIS 7.2 programında yapılmıştır. Analizlerde yer alan zemin ve boru malzemelerine ilişkin özellikler Çizelge 10.35'te özetlenmektedir.

Çizelge 10.35 7 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 35                   | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 17.8 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

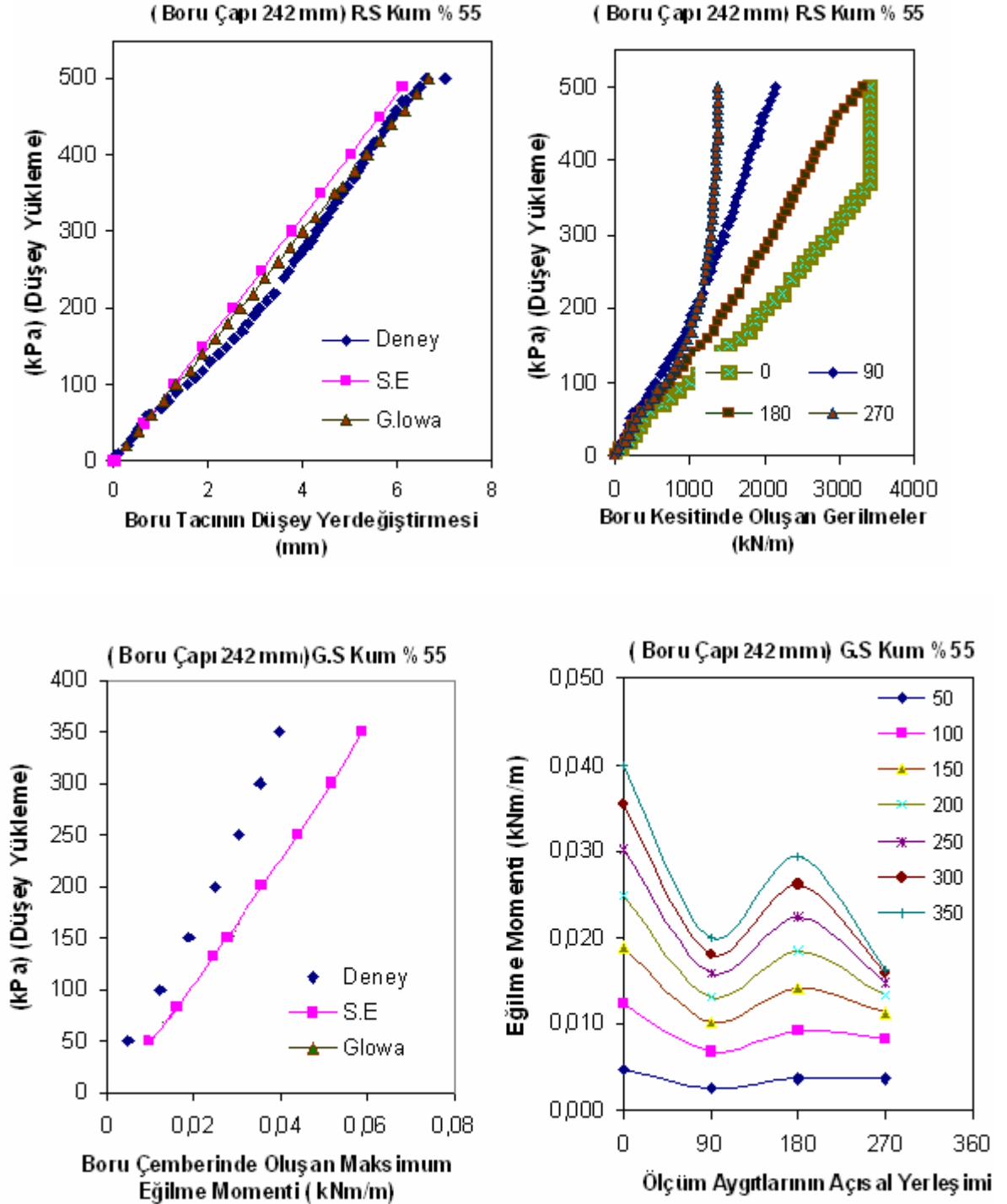
Çizelge 10.35'te verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 350 kPa düşey yük etkisinde kalan 242 mm çapındaki HDPE borunun sayısal analiz sonuçlarına göre gösterdiği davranış Çizelge 10.36'da özetlenmektedir.

Çizelge 10.36 7 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                          |                                                   |
|---------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                              | 0.65                                     | 0.01                                              |
| 100                             | 1.27                                     | 0.019                                             |
| 150                             | 1.9                                      | 0.028                                             |
| 200                             | 2.5                                      | 0.0356                                            |
| 250                             | 3.14                                     | 0.044                                             |
| 300                             | 3.76                                     | 0.0516                                            |
| 350                             | 4.38                                     | 0.0588                                            |

7 Nolu deneyin sayısal yöntemle çözümünde 350 kPa'lık düşey yük altındaki 242 mm çapındaki boru 4.38 mm düşey ekseninde yerdeğişimi göstereceği hesaplanmıştır. Bu yükleme

seviyesi altında boruda meydana gelen en büyük eğilme momenti değeri ise 0.058 kNm/m olarak bulunmuştur. Yürütülen çalışmalar sonucunda, deneysel ve sayısal sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Yapılan çalışmaların karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.7 de görülmektedir



Şekil 10.7 7 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.8 8 No'lu Deney

8 No'lu deneyde, yağmurlama sistemi ile kontrollü olarak yerleştirilmiştir % 65 sıklıktaki kum geri dolgu ortamında yer alan 242 mm çaplı bir esnek borunun davranışı incelenmiştir. HDPE boruya 10 kPa'lık yükleme adımlarında 200 kPa' a kadar düşey yük uygulanmıştır. Deneyde boru çember kesitinin 45°,135°,225° ve 315° açısıl noktalarına yapıştırılan biçim değişimi ölçerler ve düşey yatay eksenle konuşturılan doğrusal yerdeğişimi ölçerler kullanılmıştır. 8 No'lu deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 10.37'de özetlenmektedir.

Çizelge 10.37 8 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yükleme (Kpa) | Boru Duvarının $\Delta x$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |         |          |          |
|---------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|---------|----------|----------|
|                     |                                            |                                          | 45°                    | 135°    | 225°     | 315°     |
| 50                  | 0.609122                                   | 0.834928                                 | 0.013833               | 0.0029  | 0.009948 | 0.000978 |
| 100                 | 0.85222                                    | 1.487126                                 | 0.029492               | 0.00573 | 0.020844 | 0.002593 |
| 150                 | 1.22776                                    | 1.948207                                 | 0.044078               | 0.00831 | 0.030971 | 0.004401 |
| 200                 | 1.462920                                   | 2.278178                                 | 0.056246               | 0.01076 | 0.040135 | 0.006079 |

Çizelge 10.37'den görüldüğü gibi 242 mm çaptaki HDPE boru 200 kPa yük altında düşey ve yatay eksenlerde sırasıyla 2.27 ve 1.46 mm yerdeğişimi sergilemiştir. Omuz ve bel bölgelerine yapıştırılan biçim değişimi ölçerlerden alınan eğilme momentleri sırasıyla 0.056, 0.010, 0.040 ve 0.006 kNm/m büyüklüklerinde ortaya çıkmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda ayrıca düşey yatay yerdeğişimleri ve en büyük en küçük eğilme momentlerinin oranları değerlendirilmiştir. Bu değerler sırasıyla 1.57 ve 9.33 mertebelerinde saptanmıştır.

#### i) 8 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

8 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.38'te görülmektedir.

Çizelge 10.38 8 No'lu Deney için Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (200 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 8.33E-8) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 121 mm)               |
| E <sub>s</sub> | Zeminin Young Modülü 26.2 MPa               |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.39'da görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.39 8 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 50                         | 42.31             | 26.2                 | 0.083 | 0.61223 |
| 100                        | 42.31             | 26.2                 | 0.083 | 1.22446 |
| 150                        | 42.31             | 26.2                 | 0.083 | 1.8366  |
| 200                        | 42.31             | 26.2                 | 0.083 | 2.44893 |

## ii) 8 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

PLAXIS 7.2 programı kullanılarak 8 No'lu deneyin zemin sonlu elemanlar sayısal modellemesi yapılmıştır. Kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.40'da gösterilmektedir.

Çizelge 10.40 8 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

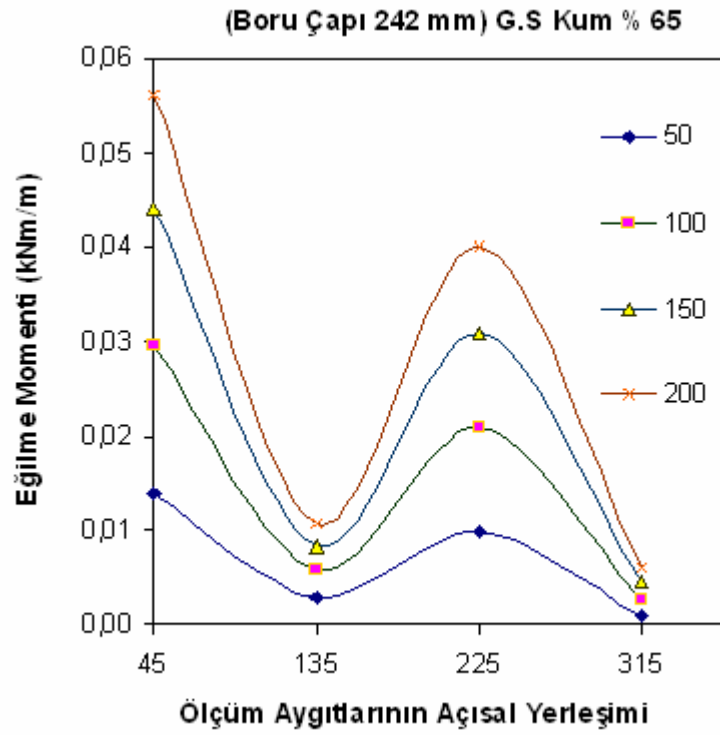
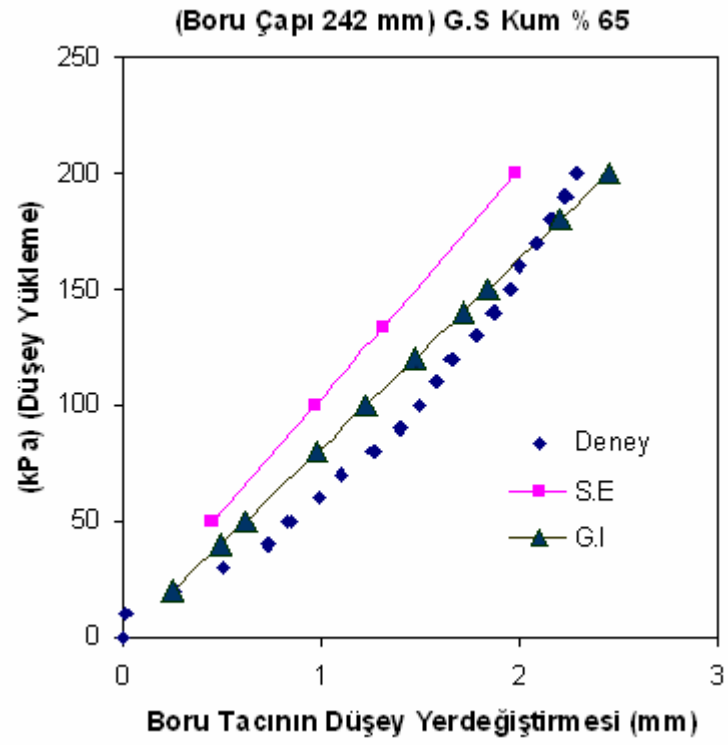
|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                    | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16,5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 36                     | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 26.2 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

HDPE borunun sayısal analiz sonuçlarına göre gösterdiği davranış ise Çizelge 10.41'de görülmektedir.

Çizelge 10.41 8 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                                |                                                       |
|--------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Düşey Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Momenti (kNm/m) |
| 50                             | 0.45                                           | 0.000946                                              |
| 100                            | 0.97                                           | 0.0018                                                |
| 134                            | 1.31                                           | 0.0026                                                |
| 200                            | 1.98                                           | 0.0035                                                |

8 No'lu deneyin sayısal yöntemle çözümünde 242 mm çapındaki boru, 200 kPa'lık düşey yük altındaki 1.98 mm yerdeğişim göstereceği hesaplanmıştır. Şekil 10.8'de görülebileceği gibi deneysel ve sayısal sonuçların birbirleri ile oldukça uyumludur.



Şekil 10.8 8 No'lu Deneyin DeneySEL ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.9 9 No'lu Deney

9 No'lu deneyde, denetimsiz olarak yerleştirilmiştir % 74 sıkılıktaki kum dolgu ortamında bulunan 242 mm çaplı bir borunun düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Model kutusuna geri dolguların yerleştirilemesi tamamlandıktan sonra, hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 450 kPa'a kadar ( ~ 25 m dolgu yükü)sürsarı yükü uygulanmıştır. Her yükleme adımında 6 veri okuma kanalından 20 şer okuma değeri alınmış ve bu verilerin aritmetik ortalamaları kullanılarak deney sonuçları belirlenmiştir. 9 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.42.'de görülmektedir

Çizelge 10.42 9 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük (kPa) | Boru Duvarının $\Delta x$<br>Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri<br>(kNm/m) |        |         |         |
|--------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|---------|---------|
|                    |                                                  |                                                | 0°                                                 | 90°    | 180°    | 270°    |
| 100                | 0,670004                                         | 1,621409                                       | 0.01658                                            | 0.0092 | 0.01249 | 0.01113 |
| 150                | 0,924389                                         | 2,237021                                       | 0.02553                                            | 0.0140 | 0.01921 | 0.01542 |
| 200                | 1,133948                                         | 2,744155                                       | 0.0337                                             | 0.0017 | 0.02501 | 0.01814 |
| 250                | 1,270649                                         | 3,07497                                        | 0.04086                                            | 0.0212 | 0.03022 | 0.02009 |
| 300                | 1,362742                                         | 3,297837                                       | 0.04792                                            | 0.024  | 0.03537 | 0.02137 |
| 350                | 1,467086                                         | 3,550349                                       | 0.0540                                             | 0.0271 | 0.03969 | 0.02205 |
| 400                | 1,591496                                         | 3,851421                                       | 0.05676                                            | 0.0298 | 0.04442 | 0.02264 |
| 450                | 1,685318                                         | 4,07847                                        | 0.05676                                            | 0.0325 | 0.04899 | 0.02293 |

Çizelge 10.42'den görüldüğü gibi 242 mm çaptaki HDPE boru 450 kPa yük altında düşey ve yatay eksenlerde sırasıyla 4.07 ve 1.68 mm yerdeğişimi göstermiştir. Yan duvarlara, taç ve taban kısımlarına 90° açılarda yapıştırılan şekil değışimi ölçerlerden alınan eğilme momentleri sırasıyla boru sağ duvarı (0°)'ında 0,056, boru tacında (90°) 0,035, boru sol duvarında (180°) 0,055 ve boru tabanında (270°) 0,023 kNm/m büyüklüklerinde saptanmıştır. Deneyde tac ve duvar deplasmanların birbirlerine oranı 1.65, en büyük ve en küçük eğilme momentleri oranı ise 2.43 mertebelerinde ortaya çıkmıştır.



### i) 9 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

9 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.43'te görülmektedir.

Çizelge 10.43 9 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| D              | Boru Çapı ( 242 mm)                         |
| D <sub>L</sub> | Gecikme Faktörü (1.0)                       |
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (500 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 8.83E-8) m <sup>4</sup> /m |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.44'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.44 9 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |          |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|----------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm)  |
| 200                        | 108.8             | 32                   | 0.083 | 1,821107 |
| 250                        | 108.8             | 32                   | 0.083 | 2,367439 |
| 300                        | 108.8             | 32                   | 0.083 | 2,731661 |
| 350                        | 108.8             | 32                   | 0.083 | 3,277993 |
| 400                        | 108.8             | 32                   | 0.083 | 3,642215 |
| 450                        | 108.8             | 32                   | 0.083 | 4,097491 |

## ii) 9 No'lu Deneyin Sayısal Analizi

Amprik çözümün yanında 9 No'lu deneyin sayısal modellemesi de yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.45'te gösterilmektedir.

Çizelge 10.45 9 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| $\gamma_{kuru}$     | 16 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 37                   | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 32 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

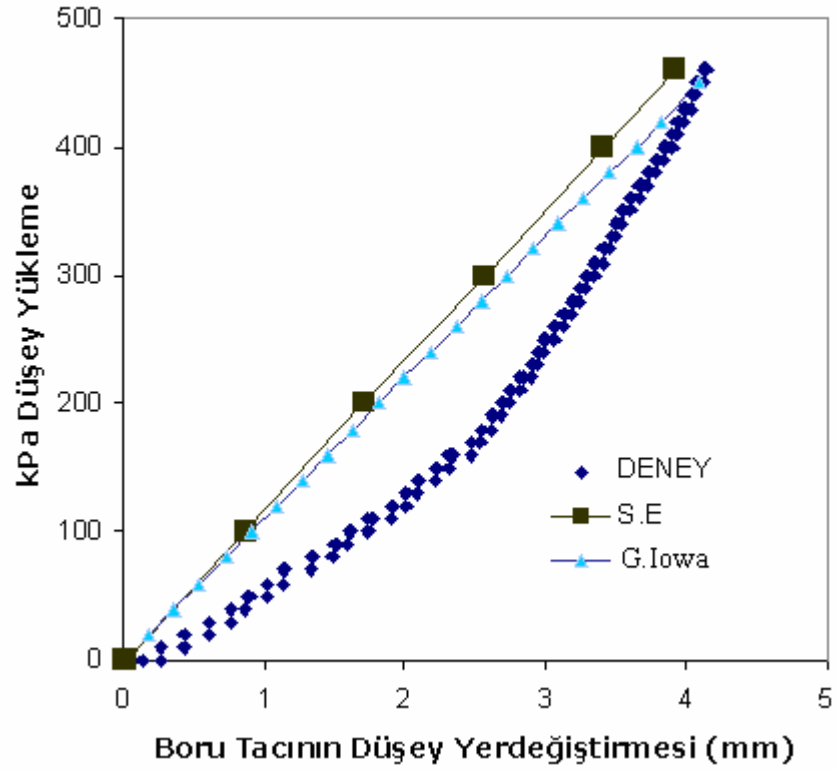
Çizelge 10.45'te verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 450 kPa düşey yük etkisinde kalan 242 mm çapındaki HDPE borunun sayısal yöntem kullanılarak analizleri yapılmıştır. Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan sayısal çözümde elde edilen analiz sonuçları Çizelge 10.46'de görülmektedir.

Çizelge 10.46 9 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

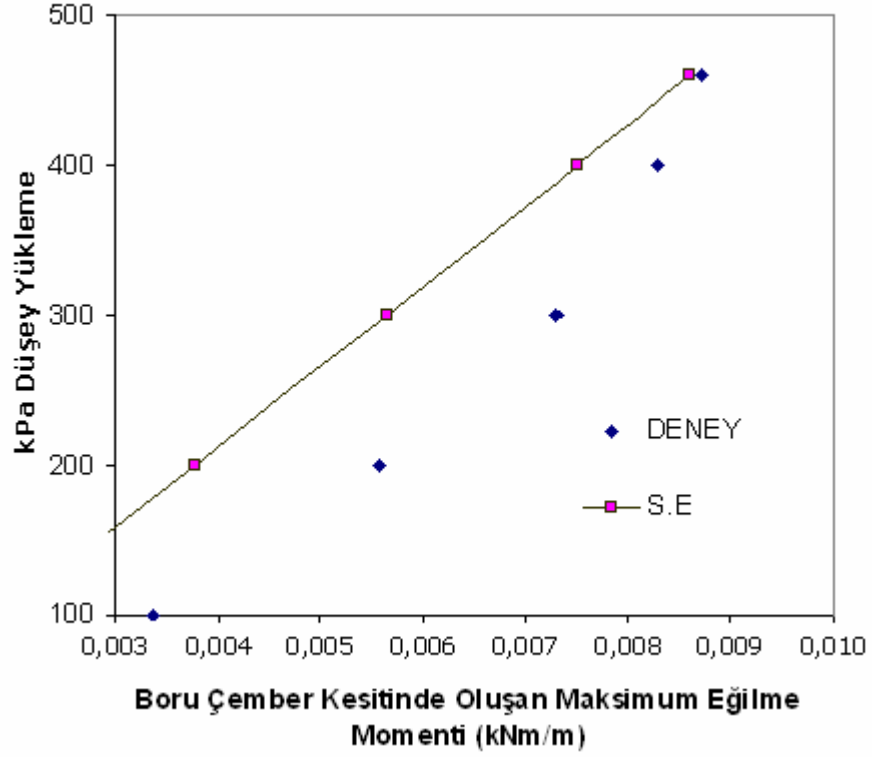
| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |                                                   |
|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 100                            | 0,871263                                 | 0,0019                                            |
| 200                            | 1,71846                                  | 0,0038                                            |
| 300                            | 2,56566                                  | 0,0057                                            |
| 400                            | 3,41286                                  | 0,0075                                            |
| 450                            | 3,92118                                  | 0,0086                                            |

Yapılan analizler sonucunda 9 No'lu deneyde ortaya çıkan şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları, ve maksimum eğilme momenti değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi Şekil 10.9'da görülmektedir.

( Boru Çapı 242 mm ) G. S Kum % 74



(Boru Çapı 242 mm) G. S Kum % 74



Şekil 10.9 9 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.1010 No'lu Deney

312 mm çapındaki HDPE boru üzerinde yapılan 10 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak kum kullanılmıştır. Dolgu malzemesi yağmurlama sistemi kullanılarak hendek kutusuna % 60 göreceli sıklıkta yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar (~15 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. Deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.47 'da görülmektedir.

Çizelge 10.47 10 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük<br>(kPa) | Boru Duvarının<br>$\Delta x$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Tacının<br>$\Delta y$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |         |        |          |
|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|--------|----------|
|                       |                                                  |                                                | 0°                                              | 90°     | 180°   | 270°     |
| 20                    | 0.39653                                          | 0.916793499                                    | 0.00532                                         | 0.00518 | 0.003  | 0.001928 |
| 50                    | 0.75352                                          | 1.742336747                                    | 0.011631                                        | 0.01181 | 0.0049 | 0.000193 |
| 100                   | 1.0999                                           | 2.540150206                                    | 0.021670                                        | 0.01981 | 0.0077 | 0.007138 |
| 150                   | 1.34359                                          | 3.100672971                                    | 0.029599                                        | 0.02413 | 0.01   | 0.013926 |
| 200                   | 1.62462                                          | 3.74900922                                     | 0.038159                                        | 0.02789 | 0.016  | 0.021459 |
| 250                   | 1.7956                                           | 4.145403766                                    | 0.042687                                        | 0.02976 | 0.019  | 0.025769 |

Çizelge 10.47'de görüldüğü gibi, % 60 sıklıktaki kum geri dolgu ortamına yerleştirilen 312 mm çapındaki HDPE esnek boru 250 kPa yükleme altında 4.14 mm düşey 1.79 mm yatay eksende yerdeğişimi göstermiştir. Bu deplasman altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti (boru yan duvarında) 0°'de ve 0.042 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. Deneyde taç ve duvar deplasmanların birbirlerine oranı 2.31, en büyük ve en küçük eğilme momentlerin birbirlerine oranı ise 1.44 mertebelerinde ortaya çıkmıştır.

### i) 10 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

10 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.48'te görülmektedir.

Çizelge 10.48 10 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (250 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 1.44E-7) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 156 mm)               |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü (21.7 MPa )    |

10 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa eşitliği kullanılarak çözümünde, 312 mm çapındaki borunun 250 kPa yük altında 4.75 mm düşey yerdeğiştirmesi göstereceği hesaplanmıştır. Diğer yükleme adımlarındaki deplasmanlar Çizelge 10.49'te özetlenmiştir.

Çizelge 10.49 10 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 20                         | 34.13             | 21.7                 | 0.083 | 0.380   |
| 100                        | 34.13             | 21.7                 | 0.083 | 1.900   |
| 160                        | 34.13             | 21.7                 | 0.083 | 3.04    |
| 200                        | 34.13             | 21.7                 | 0.083 | 3.800   |
| 250                        | 34.13             | 21.7                 | 0.083 | 4.750   |

## ii) 10 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

10 No'lu sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge.10.50'de gösterilmektedir.

Çizelge 10.50 10 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

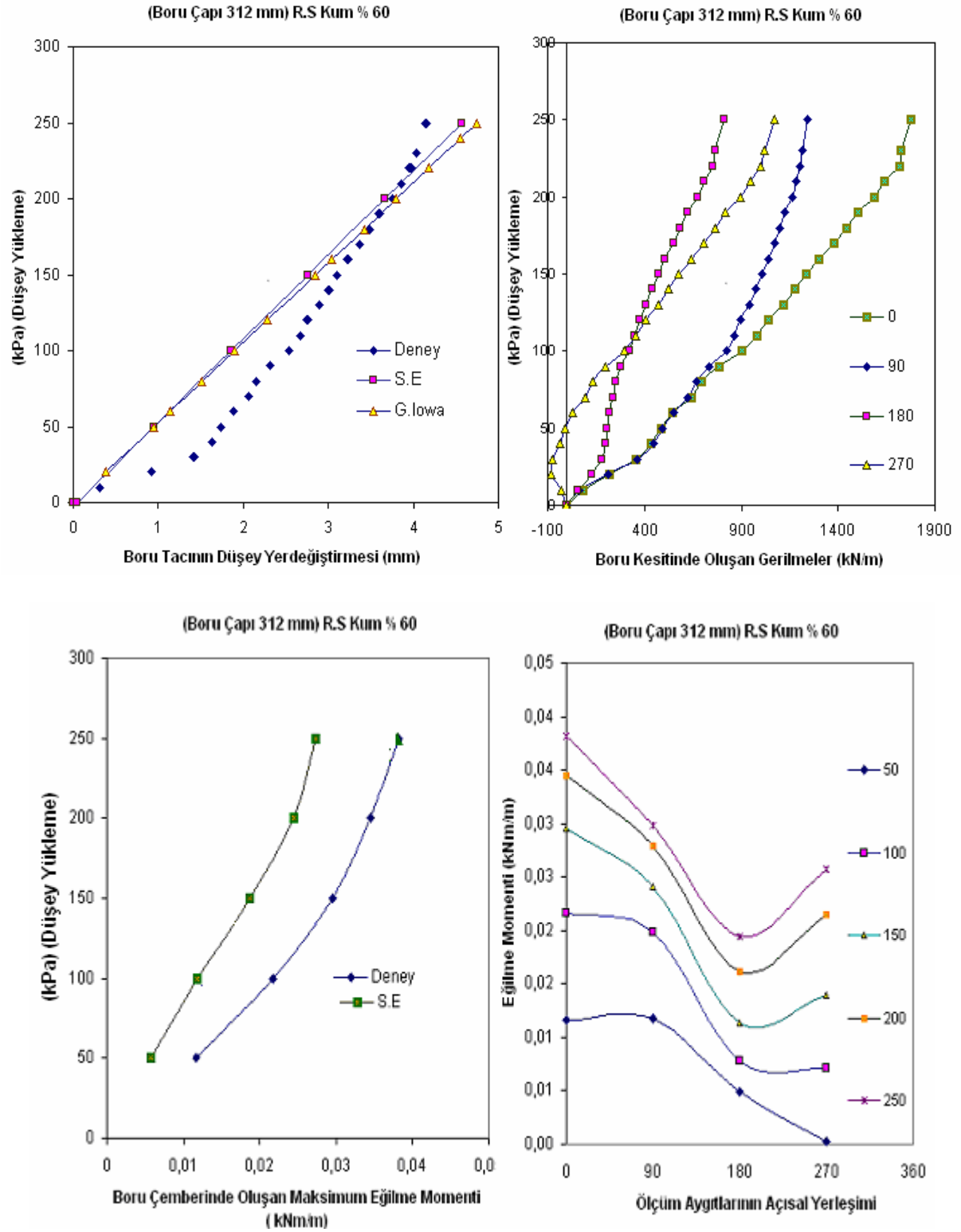
|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 4650 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                  | EI                  | 0,115 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 21.7 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.50'de görülen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 250 kPa düşey yük etkisinde kalan 312mm çapındaki HDPE borunun davranışı sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan çözümden elde edilen analiz sonuçları Çizelge 10.51'de görülmektedir.

Çizelge 10.51 10 No'lu Deneyin Sayısal Analiz Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |                             |
|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 0.954161                                 | 0.0058                      |
| 100                            | 1.85859                                  | 0.0119                      |
| 150                            | 2.76303                                  | 0.0187                      |
| 200                            | 3.66746                                  | 0.0245                      |
| 250                            | 4.57189                                  | 0.0273                      |

Sayısal analizler sonucunda boru tacının 4.57 mm düşey deplasman göstereceği ve bu yerdeğişimi altında ise boru çember kesitinde 0.027 kNm/m eğilme momenti oluşacağı saptanmıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.10'da görülmektedir.



Şekil 10.10 10 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.1.11 11 No'lu Deney

312 mm çapındaki HDPE boru üzerinde yapılan 11 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak kum kullanılmış ve hendek kutusuna % 88 göreceli sıklıkta yerleştirilmiştir. Hedeflenen sıklık seviyesine ulaşabilmek için 10 cm kalınlıklarında serilen dolgu tabakalarına 10 kg ağırlığındaki plaka eşit sayıda ve aralıkta düşürülmüştür. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 400 kPa'a (~ 22 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. 11 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.52 'de görülmektedir.

Çizelge 10.52 11 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yük | Boru Duvarının $\Delta x$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |          |          |          |
|-----------|--------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|
|           |                                            |                                          | 0°                     | 90°      | 180°     | 270°     |
| 50        | 0.167721                                   | 0.205541                                 | 0.00117                | 0.001375 | 0.00143  | 0.000234 |
| 100       | 0.49175                                    | 0.602635                                 | 0.00197                | 0.003395 | 0.003669 | 0.000519 |
| 150       | 0.808165                                   | 0.990398                                 | 0.00231                | 0.005341 | 0.006028 | 0.000768 |
| 200       | 1.123647                                   | 1.377018                                 | 0.00232                | 0.007355 | 0.008627 | 0.001028 |
| 250       | 1.477565                                   | 1.810741                                 | 0.00193                | 0.009807 | 0.011894 | 0.001383 |
| 300       | 1.788304                                   | 2.191549                                 | 0.00151                | 0.012033 | 0.01476  | 0.001728 |
| 350       | 2.092106                                   | 2.563855                                 | 0.00102                | 0.014264 | 0.017593 | 0.002053 |
| 400       | 2.388686                                   | 2.927312                                 | 0.00036                | 0.016506 | 0.020415 | 0.002359 |

Çizelge 10.52'den görüldüğü gibi, % 88 sıklıktaki kum geri dolgu ortamına yerleştirilen 312 mm çapındaki HDPE esnek boru 400 kPa düşey yükleme altında 2.92 mm düşey ve 2.38 mm yatay ekseninde yerdeğişimi göstermiştir. Bu yük ve yerdeğişimi altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti 180°'de ve 0.020 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. Çok sıkı bir dolgu ortamında yer alan HDPE boru düşey yüklemeler altında düşey yatay deplasman oranı 1.22 mertebesinde şekil değişimi göstermiştir. Dikkat edildiğinde, sıklık seviyesi arttıkça yatay düşey deplasmanlar birbirlerine yakın değerlerde ortaya çıkmaktadır. Bu durum kısa süreli yüklemeler için Spangler Kabulünün doğruluğunu yansıtmaktadır.



### i) 11 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

11 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.53'te görülmektedir.

Çizelge 10.53 11 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                            |
|----------------|--------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                    |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (400 kPa)        |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü (900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti (1.44E-7) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı (156 mm)               |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü (52.7 MPa)    |

11 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanılarak çözümünde, 312 mm çapındaki borunun 400 kPa yük altında 3.44 mm düşey deplasman göstereceği hesaplanmıştır. Diğer yükleme adımlarındaki deplasmanlar Çizelge 10.54'te özetlenmiştir.

Çizelge 10.54 11 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 100                        | 34.13             | 52.7                 | 0.083 | 0.79638 |
| 200                        | 34.13             | 52.7                 | 0.083 | 1.59279 |
| 300                        | 34.13             | 52.7                 | 0.083 | 2.38915 |
| 400                        | 34.13             | 52.7                 | 0.083 | 3.18558 |

### ii) 11 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

Ampirik çözümün yanında 11 No'lu deneyin sayısal modellemesi de yapılmıştır. Analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.55'te analiz sonuçları ise 10.56'da gösterilmektedir.

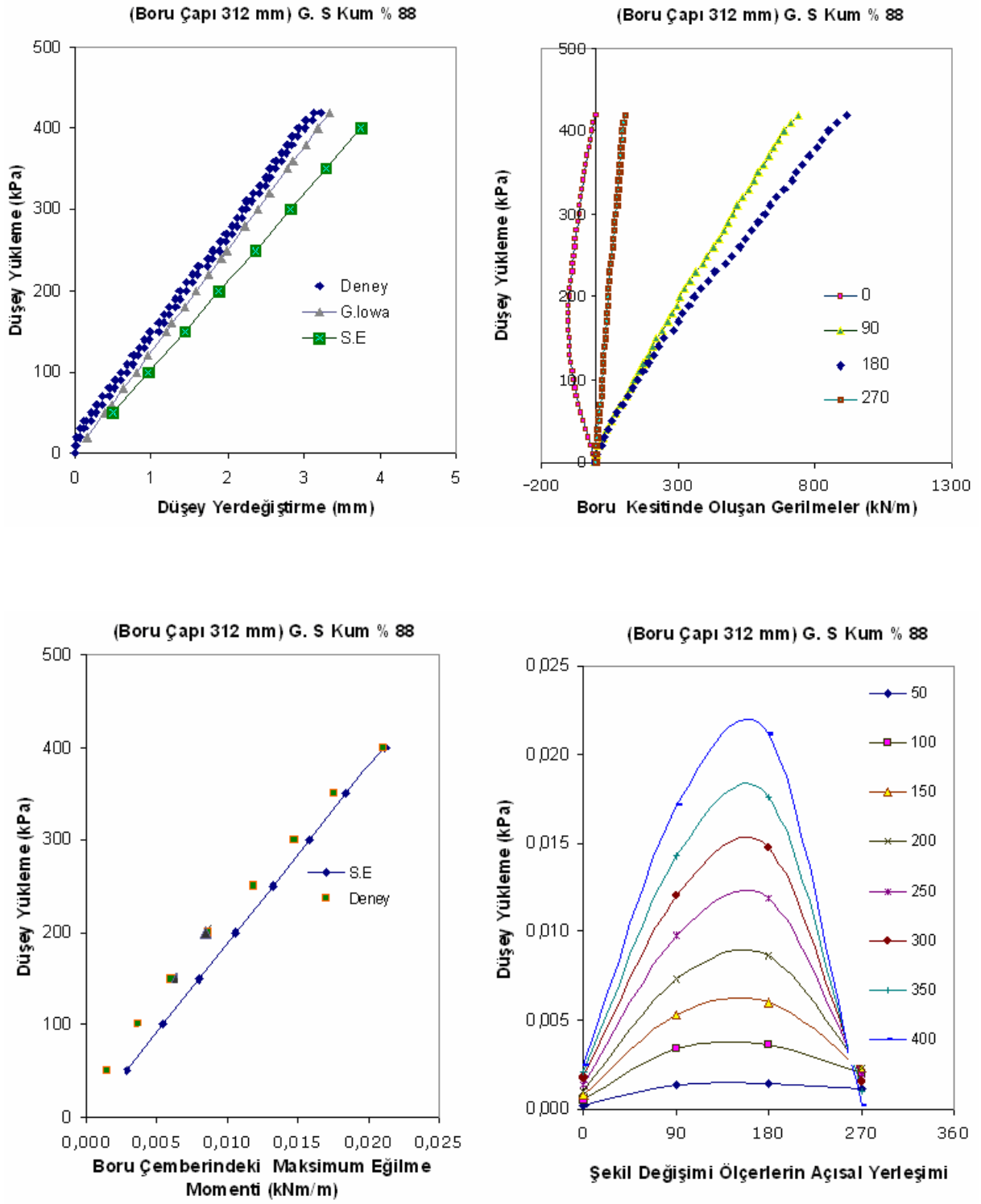
Çizelge 10.55 11 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 19 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 4640 kN/m                 |
| $\phi$              | 43°                  | EI                  | 0,115 kNm <sup>2</sup> /m |
| E <sub>50</sub>     | 52.7 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.56 11 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |                                                   |
|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 0.496                                    | 0.00283                                           |
| 100                            | 0.961                                    | 0.0054                                            |
| 150                            | 1.43                                     | 0.008                                             |
| 200                            | 1.89                                     | 0.0106                                            |
| 250                            | 2.36                                     | 0.0135                                            |
| 300                            | 2.82                                     | 0.0158                                            |
| 350                            | 3.29                                     | 0.0184                                            |
| 400                            | 3.75                                     | 0.0212                                            |

Sayısal analizler sonucunda 11 No'lu deneyde 400 kPa yük altında boru kesitinde düşey eksende 3.75 mm deplasman ve 0.021 kNm/m eğilme momenti oluşacağı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında düzenlenen şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları, eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.11'deki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 10.11 11 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

## 10.2 Çakıl Geri Dolgusunda Yapılan Düşey Yüklü Deneyler

### 10.2.1 12 No'lu Deney

200 mm HDPE boru üzerinde yapılan 12 No'lu deneyde geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmış ve model kutusuna % 65 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiştir. Yerleştirme tamamlandıktan ve kutu kapağı kilitlendikten sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 220 kPa (~14 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. 12 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.57'de görülmektedir.

Çizelge 10.57 12 No'lu Deneyden Elde Edilen Sonuçlar

| Düşey Yükleme<br>Kpa | Boru Tacının $\Delta y$<br>Düşey Dep (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |        |        |        |
|----------------------|-------------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|
|                      |                                           | 0°                     | 90°    | 180°   | 270°   |
| 50                   | 0.0939                                    | 0.0054                 | 0.0082 | 0.0055 | 0.0010 |
| 100                  | 0.7711                                    | 0.0190                 | 0.0196 | 0.0157 | 0.0048 |
| 150                  | 1.6729                                    | 0.0355                 | 0.0328 | 0.0278 | 0.0138 |
| 200                  | 2.7494                                    | 0.0549                 | 0.0466 | 0.0405 | 0.0242 |
| 220                  | 2.9057                                    | 0.0579                 | 0.0484 | 0.0422 | 0.0262 |

200 mm çaptaki HDPE boru 12 No'lu deneyde boru kesiti 2.9 mm düşey deplasman gösterirken, 0° (Boru yan duvarı)'nda 0.0579 kNm/m büyüklüğünde en büyük eğilme momenti oluşmuştur. Deneyde, en büyük ve en küçük eğilme momentleri oranı ise 2.2 mertebelerinde ortaya çıkmıştır.

#### i) 12 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

12 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.58'te görülmektedir.

Çizelge 10.58 12 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                   |
| $K$   | Yatak Katsayısı (0.083)                 |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (210 kPa)     |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)    |
| $I$   | Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$    |
| $R$   | Ort. Boru Yarı Çapı (106 mm)            |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (19.5 MPa) |

12 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanılarak çözümünde, 200 mm çapındaki borunun 210 kPa yük altında 2.80 mm düşey deplasman göstereceği hesaplanmıştır. Diğer yükleme adımlarındaki deplasmanlar Çizelge 10.59'de verilmiştir.

Çizelge 10.59 12 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 50                         | 108.8    | 19.5        | 0083  | 0.637470        |
| 100                        | 108.8    | 19.5        | 0.083 | 1.274941        |
| 150                        | 108.8    | 19.5        | 0.083 | 1.912411        |
| 200                        | 108.8    | 19.5        | 0.083 | 2.549882        |
| 210                        | 108.8    | 19.5        | 0.083 | 2.804870        |

### 12 No'lu Deneyin Sayısal Sayısal Analizi

12 No'lu deneyin sayısal modellemesi PLAXIS 7.2 programından yararlanılarak yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.60'da gösterilmektedir.

Çizelge 10.60 12 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

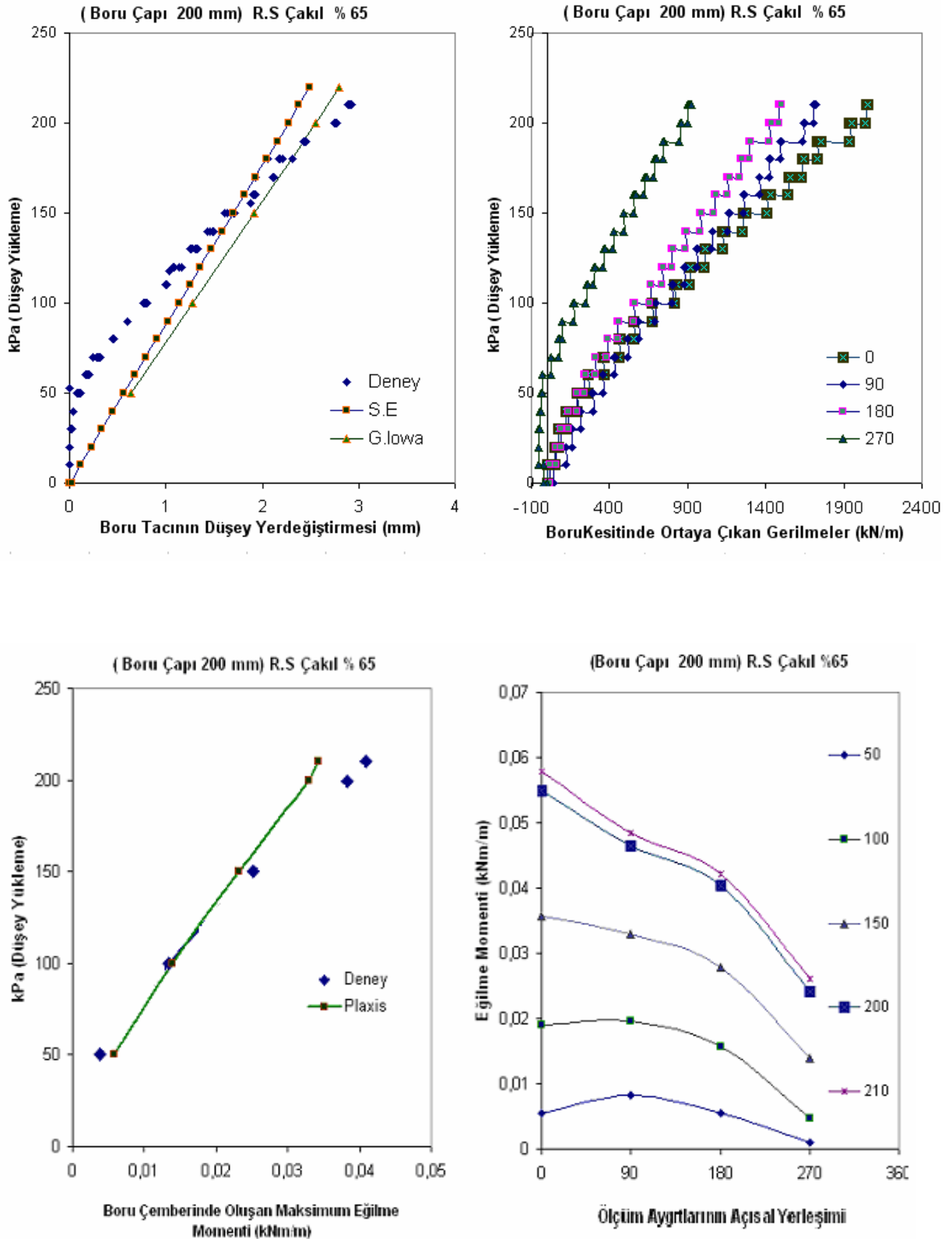
|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17,5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 35°                    | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 19.5 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.60'da verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 210 kPa düşey yük etkisinde kalan HDPE borunun sayısal analizinin sonuçları Çizelge 10.61'te görülmektedir.

Çizelge 10.61 12 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |                             |
|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 0,56546                                  | 0,00382                     |
| 100                            | 1,13335                                  | 0,01343                     |
| 150                            | 1,70131                                  | 0,0252                      |
| 200                            | 2,26926                                  | 0,03878                     |
| 210                            | 2,38284                                  | 0,04092                     |

12 No'lu deneyin sayısal yöntemle çözümünde 210 kPa'lık düşey yük altındaki 200 mm çapındaki borunun 2,38 mm düşey yönde yerdeğişimi göstereceği hesaplanmıştır. Bu yükleme seviyesi altında boruda meydana gelen en büyük eğilme momenti değeri 0.041 kNm/m olarak bulunmuştur. 12 Nolu deneyin amprik ve sayısal analizleri değerlendirildiğinde deplasman ve en büyük eğilme momenti büyüklüklerinin birbirlerine oldukça yakın değerler verdiği görülmektedir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.12'de görülmektedir.



Şekil 10.12 12 Nolu No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.2.2 13 No'lu Deney

200 mm HDPE boru üzerinde yapılan 13 No'lu deneyde incelenen esnek boru 15 cm kalınlığındaki yataklama düzlemine terazilenerek yerleştirilmiştir. Deneyde gerilme ölçerler, çember kesitine  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  açılarındaki yapıştırılmış ve geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmıştır. Dolgu malzemesi hendek kutusuna % 80 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiştir. Amaçlanan sıkılık seviyesine ulaşmak için 10 cm kalınlığında serilen çakıl tabakalarına 10 kg ağırlığındaki plaka, 10cm yükseklikten eşit aralıklarda düşürülmüştür. Yerleştirme tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar ( ~ 15 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'ser dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. 13 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.62'de özetlenmektedir.

Çizelge 10.62 13 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük<br>(kPa) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri (kNm/m) |            |             |             |
|-----------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                       |                                                | $0^\circ$                                       | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 50                    | 0.572                                          | 0.008365                                        | 0.012392   | 0.009831    | 0.00562     |
| 100                   | 0.870                                          | 0.012228                                        | 0.019471   | 0.021175    | 0.007166    |
| 150                   | 1.124                                          | 0.014785                                        | 0.026157   | 0.035062    | 0.006851    |
| 200                   | 1.216                                          | 0.015476                                        | 0.028375   | 0.045539    | 0.005352    |
| 250                   | 1.268                                          | 0.015631                                        | 0.030356   | 0.056131    | 0.004037    |

% 80 Sıkılıktaki bir çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 200 mm çapındaki HDPE esnek boru 250 kPa düşey yükleme altında 1.26 mm yerdeğişimi göstermiştir. Çizelge 10.62'de görüldüğü gibi bu yük ve deplasman altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti  $0^\circ$  (boru yan duvarında) de ve 0.057 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. En büyük ve en küçük eğilme momentleri arasında 14 kat fark oluşmuştur.



### i) 13 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

13 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.63'te görülmektedir.

Çizelge 10.63 13 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (250 kPa)     |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)    |
| $I$   | Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$    |
| $R$   | Ort. Boru Yarı Çapı ( 106 mm)           |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (31.5 MPa) |

13 No'lu deneyin G.Iowa yöntemiyle çözülmesi sonucunda; 250 kPa düşey yük altında boru kesitinin 2.8 mm düşey ekseninde deplasman yapacağı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 10.64 'te görülmektedir.

Çizelge 10.64 13 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 100                        | 108.8    | 31.5        | 0.083 | 0.8440          |
| 150                        | 108.8    | 31.5        | 0.083 | 1.2661          |
| 200                        | 108.8    | 31.5        | 0.083 | 1.6881          |
| 250                        | 108.8    | 31.5        | 0.083 | 2.0500          |

### ii) 13 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

13 No'lu deneyin zemin, kutu ve yükleme koşulları sayısal analiz yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Sayısal analizler 2 Boyutlu PLAXIS 7.2 programında yapılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin ve boru malzemelerine ilişkin özellikler Çizelge 10.65'te özetlenmektedir.

Çizelge 10.65 13 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

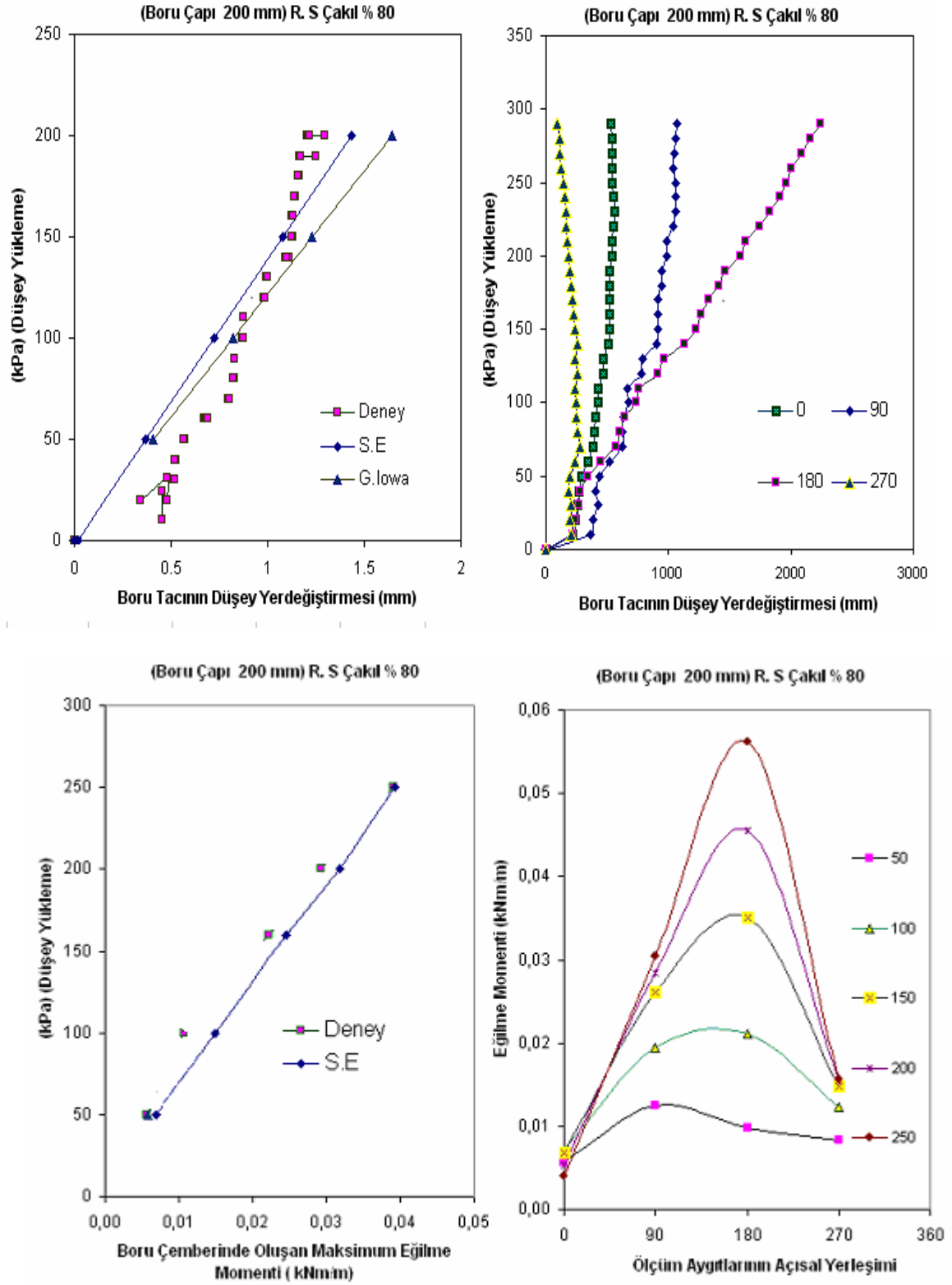
|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 18 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 40°                  | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 31.5 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.65' te verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 250 kPa düşey yük etkisinde kalan 200 mm çapındaki HDPE esnek borunun sayısal analizleri yapılmıştır. Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan sayısal çözümden elde edilen analiz sonuçları 10.66'da görülmektedir.

Çizelge 10.66 13 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                             |                                |
|--------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| Düşey Yükleme<br>(kPa)         | Boru Tacının $\Delta y$<br>Yerdeğişimi (mm) | En Büyük<br>Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 0.3714                                      | 0.00557                        |
| 100                            | 0.7249                                      | 0.01073                        |
| 150                            | 1.0784                                      | 0.01588                        |
| 200                            | 1.4319                                      | 0.02104                        |
| 250                            | 1.8457                                      | 0.02621                        |

Çizelge 10.66'da görüldüğü gibi, analizler sonucunda 200 mm çapındaki borunun 250 kPa düşey yük altında 1.84 mm deplasman göstereceği ve boru kesitinde bu deplasmana karşılık 0.026 kNm/m en büyük eğilme momenti oluşacağı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında 13 No'lu deneyde ortaya çıkan deplasmanların, gerilme dağılımlarının, eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.13'de görülmektedir.



Şekil 10.13 13 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.2.3 14 No'lu Deney

14 No'lu deneyde 242 mm çapındaki HDPE borunun düşey yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaçla düşey yatay, yer değişimi ölçerler ve 45°,135°,225° ve 315° açısall noktalarda yapıştırılan şekil değişimi ölçerler kullanılmıştır. 14 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmış ve hendek kutusuna % 55 göreceli sıklıkta yerleştirilmiştir. HDPE boru ve geri dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 200 kPa'a kadar (~15 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. 14 No'lu deneyinden elde edilen yerdeğişimleri ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.67'da görülmektedir.

Çizelge 10.67 14 No'lu Deney Sonuçları

| Yükleme<br>Kpa | Boru Duvarının<br>$\Delta x$ Yanal Yer.<br>(mm) | Boru Tacının<br>$\Delta y$ Düşey Yer<br>(mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |          |          |         |
|----------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|----------|----------|---------|
|                |                                                 |                                              | 45°                    | 135°     | 225°     | 315°    |
| 50             | 0.491368                                        | 0.949824031                                  | 0.00087                | 0.008731 | 0.001261 | 0.00213 |
| 100            | 0.906506                                        | 1.743112657                                  | 0.00053                | 0.016286 | 0.001088 | 0.00247 |
| 150            | 1.322264                                        | 2.551064087                                  | 0.001851               | 0.025408 | 0.000359 | 0.00297 |
| 200            | 1.71165                                         | 3.307179572                                  | 0.005854               | 0.034501 | 0.00346  | 0.00282 |

Deneysel verilerden görüldüğü gibi % 55 sıklıktaki çakıl geri dolgusunda ve 200 kPa yük altındaki HDPE esnek boru, düşey ekseninde 3.3 yatay ekseninde ise 1.71 mm deplasman göstermiştir. Bu deplasmanlar altında boru omuzlarında (45° 135°) 0.0058, 0.034 kNm/m bel bölgelerinde ise (225°,315°) 0.0014 ve 0.002825 kNm/m eğilme momentleri saptanmıştır. Boru kesitinin düşey yatay deplasman oranı 1.92, en büyük ve en küçük eğilme momentleri oranı ise 12 mertebelerinde saptanmıştır.

### i) 14 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

14 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.68'te görülmektedir.

Çizelge 10.68 14 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                   |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (200 kPa)     |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)    |
| $I$   | Atalet Momenti ( $8.83E-8$ ) $m^4/m$    |
| $R$   | Ort. Boru Yarı Çapı ( 106 mm)           |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (13.5 MPa) |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan  $E_s$  zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, plaka yükleme deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.14'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.69 14 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 20                         | 42.31    | 13.5        | 0.083 | 0.46760         |
| 100                        | 42.31    | 13.5        | 0.083 | 2.33802         |
| 160                        | 42.31    | 13.5        | 0.083 | 3.7408          |
| 180                        | 42.31    | 13.5        | 0.083 | 4.20845         |
| 200                        | 42.31    | 13.5        | 0.083 | 4.67605         |

## ii) 14 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

14 No'lu deneyin sayısal modellemesi PLAXIS 7.2 programından yararlanılarak yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.70'de gösterilmektedir.

Çizelge 10.70 14 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

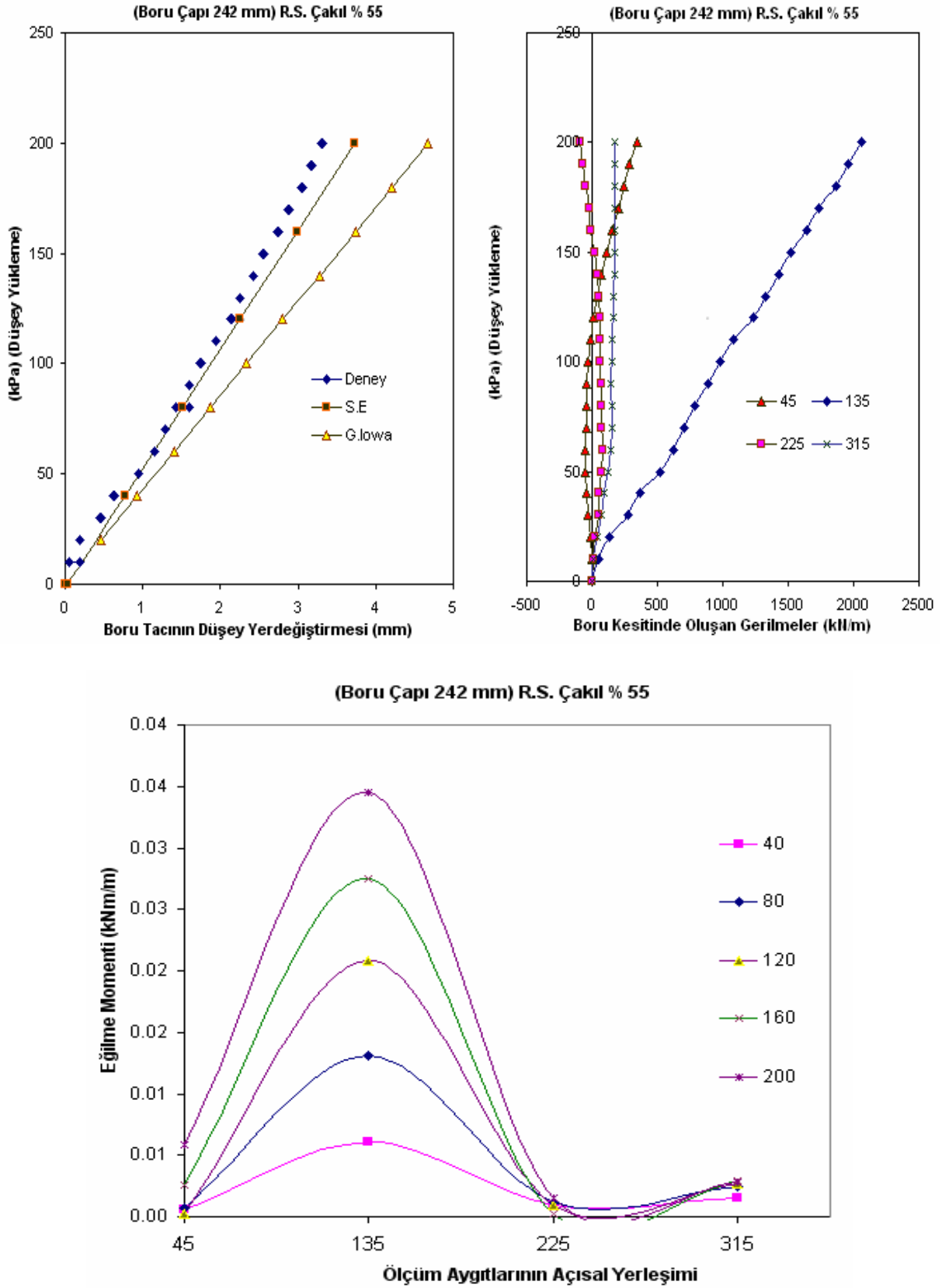
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Çakıl                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 35°                    | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 13.5 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.70'de verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 200 kPa düşey yük etkisinde kalan 242 mm çapındaki HDPE borunun sayısal yöntemle analizleri yapılmıştır. Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan sayısal çözümden elde edilen analiz sonuçları Çizelge 10.71'te görülmektedir.

Çizelge 10.71 14 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                                |
|--------------------------------|------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının Düşey $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) |
| 80                             | 1.51                                           |
| 120                            | 2.25                                           |
| 160                            | 2.99                                           |
| 200                            | 3.72                                           |

Sayısal analizler sonucunda 14'No'lu deneyde 200 kPa yük altında 3,72 mm yerdeğişimi ortaya çıkacağı hesaplanmıştır. Yapılan deneysel ve matematiksel çalışmalar sonucunda şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımlarının değerlendirildiği grafiksel gösterim, Şekil 10.14'de görülmektedir.



Şekil 10.14 14 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 10.2.4 15 No'lu Deney

15 No'lu deneyde 242 mm çapındaki HDPE borunun düşey yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Düşey yatay yerdeğişimi ölçerlerle birlikte  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  açısal noktalara yapıştırılan gerilme ölçerler kullanılmıştır. 15 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmış ve malzeme hendek kutusuna % 64 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 200 kPa'a (~15 m dolgu yükü) düşey yük uygulanmıştır. 15 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimleri ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.72'de görülmektedir.

Çizelge 10.72 15 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük<br>(kPa) | Boru Duvarının<br>$\Delta x$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Tacının<br>$\Delta y$ Yerdeğişimi<br>(mm) | En Büyük Eğilme Momenti (kNm/m) |            |             |             |
|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                       |                                                  |                                                | $0^\circ$                       | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 50                    | 0.298                                            | 0.387688                                       | 3.02E-05                        | 0.0018     | 0.0101      | 0.0051      |
| 100                   | 0.607                                            | 0.802698                                       | 0.000499                        | 0.0042     | 0.0228      | 0.0119      |
| 150                   | 0.947                                            | 1.31270                                        | 0.00190                         | 0.00674    | 0.0360      | 0.0196      |
| 200                   | 1.3060                                           | 1.960390                                       | 0.0038                          | 0.00886    | 0.049       | 0.0282      |

Çizelge 10.72'de görüldüğü gibi, % 64 sıkılıktaki çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 242 mm çapındaki HDPE esnek boru 200 kPa düşey yükleme altında 1.96 mm düşey ve 1.30 mm yanal yerdeğişim göstermiştir. Çizelge 10.72'de görüldüğü gibi bu yük ve deplasman altında zemin kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti,  $180^\circ$ 'de ve 0.049 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. Düşey yatay yerdeğişimi ve en büyük en küçük eğilme momentleri oranı sırasıyla 1.5 ve 12.8 okunmuştur.

#### i) 15 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

15 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.73'te görülmektedir.



Çizelge 10.73 15 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (250 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900MPa)         |
| I              | Atalet Momenti ( 8.33E-8) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 122 mm)               |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü (34.2 MPa)     |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin değişkeni olarak Howard'ın önerdiği zemin itkisi yerine, plaka yükleme deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.74'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.74 15 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |             |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|-------------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | El/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm)     |
| 50                         | 42.31             | 34.2                 | 0,084 | 0.245869227 |
| 100                        | 42.31             | 34.2                 | 0,084 | 1.229346136 |
| 150                        | 42.31             | 34.2                 | 0,084 | 1.844019204 |
| 200                        | 42.31             | 34.2                 | 0,084 | 2.458692272 |

## ii) 15 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

15 No'lu deneyin sayısal modellemesi PLAXIS 7.2 programından yararlanılarak yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.75'de gösterilmektedir.

Çizelge 10.75 15 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

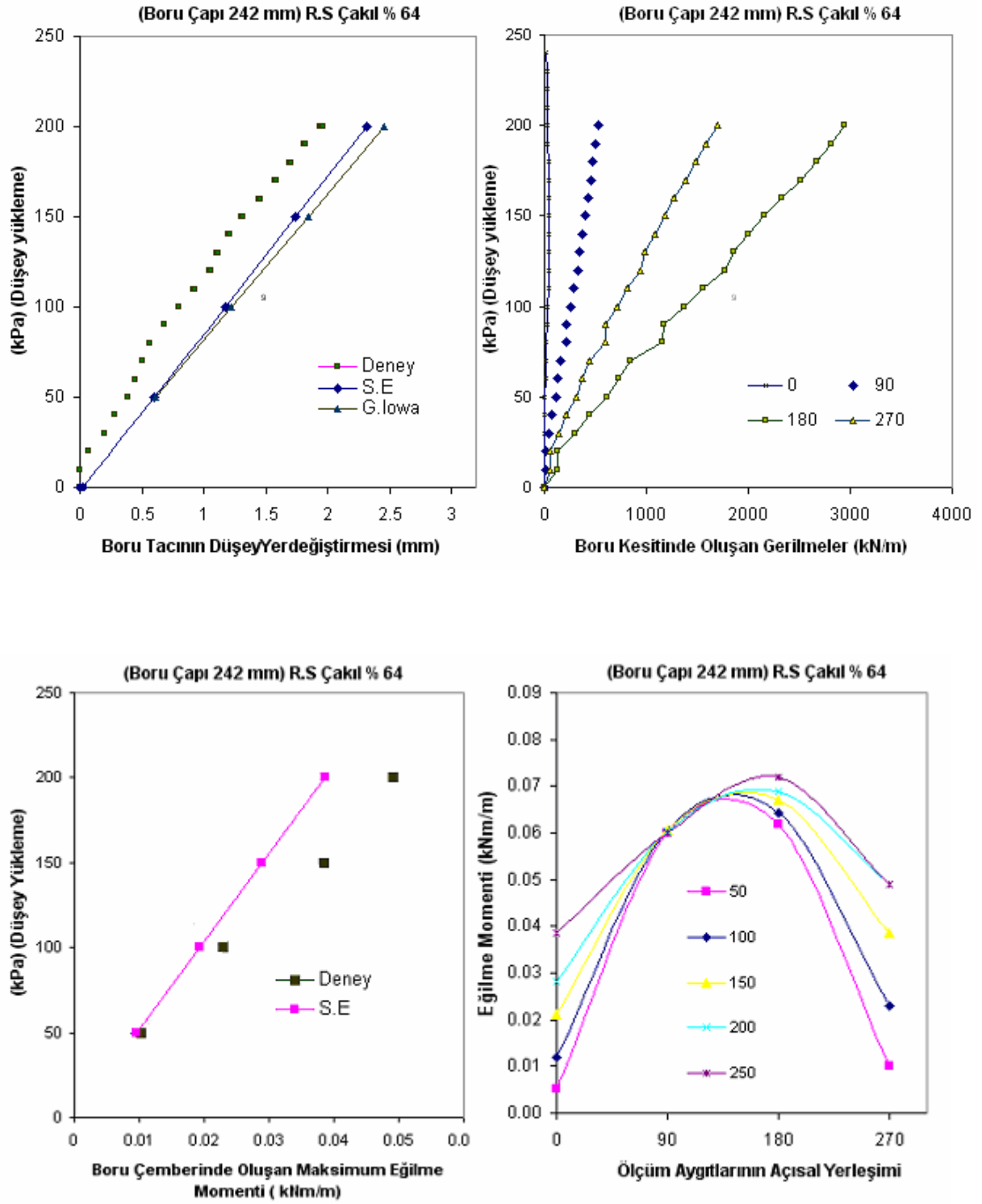
|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 37°                  | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 34.2 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.75'te verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 200 kPa düşey yük etkisinde kalan 242 mm çapındaki HDPE borunun sayısal yöntemle analizleri yapılmıştır. Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan çözümde elde edilen sonuçlar Çizelge 10.76'da görülmektedir.

Çizelge 10.76 15 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                            |                                                   |
|--------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğiştirme (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 0,24                                       | 0,0060                                            |
| 100                            | 1,17206                                    | 0,0253                                            |
| 150                            | 1,74481                                    | 0,0374                                            |
| 200                            | 2,31757                                    | 0,0496                                            |

Çizelge 10.76'da görüldüğü gibi, sayısal analizler sonucunda 15 No'lu deneyde 200 kPa yük altında 2,31 mm düşey yerdeğiştirmesi ve 0.049 kNm/m eğilme momenti ortaya çıktığı hesaplanmıştır. 15 No'lu deneyde ortaya çıkan şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları, eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.15'de görülebilir.



Şekil 10.15 15 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.2.5 16 No'lu Deney

312 mm çapındaki HDPE boru üzerinde yapılan 16 No'lu deneyde boru 15 cm yüksekliğindeki yataklama düzlemine terazilenerek yerleştirilmiştir. Düşey ve yatay deplasman ölçerler ile  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  açısall noktalarda yapıştirılan gerilme ölçerler kullanılmıştır. 16 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmış ve dolgu malzemesi hendek kutusuna % 60 göreceli sıklıkta yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 300 kPa'a (~15 m dolgu yükü) kadar düşey yük uygulanmıştır. 16 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti ölçümleri Çizelge 10.77'de görölmektedir.

Çizelge 10.77 16 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey Yükleme (kPa) | Boru Duvarının $\Delta x$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |            |             |             |
|---------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------|-------------|-------------|
|                     |                                            |                                          | $0^\circ$              | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 100                 | 1.79718                                    | 1.81268                                  | 0.0158                 | 0.00324    | 0.0116      | 0.0025      |
| 150                 | 3.35391                                    | 3.43319                                  | 0.0238                 | 0.007826   | 0.0181      | 0.0025      |
| 200                 | 4.0353                                     | 4.7541                                   | 0.0317                 | 0.010745   | 0.0245      | 0.0026      |
| 250                 | 5.20458                                    | 6.21693                                  | 0.0412                 | 0.01602    | 0.0303      | 0.003       |
| 300                 | 5.64875                                    | 7.15048                                  | 0.047                  | 0.017782   | 0.0343      | 0.0035      |

Çizelge 10.77'de göröldüğü gibi, % 60 sıklıktaki çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 312 mm çapındaki HDPE esnek boru 300 kPa yükleme altında 7.15 mm düşey 5,6 mm yatay deplasman göstermiş ve bu deplasmanlar altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti  $0^\circ$ 'de ve 0.047 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. Düşey yatay deplasman ve en büyük en küçük eğilme momentleri oranı sırasıyla 1.37 ve 13.42 olarak hesaplanmıştır.

#### i) 16 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi Analizi

16 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütölmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğı varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğistirmeler göstereceğı kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.78'te görölmektedir.

Çizelge 10.78 16 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                            |
|----------------|--------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                    |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (300 kPa)        |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)       |
| I              | Atalet Momenti (1.44E-7) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 156 mm)              |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü (17.5 MPa )   |

Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde yer alan E<sub>s</sub> zemin modülü olarak Howard'ın önerdiği zemin itiskisi değişkeni yerine, plaka yükleme deneylerinden elde edilen zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Geliştirilmiş Iowa çözümünden Çizelge 10.79'da görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 10.79 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |         |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|---------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm) |
| 50                         | 34.13             | 17.5                 | 0.083 | 1.17074 |
| 100                        | 34.13             | 17.5                 | 0.083 | 2.34149 |
| 150                        | 34.13             | 17.5                 | 0.083 | 3.51223 |
| 200                        | 34.13             | 17.5                 | 0.083 | 4.68298 |
| 250                        | 34.13             | 17.5                 | 0.083 | 5.85373 |
| 300                        | 34.13             | 17.5                 | 0.083 | 7.02447 |

## ii) 16 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

16 No'lu deneyin sayısal modellemesi PLAXIS 7.2 programından yararlanılarak yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.80'de gösterilmektedir.

Çizelge 10.80 16 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

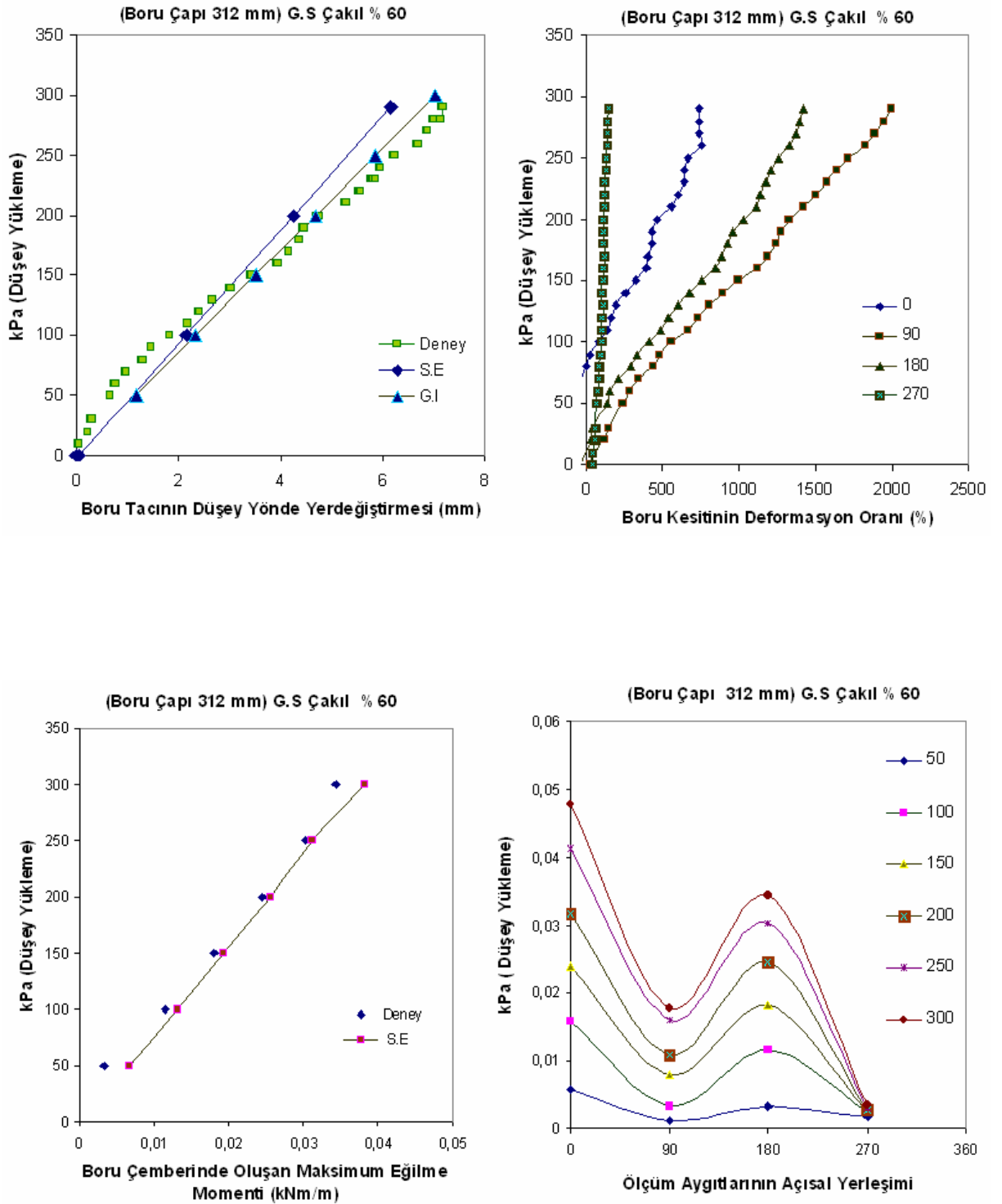
|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 4640 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                    | EI                  | 0,116 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 17.5 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.80’de verilen zemin ve boru değişkenleri kullanılarak 300 kPa düşey yük etkisinde kalan 312 mm çapındaki HDPE borunun sayısal yöntemle analizleri yapılmıştır. Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan sayısal çözümden elde edilen analiz sonuçları Çizelge 10.81’de görülmektedir.

Çizelge 10.81 16 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |                                                   |
|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 1.022                                    | 0.0067                                            |
| 100                            | 1.38                                     | 0.013                                             |
| 150                            | 1.884                                    | 0.0192                                            |
| 200                            | 1,90                                     | 0.02561                                           |
| 250                            | 2,16                                     | 0.03198                                           |
| 300                            | 3.21                                     | 0.03854                                           |

Sayısal analizler sonucunda 16 No'lu deneyde 300 kPa yük altında boru tacının 3,21 mm deplasman yaptığı bulunmuş, bu yerdeğişimleri altında boru kesitinde 0.038 kNm/m en büyük eğilme momenti ortaya çıktığı hesaplanmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların değerlendirilmesi kapsamında, şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılışları, eğilme momentlerinin karşılaştırmalı gösterimi Şekil 10.16’da olarak görülebilir.



Şekil 10.16 16 Nolu Deneyin, Deneysel ve Sayısal Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.2.6 17 No'lu Deney

312 mm çapındaki HDPE boru üzerinde yapılan 17 No'lu deneyde düşey yatay deplasman ölçerler ile  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  açısal noktalarda yerleştirilen gerilme ölçerler kullanılarak 250 kPa yük altında esnek borunun davranışı incelenmiştir. 17 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmıştır ve hendek kutusuna % 85 göreceli sıklıkta yerleştirilmiştir. 17 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.82'de görülmektedir.

Çizelge 10.82 17 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük<br>(kPa) | Boru Duvarının<br>$\Delta x$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Boru Tacının<br>$\Delta y$ Yerdeğişimi<br>(mm) | Eğilme Momentleri (kNm/m) |            |             |             |
|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------|-------------|-------------|
|                       |                                                  |                                                | $0^\circ$                 | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 50                    | 0.2939                                           | 0.271934                                       | 0.000884                  | 0,00273    | 0.002506    | 8.0E-05     |
| 100                   | 0.8086                                           | 0.855668                                       | 0.003864                  | 0.00590    | 0.00616     | 0.000294    |
| 150                   | 1.73                                             | 1.765126                                       | 0.009516                  | 0.00866    | 0.012728    | 0.00121     |
| 200                   | 2.6615                                           | 2.771308                                       | 0.015353                  | 0.01093    | 0.020915    | 0.00225     |
| 250                   | 3.182                                            | 3.207549                                       | 0.018155                  | 0.01172    | 0.024954    | 0.0026      |

% 85 sıklıktaki çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 312 mm çapındaki HDPE esnek boru 250 kPa düşey yükeleme altında 3,20 mm düşey 3,18 mm yatay yerdeğişimi göstermiş ve bu deplasman altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti  $180^\circ$ 'de ve 0.024 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. Düşey yatay deplasman ve en büyük en küçük eğilme momentleri oranı sırasıyla 1.006 ve 6.92 olarak hesaplanmıştır.

#### i) 17 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

17 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Analizlerin yürütülmesinde çembersel şekil değişimlerinin göz ardı edilebilir küçüklükte olduğu varsayılmış, yüklemeler altında boru çemberinin tam elipsoit geometride yerdeğiştirmeler göstereceği kabul edilmiştir. Bu varsayımlar çerçevesinde Geliştirilmiş Iowa Yönteminde kullanılan değişkenler Çizelge 10.83'te görülmektedir.



Çizelge 10.83 17 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                            |
|----------------|--------------------------------------------|
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                    |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (250 kPa)        |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)       |
| I              | Atalet Momenti (1.44E-7) m <sup>4</sup> /m |
| R              | Ort. Boru Yarı Çapı ( 156 mm)              |
| E <sub>s</sub> | Zeminin İkincil Young Modülü (36 Mpa)      |

17 No'lu deneyin amprik yöntemlerle çözülmesinden 250 kPa düşey yük altında boru kesitinin düşey ekseninde 2.90 mm yerdeğişim yaptığı hesaplanmıştır. Diğer yükleme adımlarındaki deplasman değerleri Çizelge 10.84'de görülebilir.

Çizelge 10.84 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |          |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|----------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm)  |
| 50                         | 34.13             | 36                   | 0.083 | 0.581166 |
| 100                        | 34.13             | 36                   | 0.083 | 1.162332 |
| 150                        | 34.13             | 36                   | 0.083 | 1.743498 |
| 200                        | 34.13             | 36                   | 0.083 | 2.324664 |
| 250                        | 34.13             | 36                   | 0.083 | 2.905831 |

## ii) 17 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

17 No'lu deneyin yükleme ve sınır koşulları dikkate alınarak PLAXIS 2D 7.2 programından yararlanılarak sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.85 te gösterilmektedir.

Çizelge 10.85 17 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

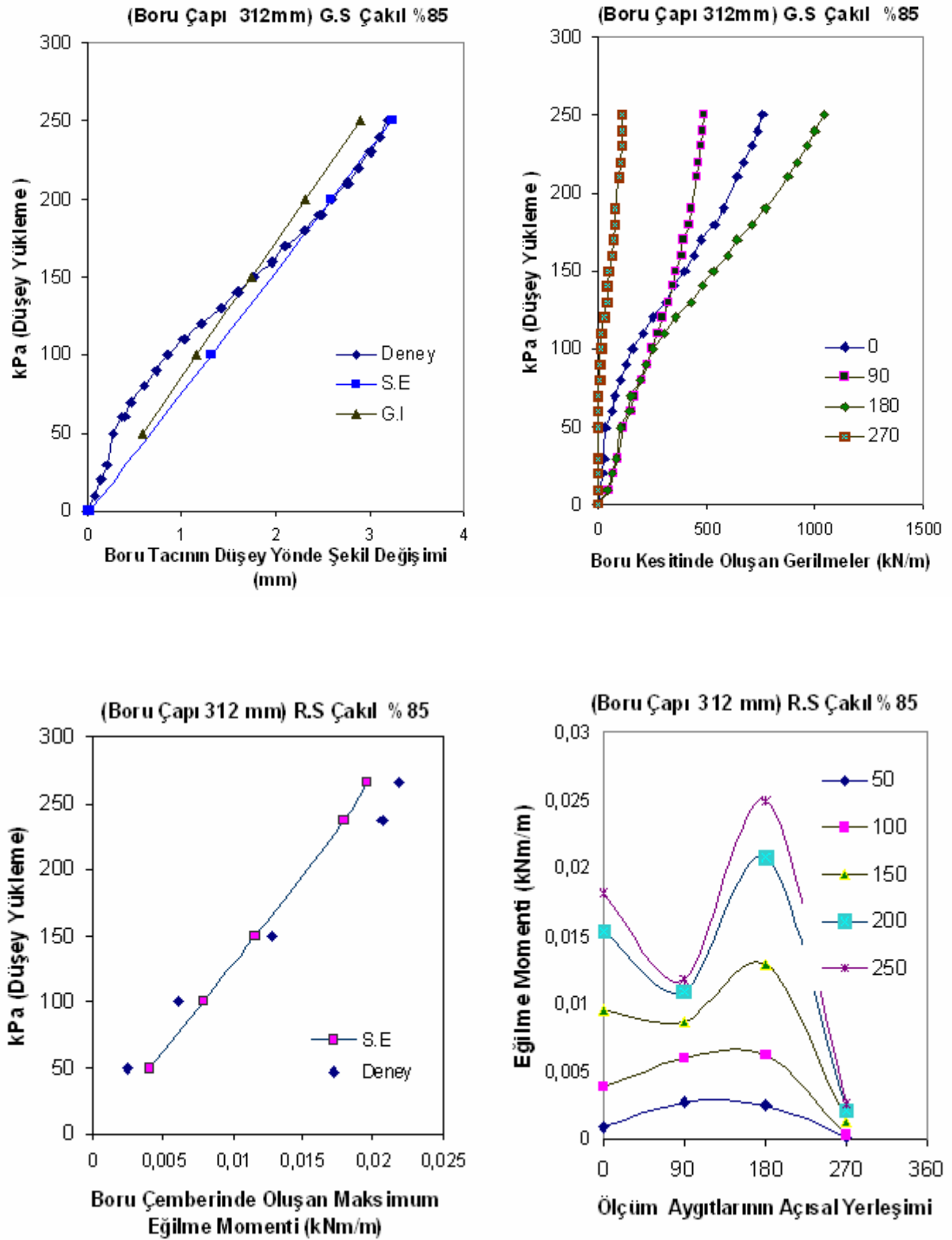
|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 18 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 4640 kN/m                 |
| $\phi$              | 42°                  | EI                  | 0,115 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 36 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Yükleme ve sınır koşulları deney modeline uygun olarak hazırlanan sayısal çözümde elde edilen analiz sonuçları Çizelge 10.86'da görülmektedir.

Çizelge 10.86 17 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |                                                       |
|--------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Düşey Yüklemeye (kPa)          | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük Eğilme Momenti (kNm/m) |
| 0                              | 0.0334324                                | 0                                                     |
| 50                             | 0.27                                     | 0.00408                                               |
| 100                            | 1.31412                                  | 0.00787                                               |
| 200                            | 2.59456                                  | 0.018                                                 |
| 250                            | 3.23478                                  | 0.0196                                                |

Sayısal analizler sonucunda 17 No'lu deneyde 300 kPa yük altında 3,23 mm düşey deplasman ve 0.019 kNm/m en büyük eğilme momenti ortaya çıkacağı hesaplanmıştır. 17 No'lu deneyde ortaya çıkan şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları ve eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.17 'de detaylı olarak görülebilir.



Şekil 10.17 17 No'lu Deneyin Deneyisel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.3 Kum Geri Dolgusunda Yapılan Yanal Yüklü Deneyler

#### 10.3.1 18 No'lu Deney

200 mm çapındaki HDPE boru üzerinde yapılan 18 No'lu deneyde yatay yerdeğişimi ölçme aygıtı ve 45°,135°,225° ve 315° açısall noktalarda yerleştirilen biçim değışimi ölçerler kullanarak 300 kPa yanal yük altındaki HDPE esnek borunun davranışı incelenmiştir.

18 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak kum kullanılmış ve hendek kutusuna % 50 göreceli sıklıkta yağmurlama sistemi kullanarak yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yan duvarlarından membran yastık kullanarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının sönümlenmesi sağlanmıştır. 18 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti büyüklükleri Çizelge 10.87'de görölmektedir.

Çizelge 10.87 18 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük (kPa) | Boru Duvarının Δx<br>Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri<br>(kNm/m) |          |          |          |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|
|                    |                                       | 45°                                                | 135°     | 225°     | 315°     |
| 50                 | 0.81734                               | 0.010862586                                        | 0.006646 | 0.008813 | 0.019777 |
| 100                | 2.30980                               | 0.02520457                                         | 0.020086 | 0.022854 | 0.033746 |
| 150                | 3.58257                               | 0.037053365                                        | 0.028661 | 0.031218 | 0.043767 |
| 200                | 4.33872                               | 0.043421008                                        | 0.032773 | 0.034488 | 0.049369 |
| 250                | 5.05589                               | 0.048761346                                        | 0.035708 | 0.037693 | 0.0539   |

% 50 sıklıktaki kum geri dolgu ortamına yerleştirilen 200 mm çapındaki HDPE esnek borunun yan duvarları 250 kPa düşey yükeleme altında 5.05 mm yerdeğişimi göstermiş, Çizelge 10.86'da görüldüğü gibi bu yük ve deplasman altında boru kesitinde oluşun eğilme momenti 315°'de ve 0.053 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır.

#### i) 18 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

18 No'lu deneyin geri dolgu, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 7.2 programında modellenmiş, ve sonlu elemanlar sayısal analizleri yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.88'de, analiz sonuçları ise Çizelge 10.89'da verilmektedir.

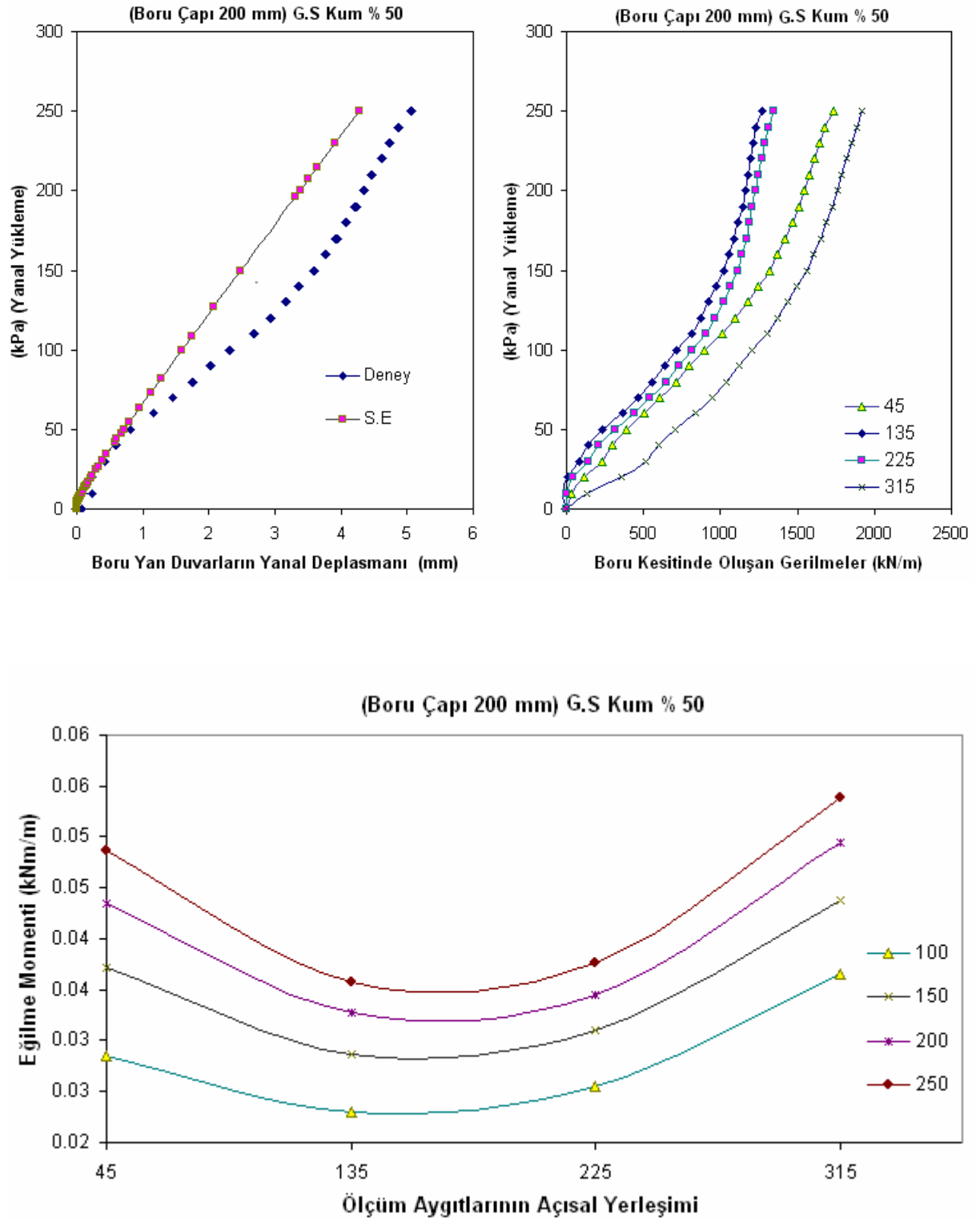
Çizelge 10.88 18 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                    | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 33°                    | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 19 MPa                 | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.89 18 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta y$ Yerdeğişimi (mm) |
| 50                             | 0.86                                     |
| 100                            | 1.76                                     |
| 150                            | 2.71                                     |
| 200                            | 3.66                                     |
| 250                            | 4.62                                     |

Sayısal analizler sonucunda 18 No'lu deneyde 250 kPa yük altında boru yan duvarlarının 4.62 mm deplasman yapacağı hesaplanmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalar ve deneysel çalışmalar sonucunda 18 No'lu deneyde ortaya çıkan şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları, eğilme momentleri Şekil 10.18'de detaylı olarak görülebilir.



Şekil 10.18 18 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.3.2 19 No'lu Deney

200 mm çapındaki HDPE boru üzerinde yapılan 19 No'lu deneyde yatay yerdeğişimi ölçme aygıtı ve  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ve  $270^\circ$  açısal noktalarda yerleştirilen şekil değişimi ölçerler kullanılarak 250 kPa yanal yük altındaki HDPE esnek borunun şekil değişime davranışı incelenmiştir. 19 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak kum kullanılmış ve hendek kutusuna % 55 göreceli sıklıkta yağmurlama sistemi kullanılarak kontrollü yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yan duvarlarından membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. 19 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti büyüklükleri Çizelge 10.90'da görülmektedir.

Çizelge 10.90 19 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük (kPa) | Boru Duvarının $\Delta x$<br>Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |            |             |             |
|--------------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------|-------------|-------------|
|                    |                                               | $0^\circ$              | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 50                 | 0.32                                          | 0.01551                | 0.020555   | 0.00916     | 0.011725    |
| 100                | 1.29                                          | 0.03192                | 0.038987   | 0.01914     | 0.021961    |
| 150                | 2.78                                          | 0.05608                | 0.064082   | 0.03366     | 0.038837    |
| 200                | 3.26                                          | 0.06547                | 0.074216   | 0.03893     | 0.04598     |
| 250                | 4.36                                          | 0.07135                | 0.08193    | 0.04343     | 0.051221    |

Çizelge 10.910'da görüldüğü gibi, % 55 sıklıktaki kum geri dolgu ortamına yerleştirilen 200 mm çapındaki HDPE esnek boru 250 kPa yanal yükeleme altında 4.36 mm yerdeğişim göstermiştir. Çizelge 10.89'da görüldüğü gibi bu yük ve deplasman altında zemin kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti  $90^\circ$ 'de ve 0.081 kNm/m mertebesinde oluşmuştur. En büyük ve en küçük eğilme momentlerinin birbirlerine göre oranı 1.58 mertebelerinde ortaya çıkmıştır.

#### i) 19 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

19 No'lu deneyin geri dolgu özellikleri, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 7.2 programında modellenmiş, ve analizleri yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.92'de, analiz sonuçları ise Çizelge 10.93'te verilmektedir.

Çizelge 10.92 19 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

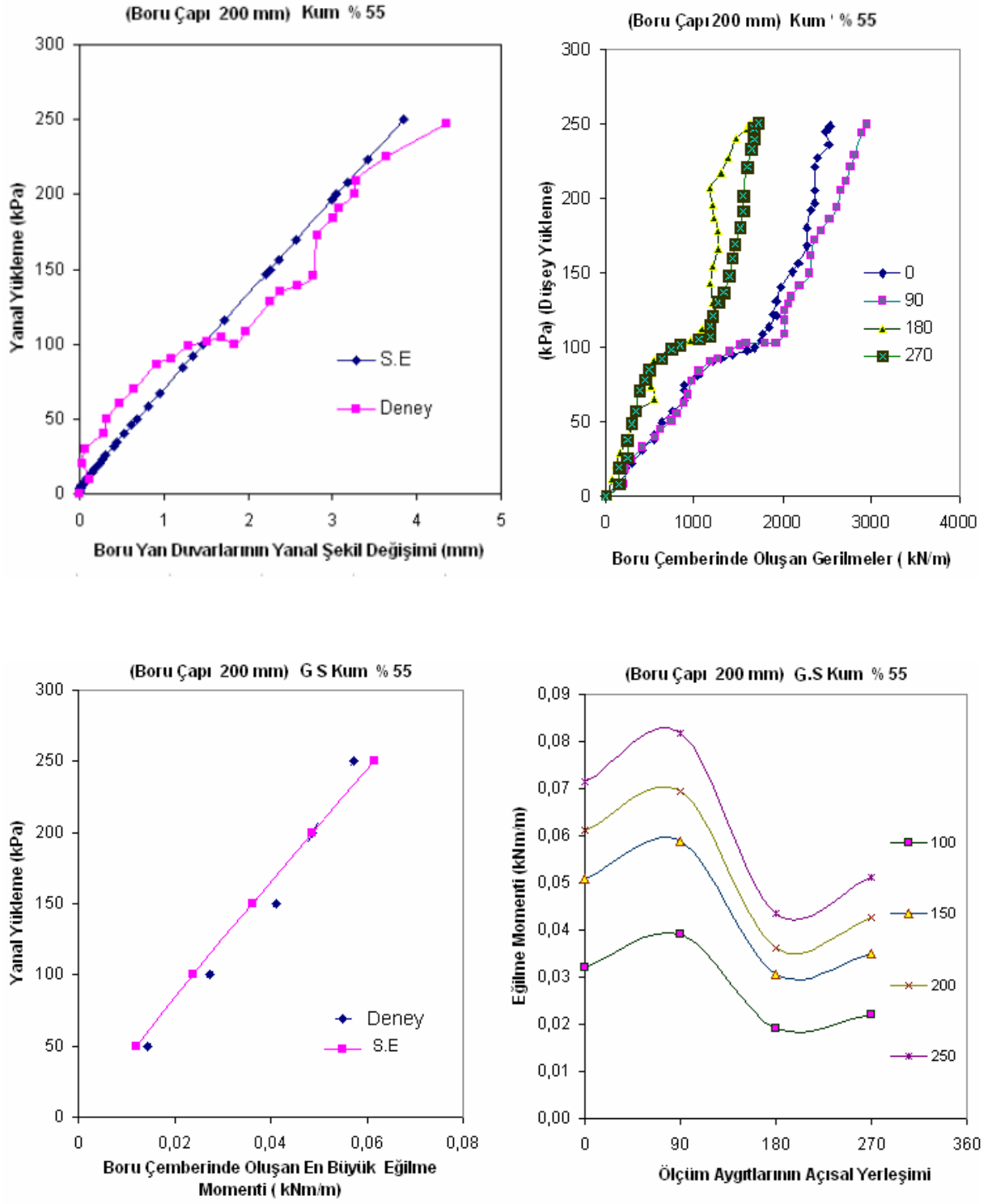
|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                    | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                    | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 19 MPa                 | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.93 19 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                               |                                |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| Düşey Yükleme<br>(kPa)         | Boru Duvarının $\Delta x$<br>Yerdeğişimi (mm) | En Büyük<br>Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                             | 0.684735                                      | 0.0120                         |
| 100                            | 1.46826                                       | 0.0240                         |
| 150                            | 2.25856                                       | 0.0363                         |
| 200                            | 3.05207                                       | 0.0486                         |
| 250                            | 3.84439                                       | 0.0616                         |

Çizelge 10.93'de görüldüğü gibi, sayısal analizler sonucunda 19 No'lu deneyde 200 mm çapındaki esnek boruda 250 kPa yanal yük etkisinde 3,84 mm deplasman ve 0.0616 kNm/m en büyük eğilme momenti ortaya koyacağı hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda 19 No'lu deneyde ortaya çıkan şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları ve eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.19'de görülebilir.





Şekil 10.19 19 Nolu Deneyin Deneyel ve Sayısal Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.3.3 20 No'lu Deney

20 No'lu deneyde 242 mm çapındaki HDPE borunun 100 Kpa yanal yük altında gösterdiği davranış incelenmiştir. Bu amaçla yatay ekseninde yerleştirilen yatay deplasman ölçer ve 45°,135°,225°,315° açısall noktalarda yerleştirilen şekil değışimi ölçerler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak kum kullanılmış ve hendek kutusuna % 55 göreceli sıkılıkta yağmurlama sistemi kullanılarak yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yan duvarlarından membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 100 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. Elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti büyüklükleri Çizelge 10.94'de görölmektedir.

Çizelge 10.94 20 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük (kPa) | Boru DuvarınınΔx<br>Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |          |          |         |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------|----------|----------|---------|
|                    |                                      | 45°                    | 135°     | 225°     | 315°    |
| 20                 | 0.154375                             | 0.009392               | 0.00178  | 2.42E-05 | 0.00667 |
| 40                 | 0.346633                             | 0.025652               | 0.00038  | 0.00085  | 0.0136  |
| 50                 | 0.544068                             | 0.039926               | 0.000941 | 0.00252  | 0.01916 |
| 70                 | 1.034501                             | 0.056581               | 0.000183 | 0.00667  | 0.03009 |
| 80                 | 1.353033                             | 0.056581               | 0.0012   | 0.00927  | 0.03684 |
| 100                | 1.700033                             | 0.056581               | 0.00708  | 0.01118  | 0.04571 |

Çizelge 10.954'de göröldüğü gibi, % 55 sıkılıktaki kum geri dolgu ortamına yerleştirilen 200 mm çapındaki HDPE esnek boru 100 kPa yanal yükeleme altında 1.7 mm yanal yerdeğişim göstermiştir. Çizelge 10.92'de göröldüğü gibi bu yük ve deplasman altında borunun omuz kesitlerinde (45° -135°) 0.056, 0.0078 kNm/m eğilme momenti oluşurken, borunun bel kesimlerinde (225° - 315°) 0.011,0.045 kNm/m büyüklüklerinde eğilme momentleri oluşmuştur. En büyük ve en küçük eğilme momentlerinin birbirlerine göre oranı 7.17 mertebelerinde ortaya çıkmıştır.

#### i) 20 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

20 No'lu deneyin geri dolgu özellikleri, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 2D 7.2 programında modellenmiş, ve sayısal analizleri yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.96'da, verilmektedir.

Çizelge 10.96 20 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

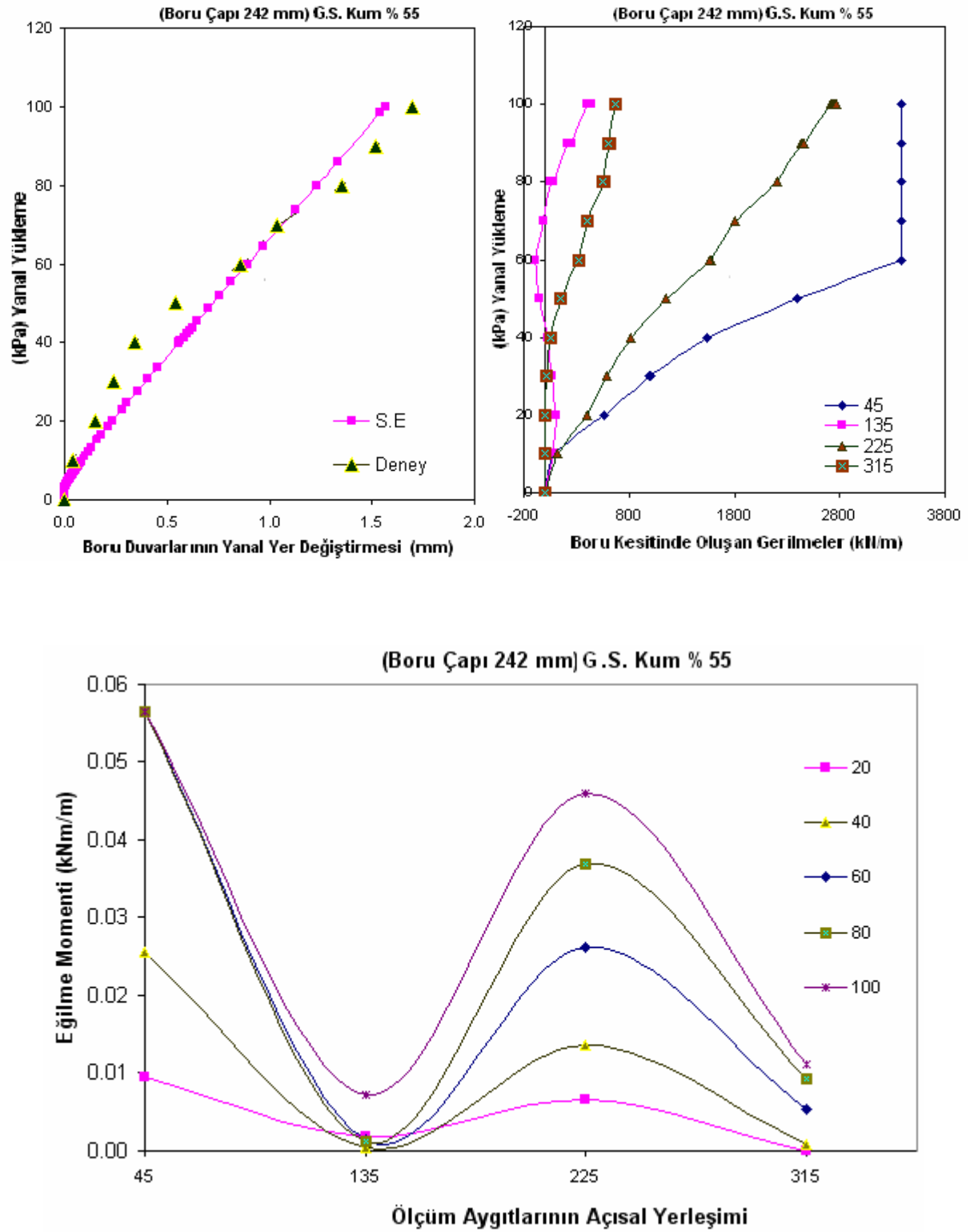
|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                    | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                    | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 19.MPa                 | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Sayısal anazliler sonucunda 20 No'lu deneyde 200mm çapındakik esnek boruda 100 kPa yanal yük etkisinde 1.56 mm deplasman ortaya koyduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 10.97 20 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Tacının $\Delta x$ Yerdeğişimi (mm) |
| 20                             | 0.233773                                 |
| 40                             | 0.55502                                  |
| 60                             | 0.890035                                 |
| 80                             | 1.22814                                  |
| 100                            | 1.56902                                  |

Deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda 20 No'lu deneyde ortaya çıkan Şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılışı ve eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.20'de görülebilir.



Şekil 10.20 20 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.3.4 21 No'lu Deney

21 No'lu deneyde 312 mm çapındaki HDPE borunun 100 Kpa yanal yük altında gösterdiği davranış incelenmiştir. Bu amaçla yatay ekseninde yerleştirilen düşey yanal deplasman ölçerler ve 45°,135°,225°,315° açısıl noktalarda yerleştirilen şekil değişimi ölçerler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak kum kullanılmış ve hendek kutusuna % 60 göreceli sıkılıkta yağmurlama sistemi kullanılarak yerleştirilmiştir. Boru ve dolgunun yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yan yüzeylerinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 100 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. 21 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.98'de görülmektedir.

Çizelge 10.98 21 No'lu Deney Sonuçları

| Yanal Yükleme<br>(kPa) | Boru Duvarının $\Delta x$<br>Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |          |         |          |
|------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|----------|---------|----------|
|                        |                                               | 45°                    | 135°     | 225°    | 315°     |
| 20                     | 0.16258                                       | 0.00911                | 0.012153 | 0.00492 | 0.001557 |
| 40                     | 0.62532                                       | 0.02902                | 0.039676 | 0.01962 | 0.010168 |
| 60                     | 1.36741                                       | 0.05522                | 0.081081 | 0.03995 | 0.027687 |
| 80                     | 1.82135                                       | 0.07163                | 0.08152  | 0.04854 | 0.039605 |
| 100                    | 1.82936                                       | 0.07598                | 0.08152  | 0.05055 | 0.043596 |

% 60 sıkılıktaki kum geri dolgu ortamına yerleştirilen 312 mm çapındaki HDPE esnek borunun duvarları 100 kPa yanal yükleme altında 1.82 mm yanal deplasman göstermiş ve bu deplasman altında zemin kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti 135°'de ve 0.081 kNm/m mertebesinde ortaya çıkmıştır. En büyük ve en küçük eğilme momentlerinin birbirlerine göre oranı 1.88 mertebelerinde ortaya çıkmıştır.

#### i) 21 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

21 No'lu deneyin geri dolgu özellikleri, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 2D 7.2 programında modellenmiş, ve sayısal analizleri yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.99 da, analiz sonuçları ise Çizelge 10.100' da verilmektedir.

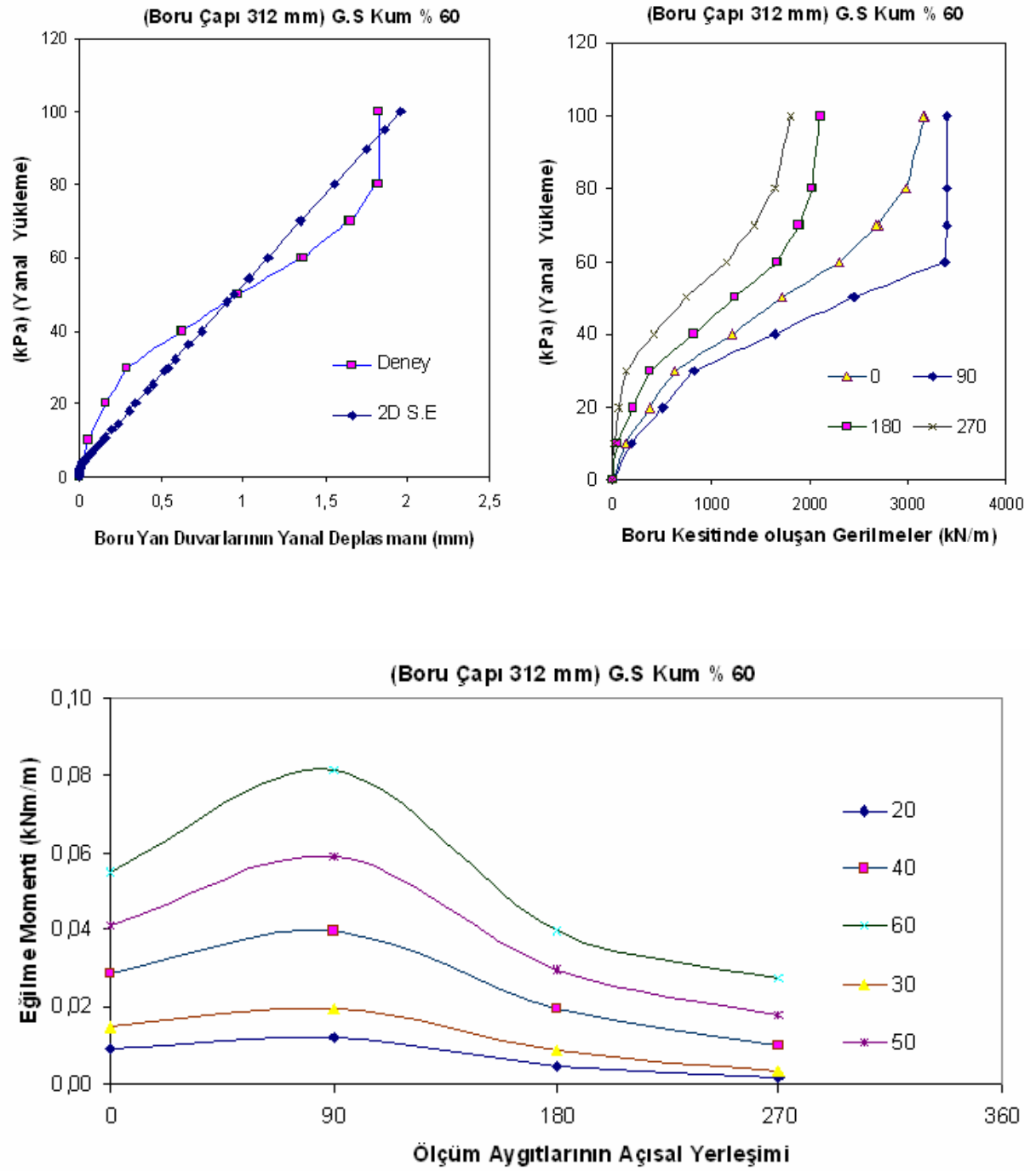
Çizelge 10.99 21 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Değişkenleri

|                     |                        |                     |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                    | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 16.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                    | EI                  | 0.126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 19 MPa                 | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.100 21 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                                    |
|--------------------------------|----------------------------------------------------|
| Yanal Yükleme (kPa)            | Boru Tacının ( $\Delta y$ ) Yanal Yerdeğişimi (mm) |
| 20                             | 0.34                                               |
| 40                             | 0.74                                               |
| 60                             | 1.15                                               |
| 80                             | 1.55                                               |
| 100                            | 1.96                                               |

Sayısal analizler sonucunda 21 No'lu deneyde 100 kPa yanal yük altında 1.96 mm deplasman göstereceği hesaplanmıştır. Deneyde ortaya çıkan Şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılışı, eğilme momentleri Şekil 10.21'de detaylı olarak görülebilir.



Şekil 10.21 21 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

## 10.4 Çakıl Geri Dolgusunda Yapılan Yanal Yüklü Deneyler

### 10.4.1 22 No'lu Deney

22 No'lu deneyde 200 mm çapındaki HDPE borunun 250 Kpa yanal yük altında gösterdiği davranış incelenmiştir. Bu amaçla yatay ekseninde yerleştirilen yanal deplasman ölçerler ve  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  açısal noktalarda yerleştirilen biçim değişimi ölçerler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmış ve hendek kutusuna % 87 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiştir. Boru ve geri dolgu malzemelerinin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 250 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. 22 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.101'de görülmektedir.

Çizelge 10.101 22 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük (kPa) | Boru Duvarının $\Delta x$<br>Yerdeğişimi (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |            |             |             |
|--------------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------|-------------|-------------|
|                    |                                               | $0^\circ$              | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
| 50                 | 0,025527                                      | 0,008019               | 0,006259   | 0,00034     | 0,006289    |
| 100                | 0,005651                                      | 0,014412               | 0,010048   | 0,0051      | 0,010887    |
| 150                | 0,31118                                       | 0,017258               | 0,011328   | 0,011896    | 0,013275    |
| 200                | 0,618391                                      | 0,018423               | 0,012641   | 0,018664    | 0,014823    |
| 250                | 0,897489                                      | 0,019176               | 0,014641   | 0,025605    | 0,016373    |

Çizelge 10.101'de görüldüğü gibi % 87 sıkılıktaki çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 200 mm çapındaki HDPE esnek boru, 250 kPa yanal yükeleme altında 0.87 mm yerdeğişim göstermiştir. Bu yük ve deplasman altında boru kesitinde oluşan en büyük eğilme momenti  $180^\circ$ 'de ve 0.025 kNm/m mertebesinde saptanmıştır.

#### i) 22 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

22 No'lu deneyin geri dolgu özellikleri, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 2D 7.2 programında modellenmiş, ve sayısal analizleri yapılmıştır. Analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.102'de, analiz sonuçları ise Çizelge 10.103'de verilmektedir.



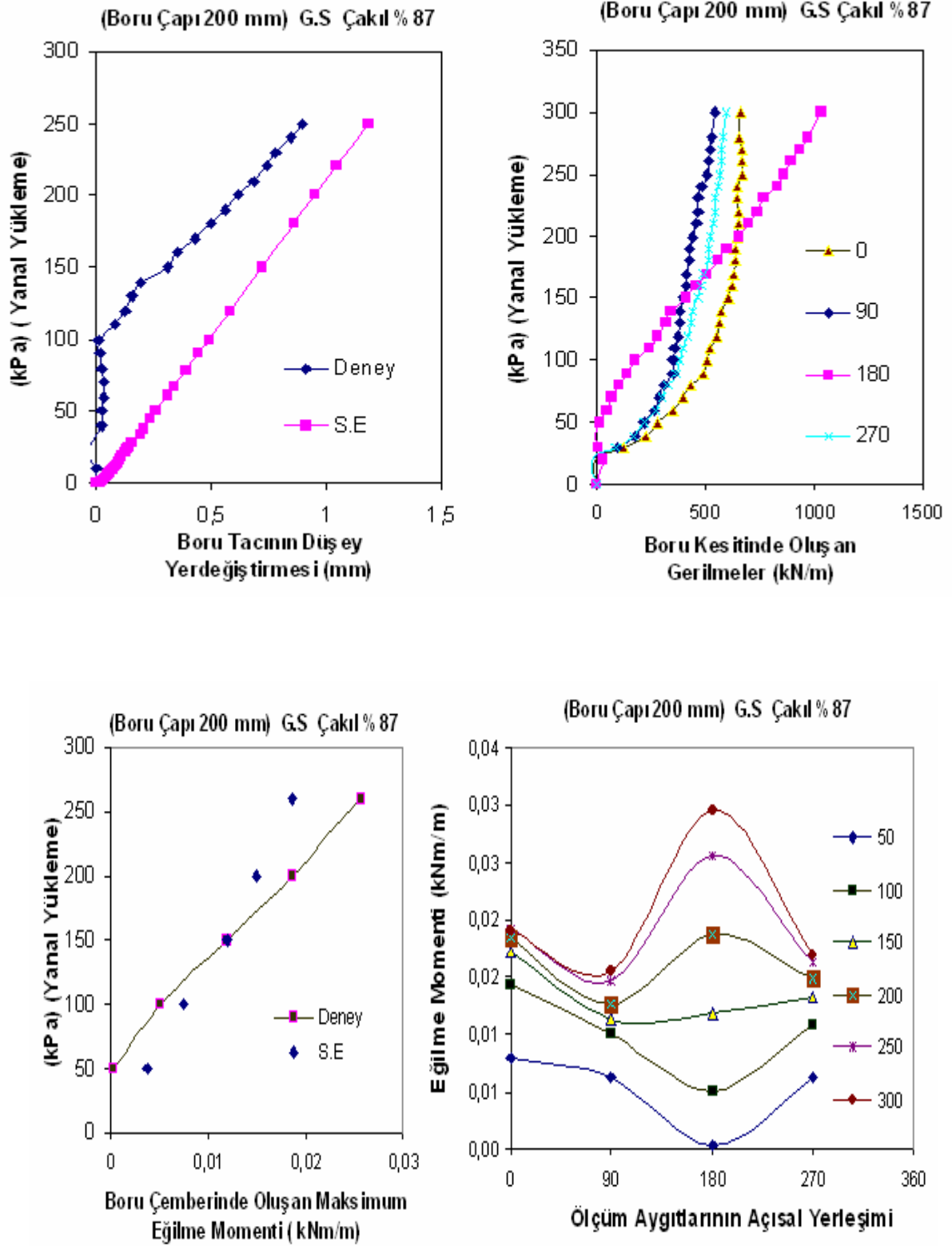
Çizelge 10.102 22 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 18 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 37°                  | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 35 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.103 22 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                               |                                                      |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Düşey Yükleme<br>(kPa)          | Boru Duvarının<br>$\Delta x$ Yerdeğişimi (mm) | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Mom (kNm/m) |
| 50                              | 0,259                                         | 0,0038                                               |
| 100                             | 0,490                                         | 0,0075                                               |
| 150                             | 0,721                                         | 0,0119                                               |
| 200                             | 0,951                                         | 0,0149                                               |
| 250                             | 1,182                                         | 0,0186                                               |

Sayısal analizler sonucunda 22 No'lu deneyde 250 kPa yanal yük altında 3,84 mm yerdeğişim ve 0.0616 kNm/m eğilme momenti ortaya çıkacağı hesaplanmıştır. Yürütülen deneysel ve sayısal çalışmalardan saptanan şekil değışimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılışı ve eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değlendirmesi şekil 10.22'de görölmektedir.



şekil 10.22 22 No'lu Deneyin DeneySEL ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 10.4.2 23 No'lu Deney

23 No'lu Deney 242 mm çaplı HDPE boru üzerinde ve % 70 sıklıkta yerleştirilen çakıl geri dolgusu ortamında yapılmıştır. Boru davranışını saptayabilmek için gerilme ölçerler boru çember kesitine 45°,135°,225° ve 315° açılarında yapıştırılmıştır. Hendek yüzeyinden membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 100 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. 23 No'lu deneyden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.104 'de görülmektedir.

Çizelge 10.104 23 No'lu Deney Sonuçları

| Düşey<br>Yük<br>(kPa) | Boru Duvarının<br>Yerdeğişimi<br>$\Delta x$ (mm) | Boru Tacının<br>Yerdeğişimi<br>$\Delta y$ (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |         |         |          |
|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|---------|---------|----------|
|                       |                                                  |                                                | 45°                    | 135°    | 225°    | 315°     |
| 20                    | 0.023679                                         | 0.057304                                       | 0.003636               | 0.00125 | 0.00487 | 0.000443 |
| 40                    | 0.095588                                         | 0.231266                                       | 0.024496               | 0.00035 | 0.01296 | 0.000694 |
| 60                    | 0.227442                                         | 0.54795                                        | 0.055404               | 0.00244 | 0.01972 | 0.000609 |
| 80                    | 0.356952                                         | 0.858401                                       | 0.05675                | 0.0056  | 0.02626 | 0.000526 |
| 100                   | 0.413774                                         | 0.995182                                       | 0.05675                | 0.00814 | 0.02873 | 0.000614 |

Çizelge 10.104'de görüldüğü gibi % 70 sıklıktaki çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 242 mm çapındaki HDPE esnek boru 100 kPa yanal yükleme altında 1 mm yatay eksen ve 0.4 mm düşey eksen deplasman göstermiştir. Bu yükleme ve deplasman altında boru omuzlarında sırasıyla (45°-135°) 0.056, 0.0018 kNm/m, boru belinde ise (225°-315°) 0.028, 0.000614 kNm/m eğilme momentleri oluşmuştur.

#### i) 23 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

23 No'lu deneyin geri dolgu özellikleri, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 2D 7.2 programında modellenmiş ve sonlu elemanlar sayısal analizleri yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.105'de, analiz sonuçları ise Çizelge 10.106'da verilmektedir.

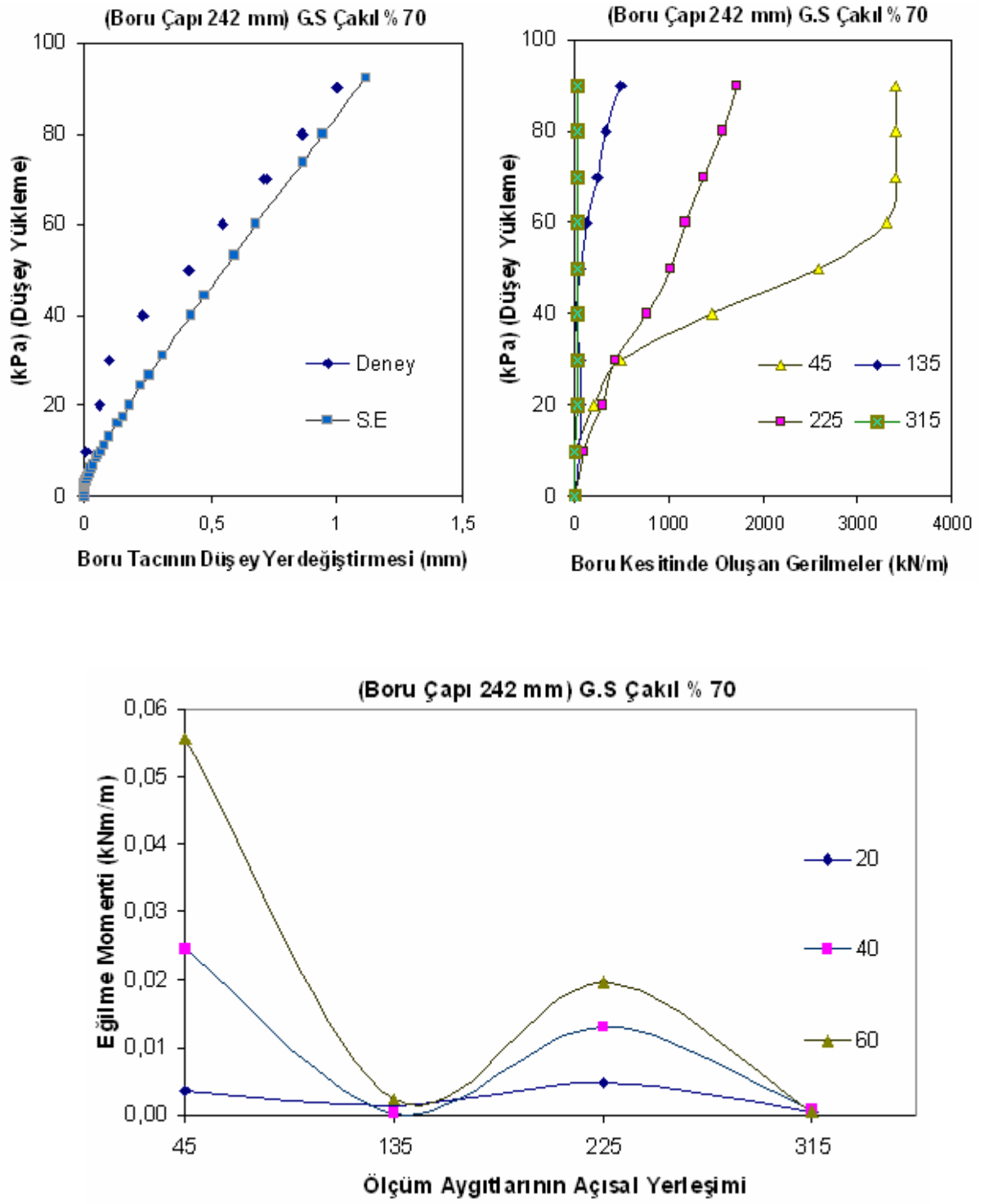
Çizelge 10.105 23 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 18 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 37°                  | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 31 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.106 23 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi |                                              |                             |
|--------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)            | Boru Duvarının $\Delta x$ Yerdeğiştirme (mm) | En Büyük Eğilme Mom (kNm/m) |
| 1                              | 10                                           | 0.0641644                   |
| 2                              | 20                                           | 0.176055                    |
| 3                              | 40                                           | 0.420676                    |
| 4                              | 60                                           | 0.681953                    |
| 5                              | 80                                           | 0.947074                    |
| 6                              | 100                                          | 1.21701                     |

Sayısal analizler sonucunda 23 No'lu deneyde 100 kPa yük altında 1.21 mm yanal deplasman ortaya çıkacağı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında, 23 No'lu deneyde ortaya çıkan şekil değişimleri, boru çemberinde oluşan gerilme dağılımları, eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.23'de detaylı olarak görülebilir.



Şekil 10.23 23 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.4.3 24 No'lu Deney

312 mm HDPE boru üzerinde yapılan 24 No'lu deneyde boru 15 cm yüksekliğindeki yataklama seviyesi düzleminde yerleştirilmiştir. Gerilme ölçerlerin boru kesitine 0°,90°,180°, ve 270° açılarda yapıştırılan 24 No'lu deneysel çalışmada, geri dolgu malzemesi olarak çakıl kullanılmıştır. Dolgu malzemesi hendek kutusuna % 72 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiştir. Boru ve çakıl malzemelerinin yerleştirmesi tamamlandıktan sonra hendek kenar duvarından membran yastık kullanılarak, 10 kPa'lık artış adımlarında 150 kPa'a kadar yanal yük uygulanmıştır. Her yükleme adımında 2'şer dakika beklenerek, hendek kesiti içerisinde gerilme dağılışının tamamlanması sağlanmıştır. 24 No'lu deneyden elde edilen yerdeğişimi ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.107'de görülmektedir.

Çizelge 10.107 24 No'lu Deney Sonuçları

| Y. Yükleme<br>Kpa | Boru Tacının<br>Düşey Yer (mm) | Boru Duvarının<br>Yanal Yerd (mm) | Eğilme Momenti (kNm/m) |         |          |         |
|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------|----------|---------|
|                   |                                |                                   | 0                      | 90      | 180      | 270     |
| 30                | 0.313911                       | 0.42651                           | 0.00397                | 0.01898 | 0.029893 | 0.01097 |
| 60                | 1.021207                       | 1.38751                           | 0.013944               | 0.04203 | 0.056003 | 0.01831 |
| 90                | 1.367113                       | 1.85749                           | 0.021766               | 0.05926 | 0.078769 | 0.02205 |
| 120               | 2.051158                       | 2.7869                            | 0.028964               | 0.07457 | -        | 0.02462 |
| 130               | 2.541717                       | 3.45342                           | 0.030723               | 0.07763 | -        | 0.02519 |
| 150               | 2.535829                       | 3.4542                            | 0.033734               | 0.08114 | -        | 0.0259  |

% 70 sıkılıktaki çakıl geri dolgu ortamına yerleştirilen 312 mm çapındaki HDPE esnek boru 150 kPa yanal yükleme altında 3.45 mm yanal, 2.53 mm düşey deplasman göstermiştir.

#### i) 24 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

24 No'lu deneyin geri dolgu özellikleri, boru ve yükleme koşulları PLAXIS 7.2 programında modellenmiş, ve sayısal analizleri yapılmıştır. Sayısal analizde kullanılan zemin ve boru malzemelerinin mühendislik özellikleri Çizelge 10.108'da, analiz sonuçları ise Çizelge 10.109'da verilmektedir.

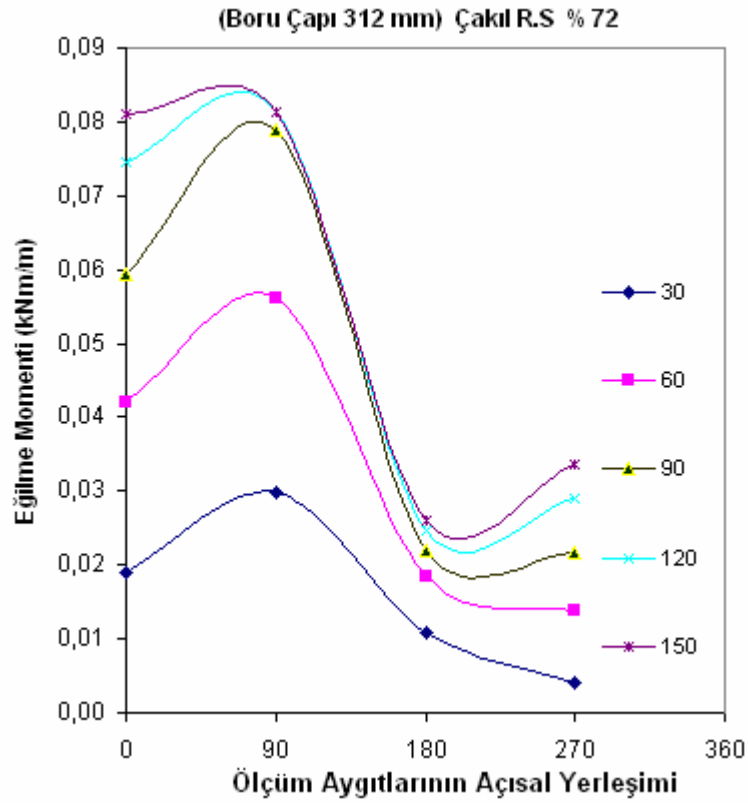
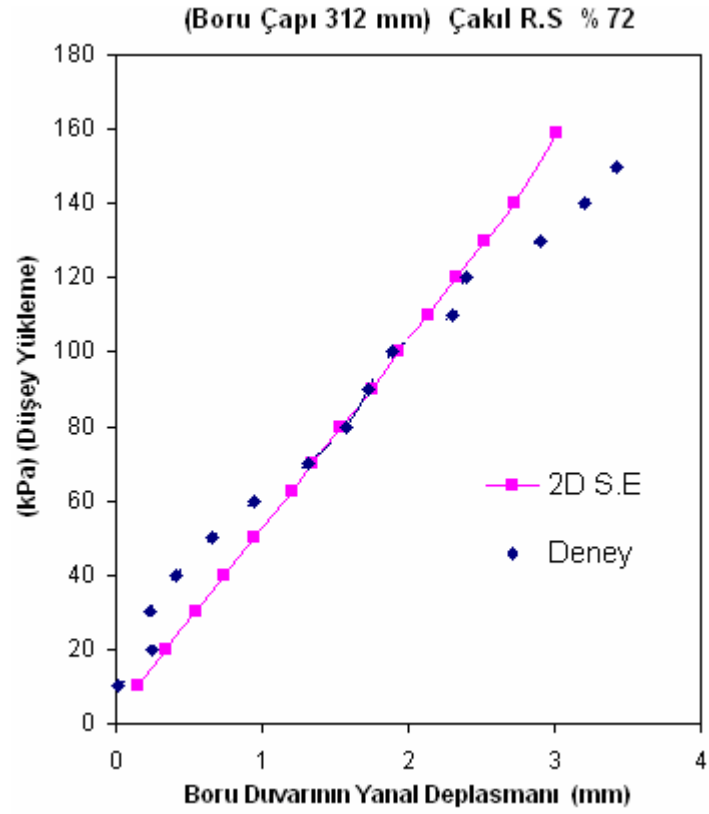
Çizelge 10.108 24 No'lu Deneyin Sayısal Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 18 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 4640 kN/m                 |
| $\phi$              | 37°                  | EI                  | 0,115 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 31 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.109 24 No'lu Deneyin Sayısal Analizinden Elde Edilen Sonuçlar

| Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi |                                           |
|---------------------------------|-------------------------------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)             | Boru Duvarının $\Delta x$ Deplasmanı (mm) |
| 50                              | 0.66                                      |
| 100                             | 1.89                                      |
| 150                             | 3.42                                      |

Sayısal analizler sonucunda 24 No'lu deneyde 150 kPa yanal yük altında 3,42 mm deplasman olduğu hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında 24 No'lu deneysel verilerden ve sayısal analizlerden elde edilen şekil değişimleri, ve eğilme momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi Şekil 10.24'de görülmektedir.



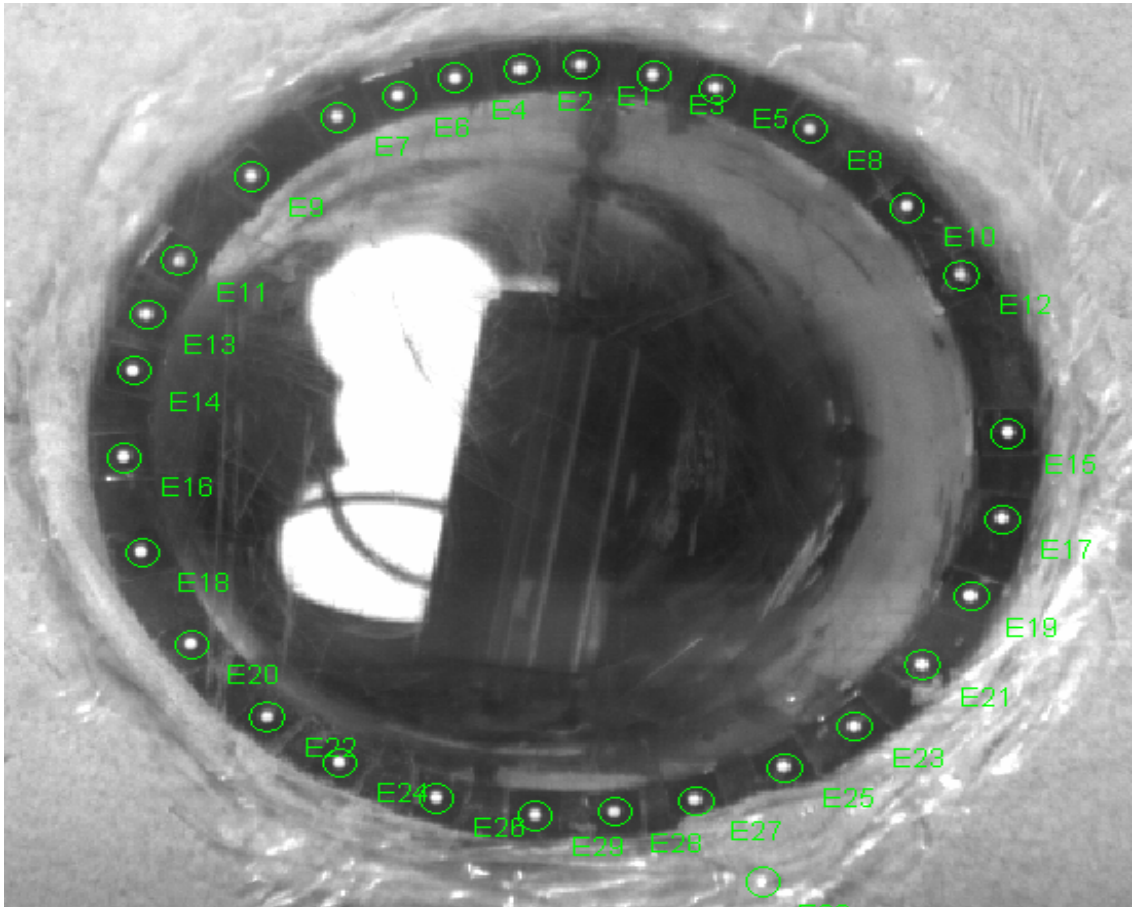
Şekil 10.24 24 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması



## 10.5 FOTOREMETRİK ÖLÇÜMLER

### 10.5.1 25 No'lu Deney

25 No'lu deneyde, 200 mm çapındaki borunun % 60 sıklıktaki bir kum geri dolgusunda ve 110 kPa düşey yükleme altındaki davranışı, standart deney aygıtları ile beraber fotogremetrik yöntemleler de kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla incelenen borunun ön yüzüne Şekil 10.25' de görüldüğü gibi numaralandırılması yapılan 29 farklı eşlenik nokta yapıştırılmıştır. Model hendek kutusunun pleksigalas şeffaf yüzünden görülebilecek bu noktalara aynı düzlemde ve üç farklı açıda yerleştirilen yüksek çözünürlüklü kamera mercekleri odaklanmıştır. Deney süresince bu kameralar eşlenik noktaların  $X,Y$  ve  $Z$  eksenlerindeki deplasmanlarını görüntüleyerek kaydetmiş ve veriler üzerinde uygulanan algoritmik hesaplamalar ile yaklaşık % 2-5 incelikte üç boyutlu şekil değişimleri belirlenmiştir. Değerlendirme kapsamında boru kesitinin omuzlarına ( $45^\circ, 135^\circ$ ) ve bel bölgelerine ( $225^\circ, 315^\circ$ ) denk gelen E8,E9,E23 ve E22 noktalarının düşey deplasmanları hesaplanmıştır. Çizelge 10.110-10.114'de bu noktaların düşey yönde gösterdikleri deplasman büyüklükleri görülmektedir.



Şekil 10.25 25 No'lu Deneyde Kullanılan Eşlenik Noktaların Dağılımı

Çizelge 10.110 25 No'lu Deneyde E8 Noktasının Düşey Yerdeğişimi

| E8 Noktasının Fotogrametrik Yöntemle Düşey Yerdeğişimi Ölçümü (45°) |                                |                                    |                       |                               |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Yükleme<br>(kPa)                                                    | E8 Nok. Göreceli<br>Deplasmanı | Yatak Seviyesi<br>Deplasmanı (E29) | E8 Nok.<br>Deplasmanı | Düzeltilmiş<br>Deplasman (mm) |
| 10                                                                  | 187.5925                       | 18.0251                            | 169.5674              | 0.051                         |
| 30                                                                  | 187.0883                       | 17.5946                            | 169.4937              | 0.1247                        |
| 50                                                                  | 186.2741                       | 16.958                             | 169.3161              | 0.3023                        |
| 70                                                                  | 185.4723                       | 16.3273                            | 169.145               | 0.4734                        |
| 110                                                                 | 184.1088                       | 15.3514                            | 168.7574              | 0.861                         |

Çizelge 10.111 25 No'lu Deneyde E2 Noktasının Düşey Yerdeğişimi

| E2 Noktasının Fotogrametrik Yöntemle Düşey Yerdeğişimi Ölçümü (90°) |                                |                                    |                       |                               |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Yükleme<br>(kPa)                                                    | E2 Nok. Göreceli<br>Deplasmanı | Yatak Seviyesi<br>Deplasmanı (E29) | E2 Nok.<br>Deplasmanı | Düzeltilmiş<br>Deplasman (mm) |
| 10                                                                  | 201.9879                       | 18.0251                            | 183.9628              | 0.0956                        |
| 30                                                                  | 201.4513                       | 17.5946                            | 183.8567              | 0.2017                        |
| 50                                                                  | 200.6339                       | 16.958                             | 183.6759              | 0.3825                        |
| 70                                                                  | 199.7833                       | 16.3273                            | 183.456               | 0.6024                        |
| 110                                                                 | 198.2908                       | 15.3514                            | 182.9394              | 1.119                         |

Çizelge 10.112 25 No'lu Deneyde E9 Noktasının Düşey Yerdeğişimi

| E9 Noktasının Fotogrametrik Yöntemle Düşey Yerdeğişimi Ölçümü (135°) |                                |                                    |                       |                               |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Yükleme<br>(kPa)                                                     | E9 Nok. Göreceli<br>Deplasmanı | Yatak Seviyesi<br>Deplasmanı (E29) | E9 Nok.<br>Deplasmanı | Düzeltilmiş<br>Deplasman (mm) |
| 10                                                                   | 175.2369                       | 18.0251                            | 157.2118              | 0.0583                        |
| 30                                                                   | 174.7795                       | 17.5946                            | 157.1849              | 0.0852                        |
| 50                                                                   | 174.0631                       | 16.958                             | 157.1051              | 0.165                         |
| 70                                                                   | 173.2728                       | 16.3273                            | 156.9455              | 0.3246                        |
| 110                                                                  | 171.9618                       | 15.3514                            | 156.6104              | 0.6597                        |

Çizelge 10.113 25 No'lu Deneyde E20 Noktasının Düşey Yerdeğişimi

| E20 Noktasının Fotogrametrik Yöntemle Düşey Yerdeğişimi Ölçümü (225°) |                              |                                 |                     |                            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Yükleme (kPa)                                                         | E20 Nok. Göreceli Deplasmanı | Yatak Seviyesi Deplasmanı (E29) | E20 Nok. Deplasmanı | Düzeltilmiş Deplasman (mm) |
| 30                                                                    | 59.7133                      | 17.5946                         | 42.1187             | 0.048                      |
| 50                                                                    | 58.997                       | 16.958                          | 42.039              | 0.1277                     |
| 70                                                                    | 58.3033                      | 16.3273                         | 41.976              | 0.1907                     |
| 110                                                                   | 57.1208                      | 15.3514                         | 41.7694             | 0.3973                     |

Çizelge 10.114 25 No'lu Deneyde E21 Noktasının Düşey Yerdeğişimi

| E21 Noktasının Fotogrametrik Yöntemle Düşey Yerdeğişimi Ölçümü (315°) |                              |                                 |                     |                            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Yükleme (kPa)                                                         | E21 Nok. Göreceli Deplasmanı | Yatak Seviyesi Deplasmanı (E29) | E21 Nok. Deplasmanı | Düzeltilmiş Deplasman (mm) |
| 10                                                                    | 54.931                       | 18.0251                         | 36.9059             | 0.0578                     |
| 30                                                                    | 54.3968                      | 17.5946                         | 36.8022             | 0.1615                     |
| 50                                                                    | 53.6786                      | 16.958                          | 36.7206             | 0.2431                     |
| 110                                                                   | 52.9313                      | 16.3273                         | 36.604              | 0.3597                     |

Uygulanan fotogrametrik yöntemin doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla deneyde boru kesiti düşey eksenine LPT doğrusal pozisyon ölçer kullanılmasına devam edilmiştir. LPT'den yararlanılarak E2 noktasının düşey yönde gösterdiği deplasman büyüklüğü saptanmıştır, Çizelge 10.115'de LPT okumaları ile belirlenen boru kesitinin düşey yönde gösterdiği yerdeğiştirme değerleri görülmektedir.

Çizelge 10.115 25 No'lu Deneyde LPT Ölçümü İle Alınan Boru Kesiti Düşey Deplasmanı

| Düşey Yüklem (kPa) | Boru Tacının Düşey Deplasmanı (mm) |
|--------------------|------------------------------------|
| 10                 | 0.022055                           |
| 30                 | 0.122293                           |
| 50                 | 0.322309                           |
| 70                 | 0.588035                           |
| 90                 | 0.921504                           |
| 110                | 1.220211                           |

Çizelge 10.115 görüldüğü gibi boru tacının düşey yerdeğişimi LPT ölçümünde 1.22 mm olarak belirlenmiş, fotogrametrik ölçümde ise 1.119 mm olarak görüntülenmiştir.

#### i) 25 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

25 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanılarak çözümü yapılmıştır. Eşitliklerde kullanılan değişkenlerin büyüklükleri Çizelge 10.116'da Sayısal sonuçları ise Çizelge 10.117'de yer almaktadır.

Çizelge 10.116 25 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (110 kPa)   |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)  |
| $I$   | Atalet Momenti ( 1.83E-7) $m^4/m$     |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (20 Mpa) |

Çizelge 10.117 25 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 50                         | 108.8    | 20          | 0.083 | 0.598416        |
| 70                         | 108.8    | 20          | 0.083 | 0.837783        |
| 110                        | 108.8    | 20          | 0.083 | 1.316516        |

25 No'lu deneyin amprik yöntemlerle çözülmesiyle 110 kPa düşey yük altında boru tacının 1,31 mm deplasman göstereceği hesaplanmıştır.

#### ii) 25 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

Fotogrametrik yöntemden yararlanılarak okumaları saptanan 25 No'lu deneyin sayısal analizlerinde 2 ve 3 boyutlu çözümlemeler birlikte yürütülmüştür. Deney şartlarının ve kutu özelliklerinin bire bir modellendiği 3 boyutlu analizlerde PLAXIS 3D TUNNEL programı kullanılmıştır. 3 boyutlu analizlerin 2 boyutlu analizlerden ayrılan en önemli farkı modellenen sistemin bir düzlem kesitli olarak değil, gerçekte olduğu gibi z eksenini boyunca özelliklerinin de göz önünde bulundurulmasıdır. 50 cm Z uzunluğuna sahip model deney kutusu 3 boyutlu analizlerde 10 cm kalınlıklarındaki 5 dilimde modellenmiştir. Deneyin sayısal analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 10.118'de görülmektedir.

Çizelge 10.118 25 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Değişkenleri

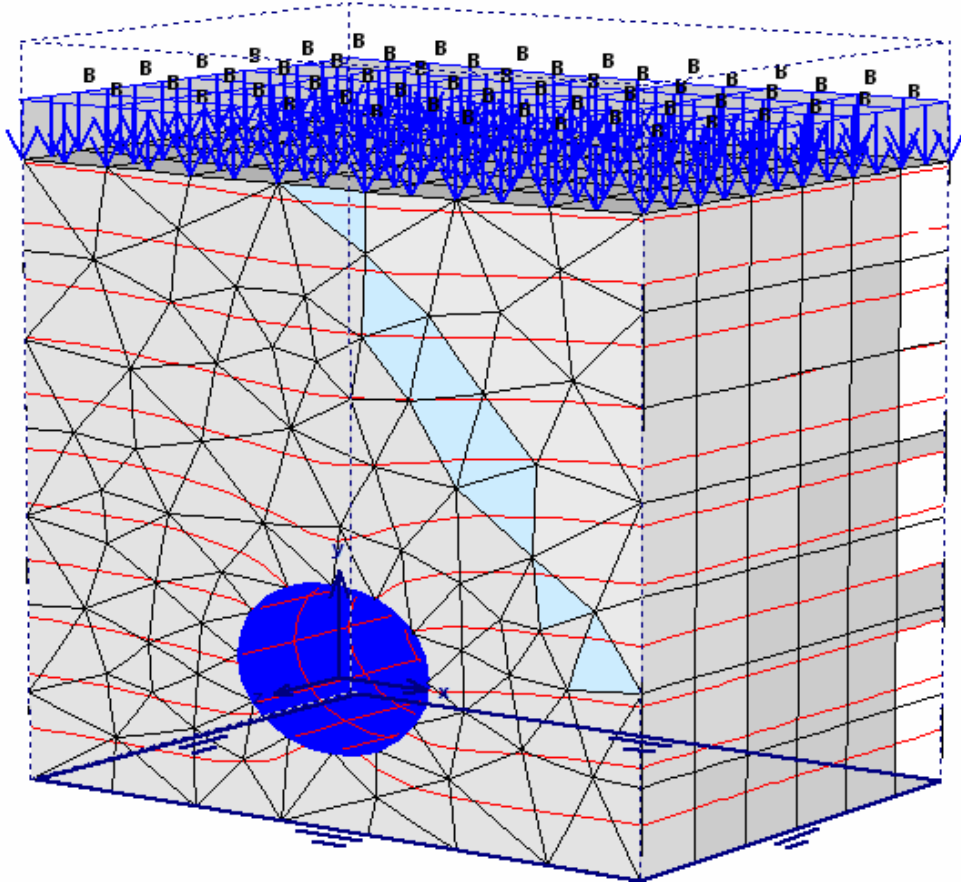
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb           | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| $\gamma_{kuru}$     | 17.5 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                   | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 37°                    | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 20 MPa                 | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Çizelge 10.118'deki malzeme değişkenleri ve yükleme koşulları dikkate alınarak yapılan 2 ve 3 boyutlu sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 10.119'da özetlenmiştir.

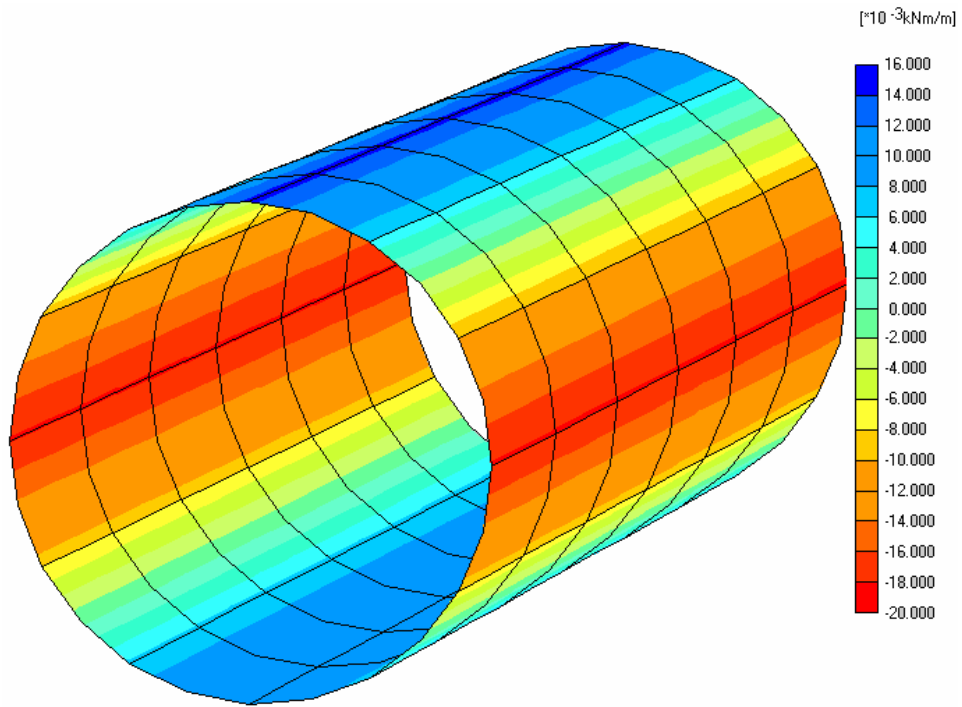
Çizelge 10.119 25 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Düşey Yükleme (kPa) | Boru Kesitinin Düşey Yerdeğişimi (mm) |          | Boru Kesitinin En Büyük Eğilme Momenti (kNm/m) |         |
|---------------------|---------------------------------------|----------|------------------------------------------------|---------|
|                     | 3D S.E                                | 2D.S.E   | 3D.S.E                                         | 2D.S.E  |
| 30                  | 0.368422                              | 0.243562 | 0.005152                                       | 0.00625 |
| 50                  | 0.558564                              | 0.568014 | 0.008587                                       | 0.00935 |
| 70                  | 0.748706                              | 0.784316 | 0.012022                                       | 0.0125  |
| 90                  | 0.938849                              | 1.00062  | 0.015456                                       | 0.01582 |
| 110                 | 1.12899                               | 1.21692  | 0.01891                                        | 0.01905 |

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 110 kPa yük altında 3D analizde boru kesitinin düşey yerdeğişimi 1.12 mm hesaplanırken, 2D analizde 1.21 mm hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizde 0.018 kNm/m iken, 2D analizde bu değer 0.019 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal modeller sonucunda, Şekil 10.26a'da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği deplasman ve 10.26 b'de boru kesitinde oluşan eğilme momenti dağılımının üç boyutlu davranışı görülmektedir.



a) Geri Dolgu Malzemesinin Toplam Deplasmanı



b) HDPE Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri Dağılımı

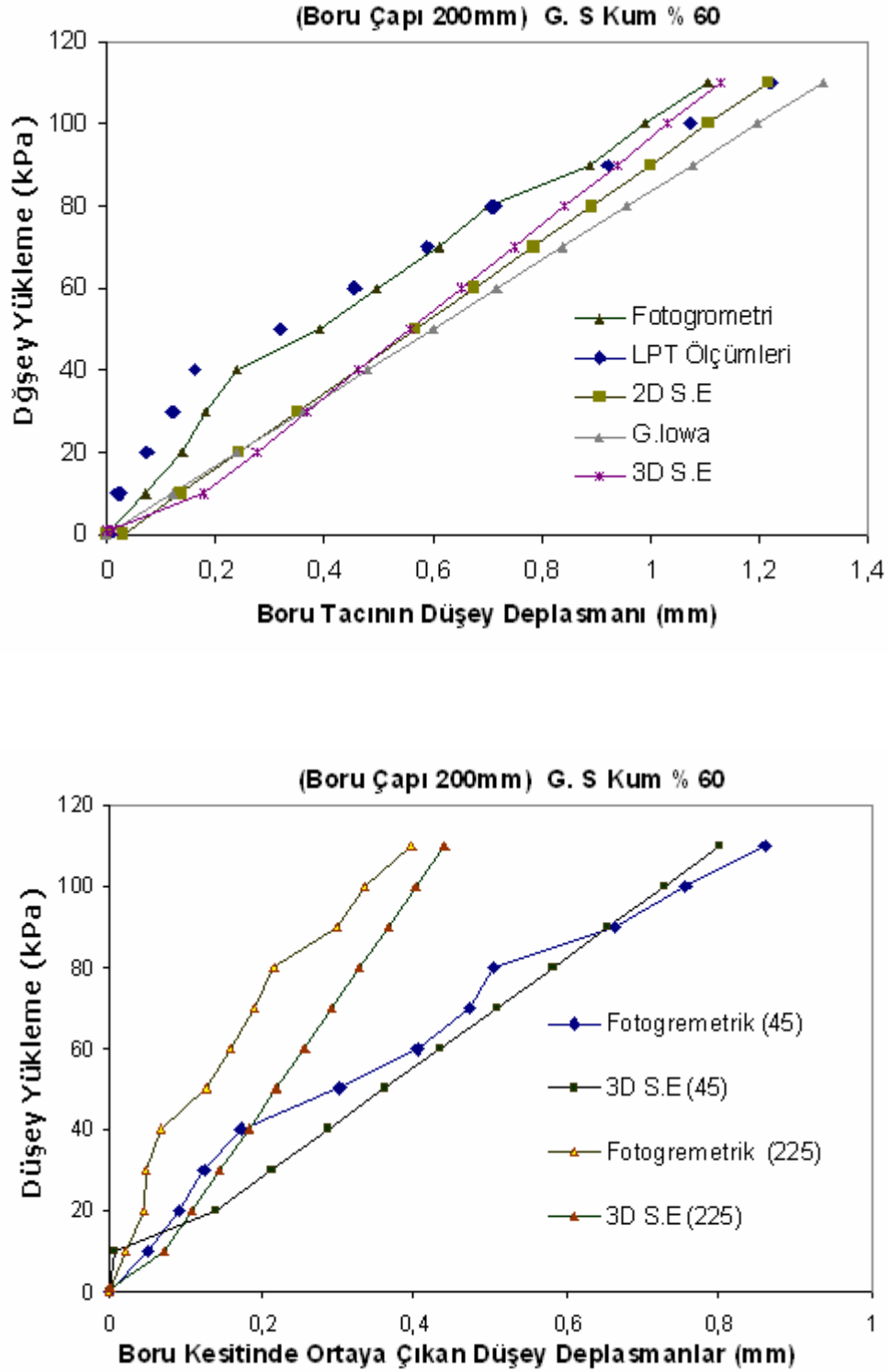
Şekil 10.26 (a,b) 25 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi

Boru kesitinin düşey yönde ortaya çıkan yerdeğişimleri sayısal yöntemlerle hesaplanması yanında, boru bel ve omuzlarındaki düşey yerdeğişimlerinin 3D sayısal analizleri de yapılmıştır. Çizelge 10.120’de sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 10.120 25 No’lu Deneyin 3D Sayısal Analizi

| Boru Çemberinde Oluşan Deplasmanların 3D Sayısal Analizi |                     |                 |                 |
|----------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Nokta                                                    | Düşey Yükleme (kPa) | Omuz (45°-135°) | Bel (225°-315°) |
| 1                                                        | 10                  | 0.140404        | 0,072644        |
| 2                                                        | 30                  | 0.287454        | 0,146032        |
| 3                                                        | 50                  | 0.434504        | 0,219419        |
| 4                                                        | 70                  | 0.581555        | 0,292807        |
| 5                                                        | 90                  | 0.728605        | 0,366194        |
| 6                                                        | 110                 | 0.875655        | 0,439582        |

Yapılan deneysel çalışmalar ışığında, fotogrametrik ölçümler, LPT ölçümleri ve sayısal ve amprik analiz sonuçlarının karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.27’te görülmektedir.

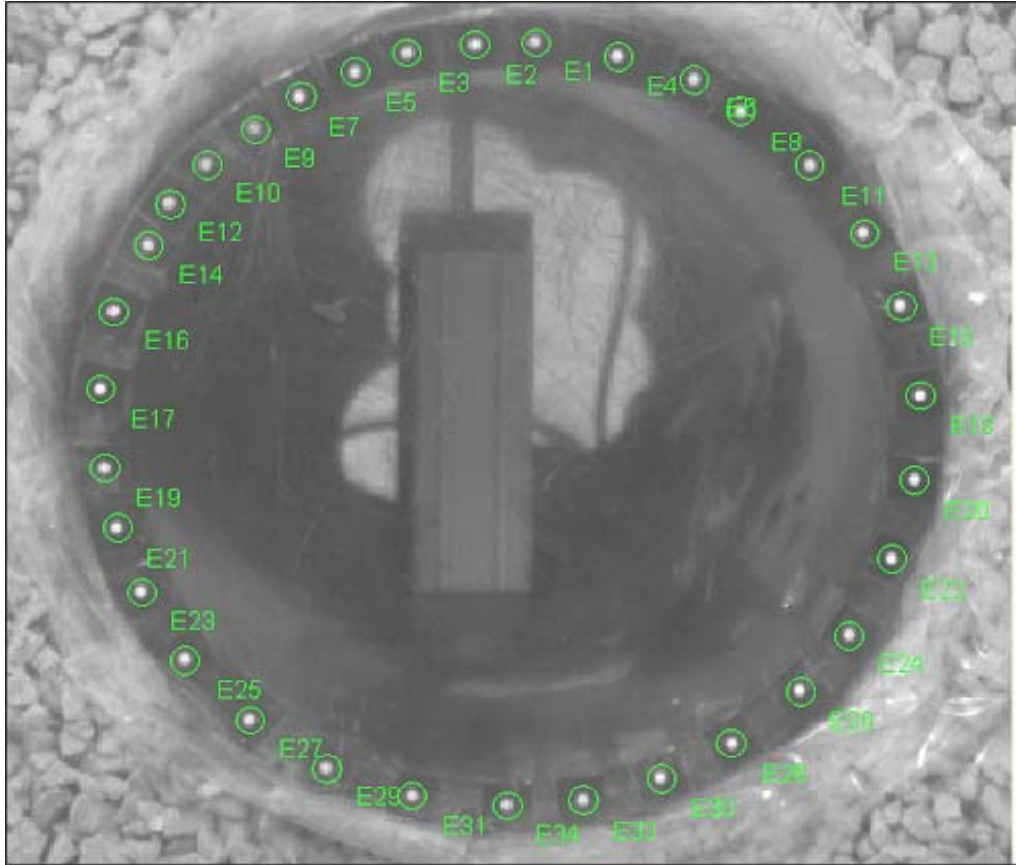


Şekil 10.27 25 Nolu Deneyin DeneySEL ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması



### 10.5.2 26 No'lu Deney

26 No'lu deneyde 200 mm çapındaki borunun % 65 sıklıktaki çakıl geri dolgusunda ve 100 kPa düşey yükleme altındaki ekil değişimi LPT lm aygıtı ve fotogrametrik görüntüleme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla incelenen borunun n yüzüne şekil 10.28'de görüldüğü gibi numaralandırılmış 34 farklı eşlenik nokta yapıştırılmıştır. Deney süresince kameralar eşlenik noktaların  $X,Y$  ve  $Z$  eksenlerindeki 3 boyutlu deplasmanlarını görüntüleyerek kaydetmiş ve veriler üzerinde uygulanan algoritmik hesaplamalar ile yaklaşık % 2-5 hassasiyette ekil değişimleri belirlenmiştir. 26 No'lu deneyin, deney koşulları geri dolgu ve yükleme zellikleri Geliştirilmiş Iowa ile 2ve 3 boyutlu sayısal analiz yöntemleri kullanılarak matematiksel çözümleri gerçekleştirilmiştir.



şekil 10.28 26 No'lu Deneyde Kullanılan Eşlenik Noktaların Dağılımı

Çizelge 10.121’de 200mm HDPE borunun 45°,90°,135°,225°, ve 315° noktaların fotogrametrik görüntüleme yönteminde elde edilen düşey deplasmanları ve düşey ekseninde yerleştirilen LPT doğrusal deplasman ölçüm aygıtından alınan deney verilerinin toplu gösterimi yer almaktadır.

Çizelge 10.121 26 No’lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi

| Düşey Yükleme<br>(kPa) | Eşlenik Noktaların Düşey Yerdeğişimleri (mm) |        |         |          |          | LPT (Ölçüm Aygıtı)<br>Düşey Yerd. (mm) |
|------------------------|----------------------------------------------|--------|---------|----------|----------|----------------------------------------|
|                        | 45(E11)                                      | 90(E2) | 135(E9) | 225(E23) | 315(E24) |                                        |
| 20                     | 0.1476                                       | 0.703  | 0.1358  | 0.0977   | 0.0938   | 0.156278                               |
| 30                     | 0.216                                        | 0.783  | 0.1922  | 0.122    | 0.1266   | 0.350801                               |
| 40                     | 0.2887                                       | 0.873  | 0.242   | 0.1557   | 0.1683   | 0.464939                               |
| 50                     | 0.3361                                       | 0.937  | 0.299   | 0.1713   | 0.1872   | 0.571892                               |
| 60                     | 0.3944                                       | 1      | 0.3526  | 0.2165   | 0.213    | 0.680376                               |
| 70                     | 0.4638                                       | 1.083  | 0.4174  | 0.2389   | 0.255    | 0.792839                               |
| 80                     | 0.5218                                       | 1.151  | 0.4929  | 0.2738   | 0.2752   | 0.908718                               |
| 90                     | 0.582                                        | 1.204  | 0.5528  | 0.308    | 0.3041   | 1.013138                               |
| 100                    | 0.6411                                       | 1.289  | 0.6021  | 0.3454   | 0.3541   | 1.13472                                |

Çizelge 10.121’de görüldüğü gibi boru tacının düşey deplasmanı LPT ölçümünde 1.13 mm olarak saptanırken, fotogrametrik ölçümde yerdeğişimler 1.289 mm olarak görüntülenmiştir.

#### **i) 26 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi**

26 No’lu deneyin Geliştirilmiş Iowa eşitliği kullanılarak çözümü yapılmıştır. Bağıntılarda yeralan değişkenlerin büyüklükleri Çizelge 10.122’de gösterilmektedir. Yöntemin sonuçları ise Çizelge 10.123’de özetlenmiştir.

Çizelge 10.122 26 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                    |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (110 kPa)      |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)     |
| $I$   | Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$     |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (17.8 MPa ) |

Çizelge 10.123 26 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 20                         | 108.8    | 17.8        | 0.083 | 0.27777         |
| 40                         | 108.8    | 17.8        | 0.083 | 0.55555         |
| 60                         | 108.8    | 17.8        | 0.083 | 0.83332         |
| 80                         | 108.8    | 17.8        | 0.083 | 1.11110         |
| 100                        | 108.8    | 17.8        | 0.083 | 1.38887         |

## ii) 26 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

Fotogrametrik Yöntem kullanılarak yapılan 26 No'lu deneyin sayısal modellenmesinde 2 ve 3 boyutlu analiz yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Deney şartlarının ve kutu özelliklerinin bire bir modellendiği 3 boyutlu analizlerde PLAXIS 3D TUNNEL programı kullanılmıştır. 50 cm Z uzunluğuna sahip model deney kutusu 3 boyutlu analizlerde 10 cm kalınlıklarındaki 5 dilimde modellenmiştir. 26 No'lu deneyin sayısal analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 10.124'de görülmektedir.

Çizelge 10.124 26 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

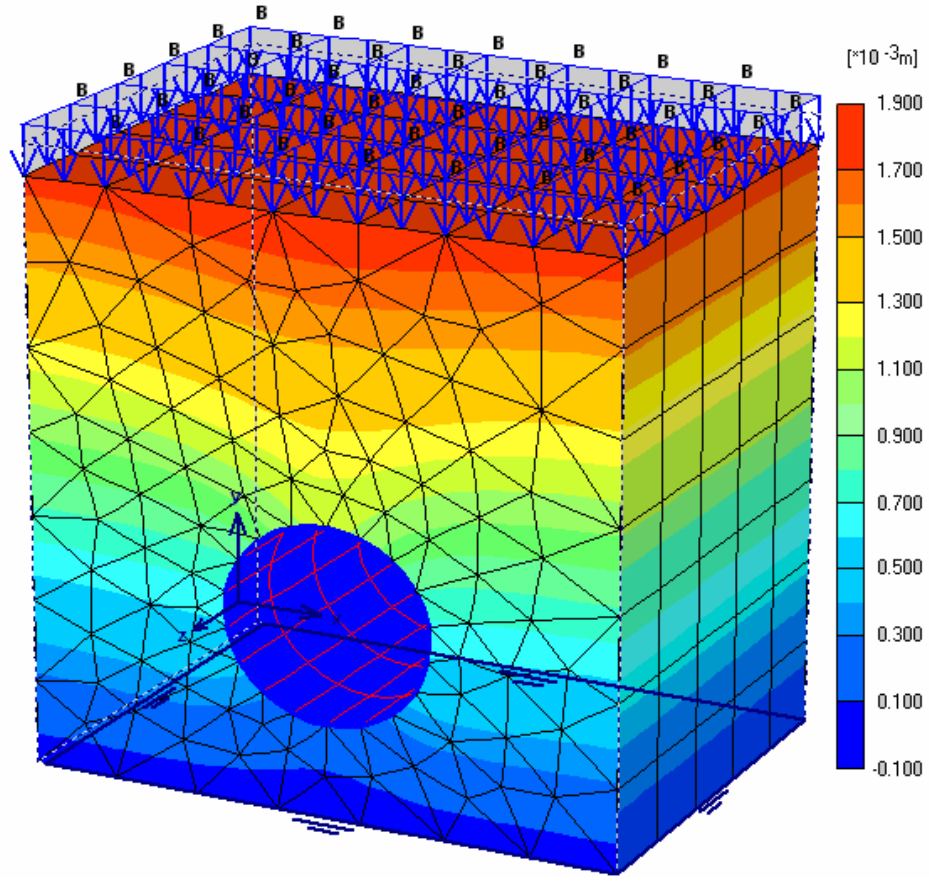
|                     |                      |                     |                           |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
| Zemin               | Çakıl                | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 200 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6372 kN/m                 |
| $\phi$              | 33°                  | EI                  | 0,126 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 17.8 MPa             | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

PLAXIS 2D ve 3D programlarında modellenen 26 No'lu deneyin sayısal analizinden elde edilen deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 10.125'de verilmiştir.

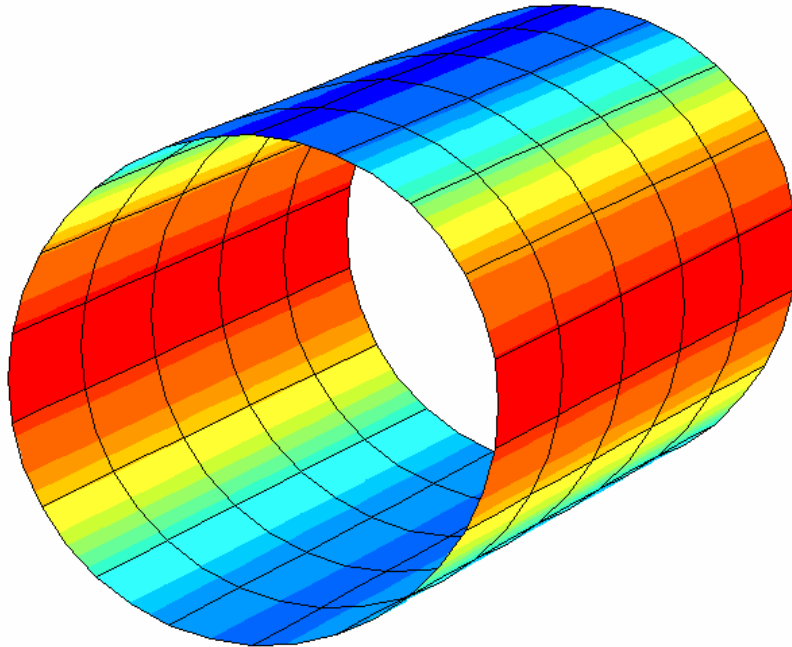
Çizelge 10.125 26 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Düşey<br>Yüklemeye (kPa) | Boru Kesitinin $\Delta y$<br>Düşey Yerdeğişimi (mm) |          | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Momenti (kNm/m) |             |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------|-------------|
|                          | 2D                                                  | 3D       | 2D                                                       | 3D          |
| 10                       | 0.0277007                                           | 0.20408  | 0.00157                                                  | 0.001914634 |
| 30                       | 0.2442                                              | 0.42155  | 0.00362                                                  | 0.004414634 |
| 50                       | 0.68947                                             | 0.63902  | 0.00568                                                  | 0.006926829 |
| 70                       | 0.785445                                            | 0.856489 | 0.00773                                                  | 0.009426829 |
| 90                       | 1.00194                                             | 1.07396  | 0.00979                                                  | 0.011939024 |
| 100                      | 1.11019                                             | 1.18269  | 0.0182                                                   | 0.022195122 |

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 100 kPa yük altında 3D analizde boru tacının düşey ekseninde deplasmanı 1.18 mm hesaplanırken, 2D analizde 1.11 mm hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizinde 0.022 kNm/m iken, 2D analizinde bu değer 0.018 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal modeller sonucunda, Şekil 10.29 a'da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği deplasman davranışının ve 10.29 b'de boru kesitinde oluşan eğilme momenti dağılışının üç boyutlu davranışı görülmektedir. Kutu kesiti uzunluğu boyunca boru ve malzeme özelliklerinin değişmemesi 2D ve 3D analizlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermesini sağlamıştır.



a) Geri Dolgu Malzemesinin Toplam Deplasmanı



b) HDPE Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri Dağılımı

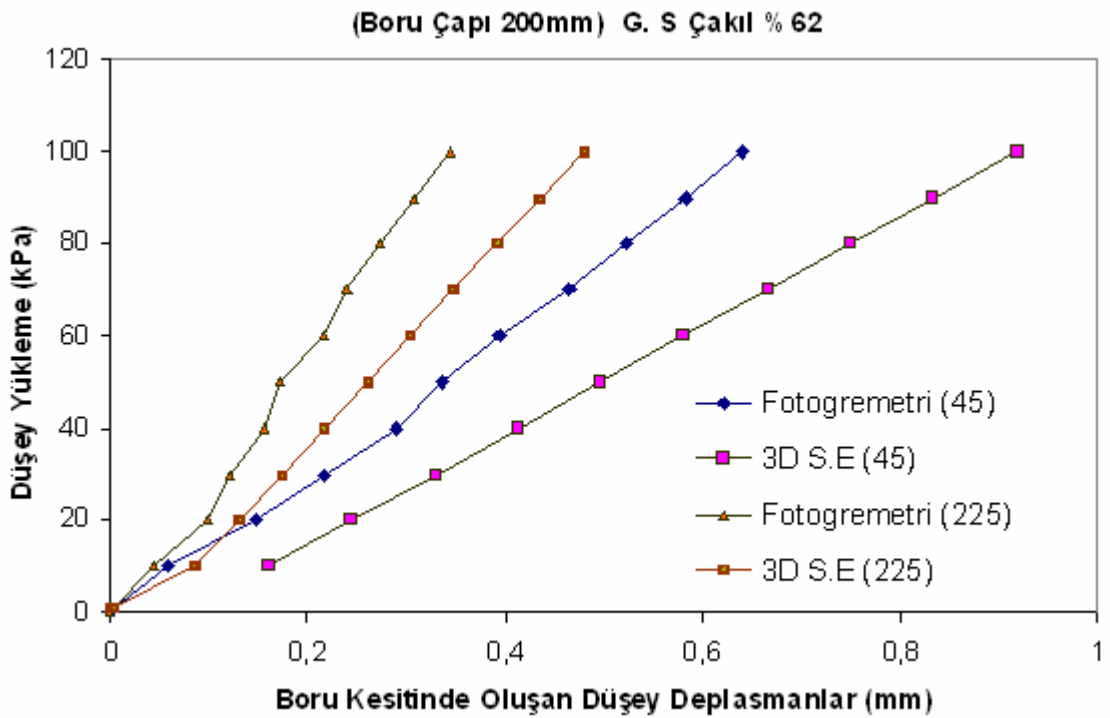
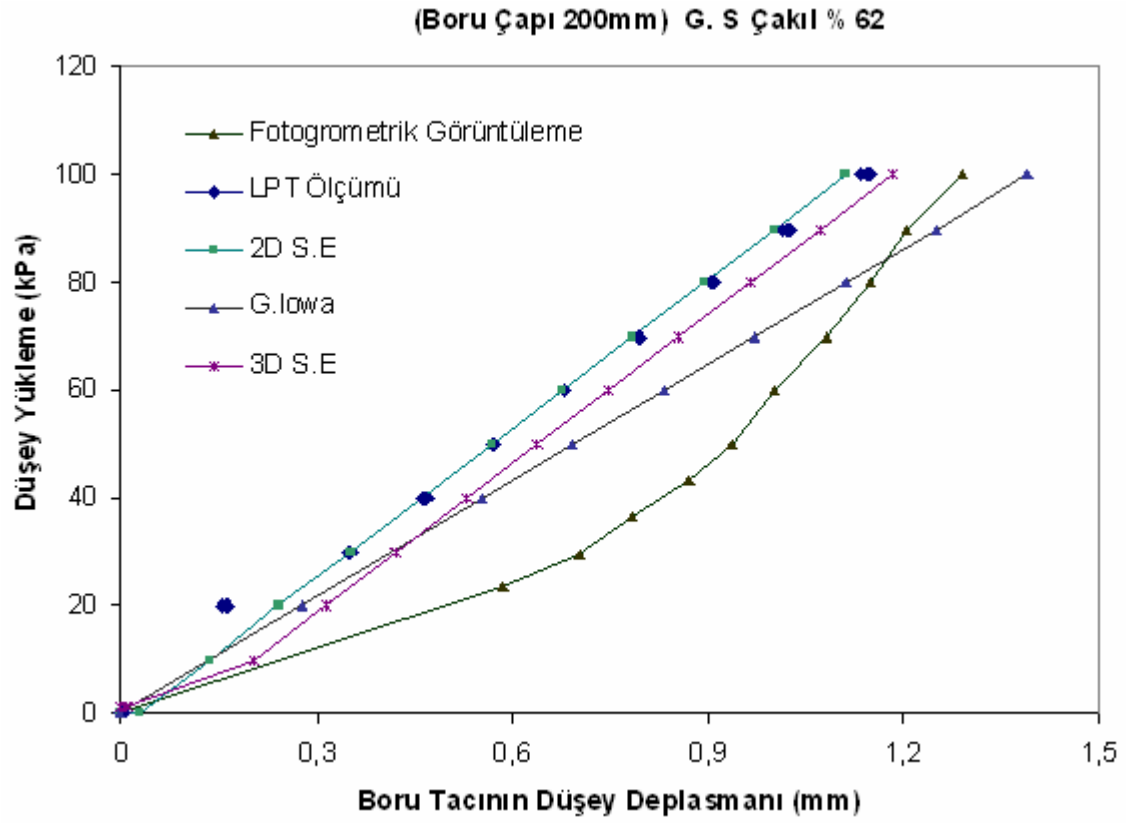
Şekil 10.29 (a,b) 26 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 100 kPa yük altında 3D analizde boru tacının düşey deplasmanı 1.18 mm hesaplanırken, 2D analizde 1.11 mm bulunmuştur. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizinde 0.022 kNm/m iken, 2D analizinde bu değer 0.018 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal modeller sonucunda, Şekil 10.29 a’da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği deplasmanın ve 10.29 b’de boru kesitinde oluşan eğilme momenti dağılışının üç boyutlu davranışı görülmektedir. Kutu kesiti derinliği boyunca boru ve malzeme özelliklerinin değişmemesi 2D ve 3D analizlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermesinde etkili olmuştur. Boru kestinin düşey yönde ortaya çıkan deplasmanların sayısal yöntemlerle hesaplanması yanında, fotogrametrik görüntülerden elde edilen boru bel ve omuzlarındaki düşey deplasmanların 3D sayısal analizleri de yapılmıştır. Çizelge 10.126’da yürütülen sayısal çalışmaların sonuçları görülmektedir.

Çizelge 10.126 26 No’lu Deneyde Saptanan Deplasmanların 3D Sayısal Analizi

| Boru Çemberinde Oluşan Deplasmanların 3D Nüm. Analizi |                 |                   |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)                                   | Omuz (45°-135°) | Kalça (225°-315°) |
| 40                                                    | 0,41302         | 0,217042          |
| 60                                                    | 0,58122         | 0,30426           |
| 80                                                    | 0,74942         | 0,391478          |
| 100                                                   | 0,91762         | 0,478695          |

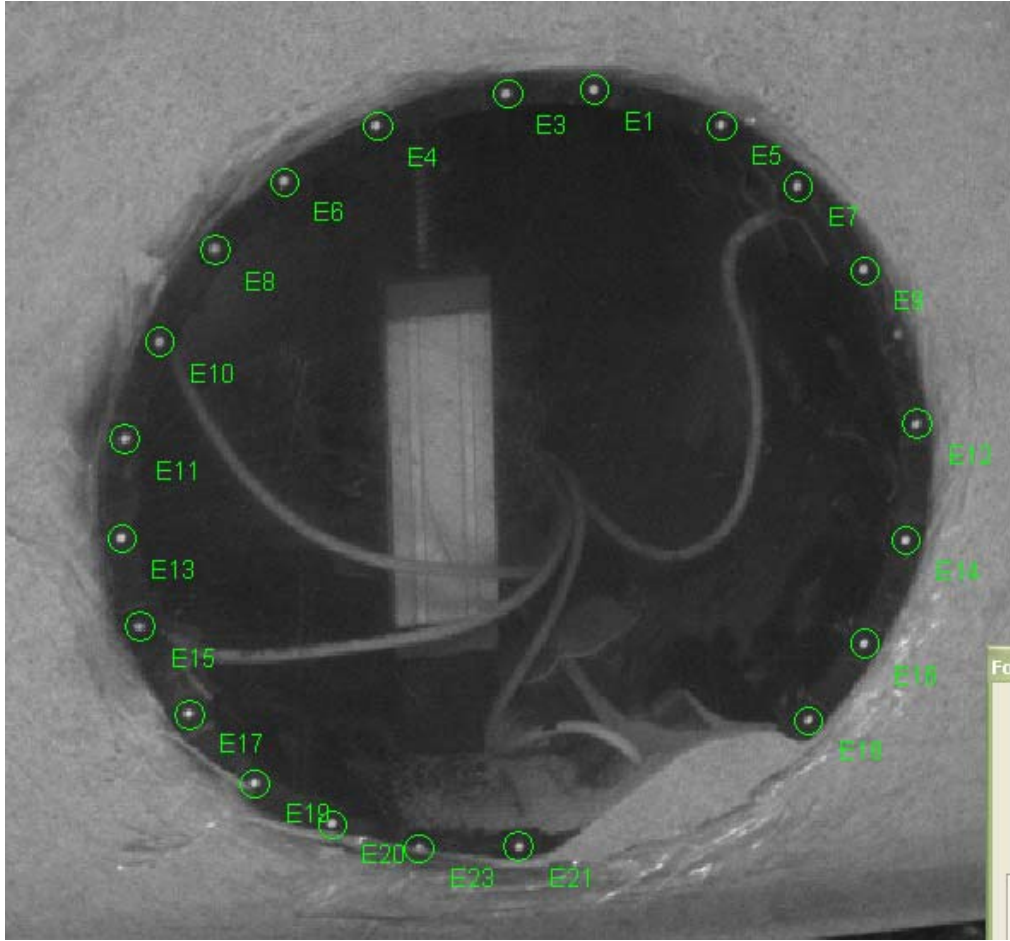
Çizelge 10.126’de görüldüğü gibi 26 No’lu deneyin sayısal analizlerinde omuz ve bel bölgelerinin sırasıyla 0.91 mm ve 0.47 mm deplasman gösterdiği hesaplanmıştır. Bu bölgelere yerleştirilen eşlenik noktaların ise sırasıyla 0.64 mm ve 0.35 mm düşey yönde gösterdikleri fotogrametrik görüntüleme kayıtları ile sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, fotogrametrik görüntülerle ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının birbirleri ile uyumlu oldukları görülebilir. Yapılan bütün analizlerin karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.30’da görülebilir.



Şekil 10.30 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.5.3 27 No'lu Deney

27 No'lu deneyde 242 mm çapındaki borunun % 65 sıklıktaki kum geri dolgusunda ve 100 kPa düşey yükleme altındaki şekil değişimi LPT ölçüm aygıtı ve fotogrametrik görüntüleme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla incelenen borunun ön yüzüne Şekil 10.28 ' de görüldüğü gibi numaralandırılmış 21 farklı eşlenik nokta yapıştırılmıştır. Deney süresince kameralar eşlenik noktaların  $X,Y$  ve  $Z$  eksenlerindeki deplasmanlarını görüntüleyerek kaydetmiş ve veriler üzerinde uygulanan algoritmik hesaplamalar ile yaklaşık % 2-5 hassasiyette şekil değişimleri belirlenmiştir. 27 No'lu deneyin, deney koşulları geri dolgu ve yükleme özellikleri Geliştirilmiş Iowa amprik ve 2D,3D sayısal yöntemlerinde modellenerek matematiksel analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10.31 27 No'lu Deneyde Eşlenik Noktaların Yerleşimi



Çizelge 10.127’de 242 mm HDPE borunun  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $225^{\circ}$ , ve  $315^{\circ}$  noktaların fotogrametrik görüntüleme yönteminde elde edilen düşey deplasmanları ve düşey ekseninde yerleştirilen LPT ölçüm aygıtından alınan deney verilerinin toplu gösterimi görülebilir.

Çizelge 10.127 27 No’lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi

| Düşey Yükleme<br>(kPa) | Eşlenik Noktaların Düşey Yerdeğişimi (mm) |        |         |          |          | LPT (Ölçüm Aygıtı)<br>Düşey Dep (mm) |
|------------------------|-------------------------------------------|--------|---------|----------|----------|--------------------------------------|
|                        | 45(E11)                                   | 90(E2) | 135(E9) | 225(E23) | 315(E24) |                                      |
| 20                     | 0.0408                                    | 0.092  | 0.053   | 0.0218   | 0.0065   | 0.147215747                          |
| 40                     | 0.0926                                    | 0.156  | 0.0838  | 0.0717   | 0.0219   | 0.230408498                          |
| 60                     | 0.1861                                    | 0.315  | 0.2275  | 0.1313   | 0.004    | 0.423970759                          |
| 80                     | 0.4667                                    | 0.8    | 0.4899  | 0.2358   | 0.0938   | 0.76738021                           |
| 100                    | 0.5323                                    | 0.908  | 0.5814  | 0.2015   | 0.199    | 1.096908657                          |

Çizelge 10.127 de görüldüğü gibi boru tacının deplasmanı LPT ölçümünde 1.096 mm olarak saptanırken, fotogrametrik ölçümde yerdeğişimi 0.908 mm olarak ölçülmüştür.

#### i) 27 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi Analizi

27 No’lu deneyin G.Iowa eşitliği kullanılarak çözümlemesi yapılmıştır. Bağıntıda kullanılan değişkenlerin büyüklükleri Çizelge 10.128’de analiz sonuçları ile Çizelge 10.129’da gösterilmektedir.

Çizelge 10.128 27 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                        |
|-------|----------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                  |
| $K$   | Yatak Katsayısı (0.083)                |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (110 kPa)    |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)   |
| $I$   | Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$   |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (27 MPa ) |

Çizelge 10.129 27 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |                   |                      |       |             |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-------|-------------|
| P <sub>c</sub> (kPa)       | EI/r <sup>3</sup> | E <sub>s</sub> (MPa) | (K)   | Δy (mm)     |
| 20                         | 42.31             | 27                   | 0.083 | 0.235249796 |
| 40                         | 42.31             | 27                   | 0.083 | 0.470499593 |
| 60                         | 42.31             | 27                   | 0.083 | 0.705749389 |
| 80                         | 42.31             | 27                   | 0.083 | 0.940999186 |
| 100                        | 42.31             | 27                   | 0.083 | 1.176248982 |

## ii) 27 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

27 No'lu deneyin sayısal analizlerinde 2 ve 3 boyutlu analizler birlikte yürütülmüştür. Analizlerde kullanılan zemin ve boru özellikleri Çizelge 10.130'de görülmektedir.

Çizelge 10.130 27 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

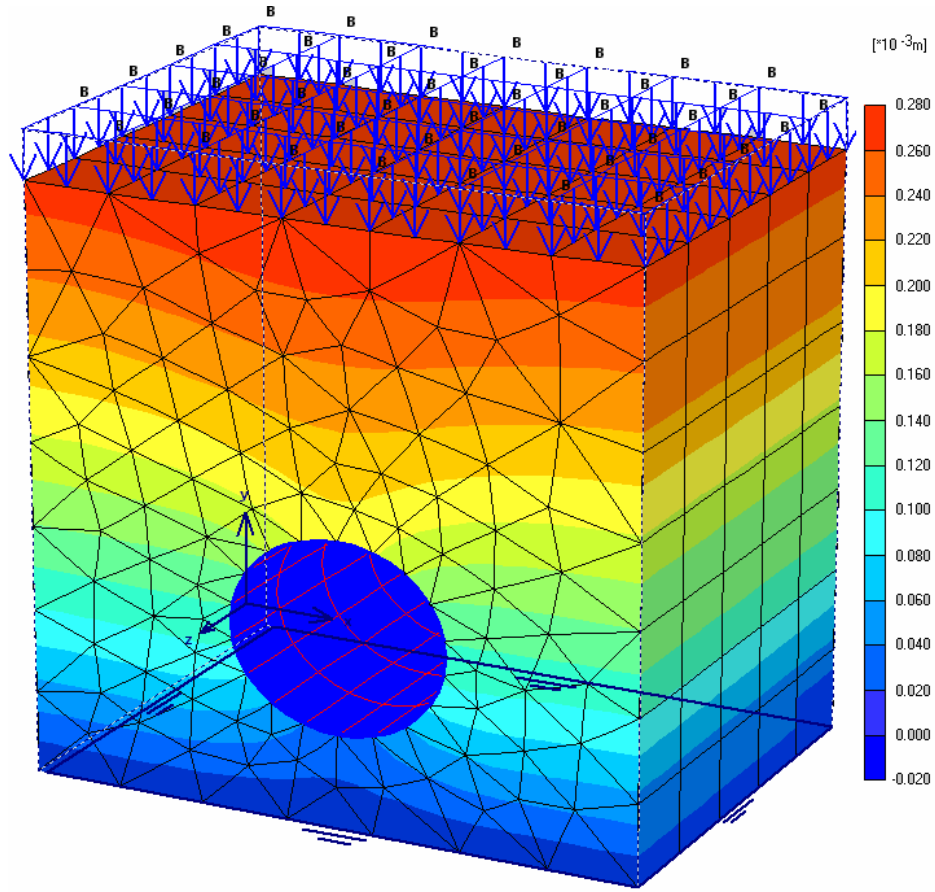
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 6432 kN/m                 |
| $\phi$              | 36°                  | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| E <sub>s</sub>      | 27 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen boru tacının düşey eksenindeki deplasmanı ve en büyük eğilme momenti değerleri Çizelge 10.131'de özetlenmektedir

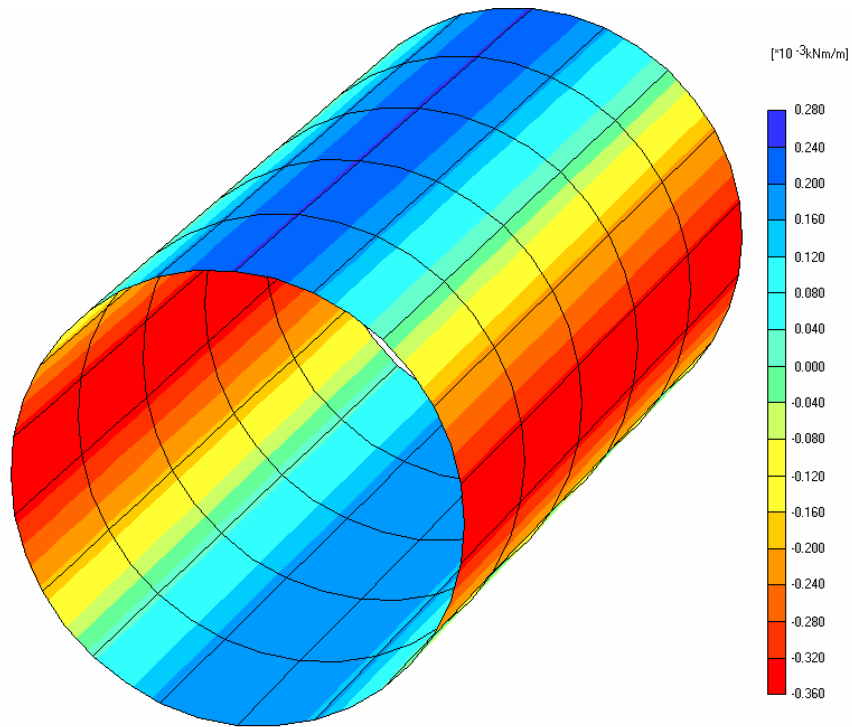
Çizelge 10.131 27 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Düşey<br>Yüklemeye (kPa) | Boru Tacının Ay<br>Düşey Yerdeğiştirme (mm) |          | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Momenti (kNm/m) |             |
|--------------------------|---------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------|-------------|
|                          | 2D                                          | 3D       | 2D                                                       | 3D          |
| 10                       | 0,0277007                                   | 0,20408  | 0,00157                                                  | 0,001914634 |
| 30                       | 0,2442                                      | 0,42155  | 0,00362                                                  | 0,004414634 |
| 50                       | 0,568947                                    | 0,63902  | 0,00568                                                  | 0,006926829 |
| 70                       | 0,785445                                    | 0,856489 | 0,00773                                                  | 0,009426829 |
| 90                       | 1,00194                                     | 1,07396  | 0,00979                                                  | 0,011939024 |
| 100                      | 1,11019                                     | 1,18269  | 0,0182                                                   | 0,022195122 |

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 100 kPa yük altında 3D analizde boru tacının düşey yerdeğiştirmesi 1.18 mm hesaplanırken, 2D analizde 1.11 mm hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizinde 0.022 kNm/m iken, 2D analizinde bu değer 0.018 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal modeller sonucunda, Şekil 10.32.a'da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği deplasmanı ve 10.32b'de boru kesitinde oluşan eğilme momenti dağılımının üç boyutlu davranışı görülmektedir. Kutu kesiti uzunluğu boyunca boru ve malzeme özelliklerinin değişmemesi 2D ve 3D analizlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermesini sağlamıştır.



a) Geri Dolgu Malzemesinin Toplam Deplasmanı



b) HDPE Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri Dağılımı

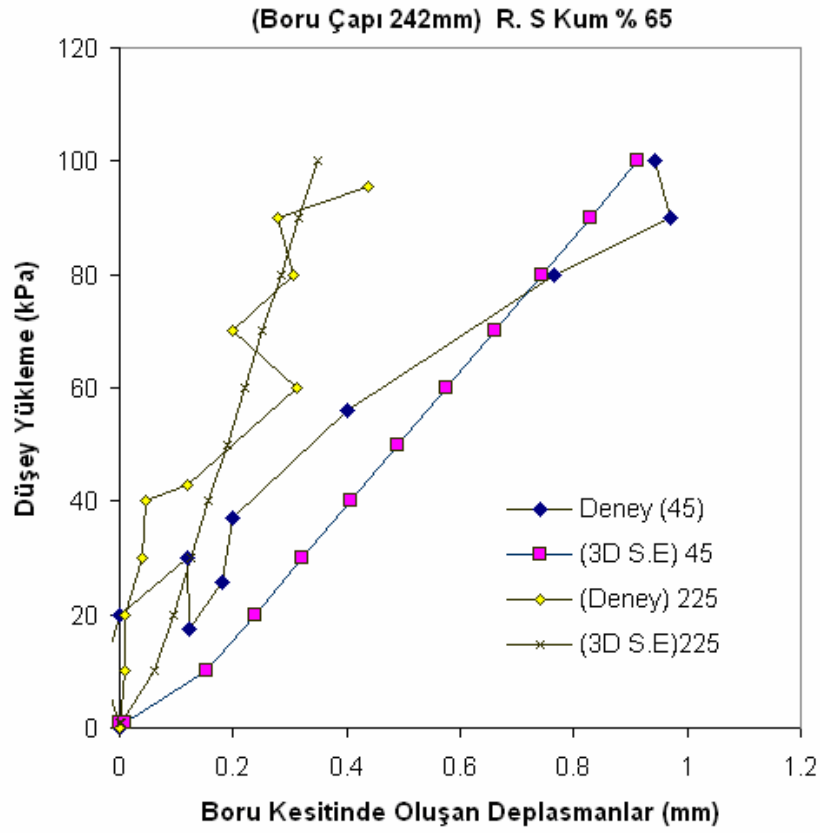
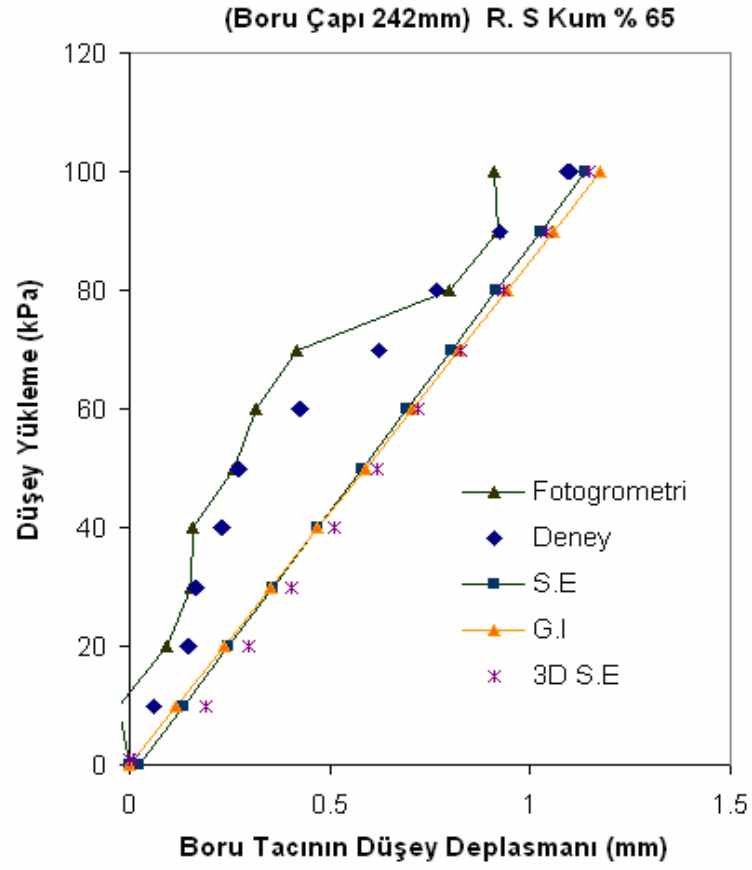
Şekil 10.32 (a,b) 27 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi

Boru kestinin düşey yönde ortaya çıkan deplasmanların sayısal yöntemlerle hesaplanması yanında, fotogrametrik görüntülerden elde edilen boru bel ve omuzlarındaki düşey deplasmanların 3D sayısal analizleri de yapılmıştır. Çizelge 10.132 sayısal sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 10.132 27 No'lu Deneyde Boru Kesitinde Oluşan Deplasmanların Sayısal Analizleri

| Boru Çemberinde Oluşan Deplasmanların 3D Sayısal Analizi |                 |                 |
|----------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Düşey Yükleme (kPa)                                      | Omuz (45°-135°) | Bel (225°-315°) |
| 20                                                       | 0.24391         | 0.11619         |
| 40                                                       | 0.41694         | 0.195756        |
| 60                                                       | 0.58997         | 0.275322        |
| 80                                                       | 0.76300         | 0.354888        |
| 100                                                      | 0.93603         | 0.434455        |

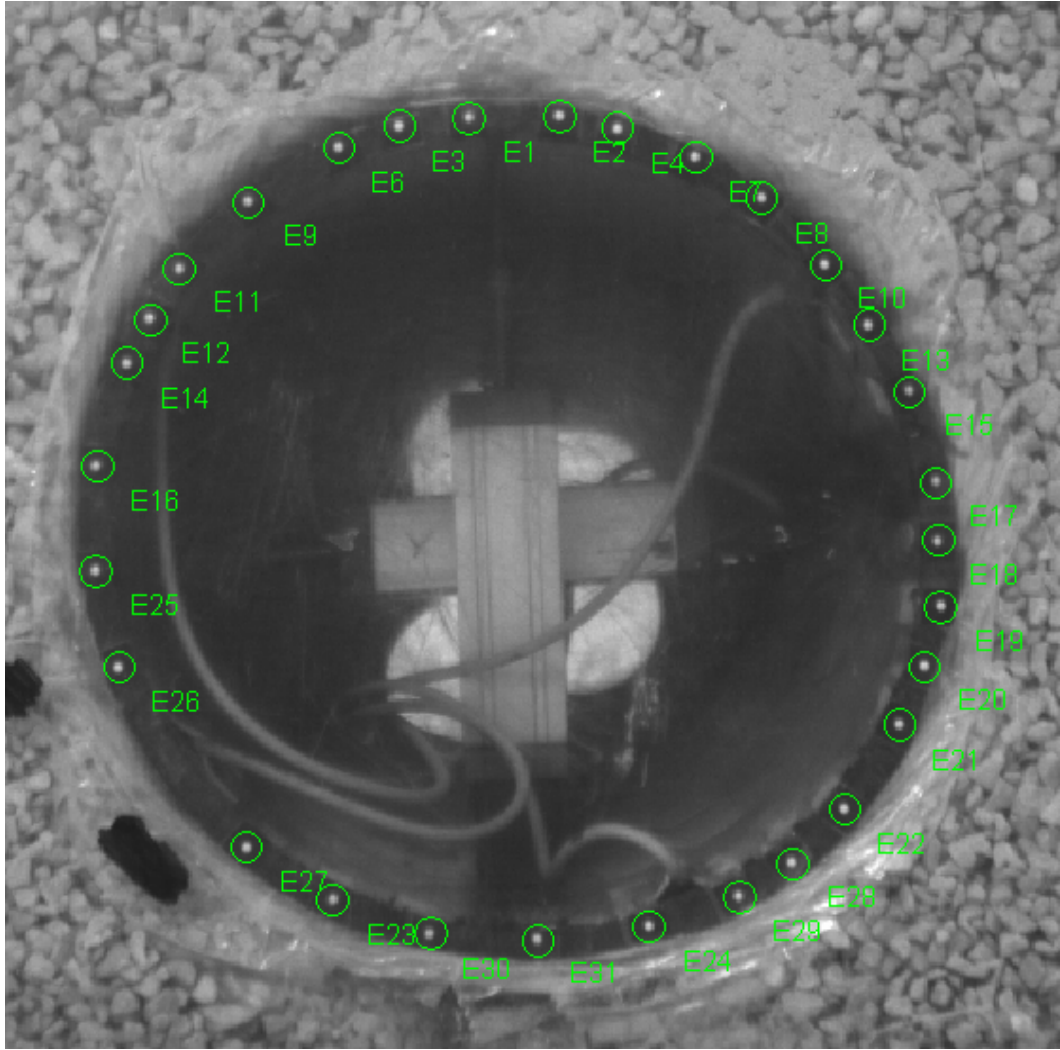
Çizelge 10.132'de görüldüğü gibi 242 mm borunun 100 kPa yük ve % 62 sıklıktaki çakıl ortamındaki sayısal analizlerinde omuz ve bel bölgelerinde sırasıyla 0.91 mm ve 0.47 mm yerdeğişimi gösterdiği hesaplanmıştır. Bu bölgeye yerleştirilen eşlenik noktaların ise 0.64 mm ve 0.35 mm düşey yönde gösterdikleri fotogrametrik görüntüleme kayıtlarından elde edilmiştir. Yapılan bütün analizlerin karşılaştırmalı grafiksel gösterimi Şekil 10.33'te görülebilir.



Şekil 10.33 27 No'lu Deneyin Deneyisel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 10.5.4 28 No'lu Deney

28 No'lu deneyde 242 mm çapındaki borunun % 88 sıklıktaki çakıl geri dolgusunda ve 100 kPa düşey yükleme altındaki ekil değişimi LPT lm aygıtı ve fotogrametrik görüntüleme yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla incelenen borunun n yüzüne şekil 10.34' te görüldüğü gibi numaralandırılmış 31 farklı eşlenik nokta yapıştırılmıştır. Deney süresince kameralar eşlenik noktaların  $x,y$  ve  $z$  eksenlerindeki üç boyutlu deplasmanları görüntülenerek kaydetmiş ve veriler üzerinde uygulanan algoritmik hesaplamalar ile yaklaşık % 2-5 hassasiyette ekil değişimleri belirlenmiştir. 28 No'lu deneyin, deney koşulları geri dolgu ve yükleme zellikleri Geliştirilmiş Iowa amprik ve 2D,3D sayısal yöntemleri kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir.



şekil 10.34 28 No'lu Deneyin Eşlenik Noktaları

Çizelge 10.133’de 242 mm HDPE borunun 45°,90°,135°,225°, ve 315° noktaların fotogrametrik görüntüleme yönteminde elde edilen düşey yerdeğişimleri ve LPT ölçüm aygıtından alınan deney verilerin toplu gösterimi görülebilir.

Çizelge 10.133 28 No’lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi

| Düşey Yükleme<br>(kPa) | Eşlenik Noktaların Düşey Deplasmanı (mm) |        |          |          |          | LPT (Ölçüm Aygıtı)<br>Düşey Dep (mm) |
|------------------------|------------------------------------------|--------|----------|----------|----------|--------------------------------------|
|                        | 45(E11)                                  | 90(E2) | 135(E9)  | 225(E23) | 315(E24) |                                      |
| 20                     | 0                                        | 0      | 0        | 0.0002   | 0.000168 | 0.007721                             |
| 40                     | 0.0621                                   | 0.0929 | 0.055269 | 0.0035   | 0.00294  | 0.15898                              |
| 60                     | 0.1986                                   | 0.3173 | 0.176754 | 0.0184   | 0.015456 | 0.404551                             |
| 80                     | 0.3042                                   | 0.4646 | 0.270738 | 0.0982   | 0.082488 | 0.570629                             |
| 100                    | 0.3588                                   | 0.5757 | 0.319332 | 0.1302   | 0.109368 | 0.717142                             |

Çizelge 10.134’de görüldüğü gibi boru tacının deplasmanı LPT ölçümünde 0.71 mm olarak saptanırken, fotogrametrik ölçümde yerdeğişimi 0.57 mm olarak görüntülenmiştir.

#### i) 28 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

28 No’lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanılarak çözümü yapılmıştır. Bağintıda kullanılan değişkenlerin büyüklükleri Çizelge 10.134’de analiz sonuçları ise Çizelge 10.135’de gösterilmektedir.

Çizelge 10.134 28 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                             |
|-------|---------------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                       |
| $K$   | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (100 kPa)         |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| $I$   | Atalet Momenti ( 1.83E-7) m <sup>4</sup> /m |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü (39 Mpa)       |



Çizelge 10.135 28 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 20                         | 42.31    | 39          | 0.083 | 0.1649          |
| 40                         | 42.31    | 39          | 0.083 | 0.32988         |
| 60                         | 42.31    | 39          | 0.083 | 0.4947          |
| 80                         | 42.31    | 39          | 0.083 | 0.6596          |
| 100                        | 42.31    | 39          | 0.083 | 0.8245          |

### ii) 28 No'lu No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

28 No'lu deneyin sayısal analizlerinde 2 boyutlu 3 boyutlu çözümler birlikte yapılmıştır. Analizlerinde kullanılan zemin ve boru özellikleri Çizelge 10.136'te görülmektedir.

Çizelge 10.136 28 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

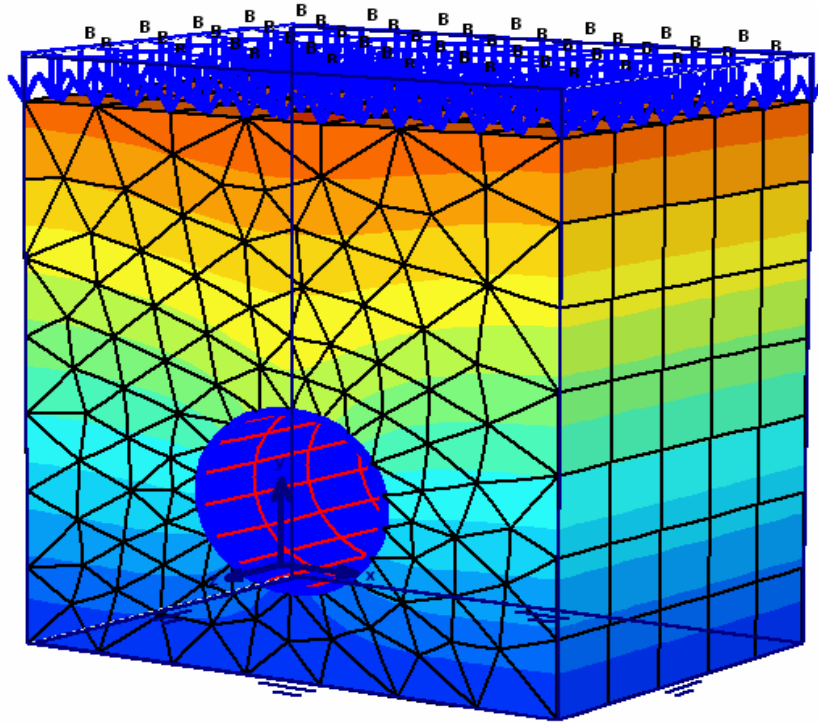
| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 242 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 5432 kN/m                 |
| $\phi$              | 33°                  | EI                  | 0,023 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 39 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

3D ve 2D sonlu elemanlar analizinden elde edilen boru tacının düşey deplasmanı ve en büyük eğilme momenti değerleri Çizelge 10.137'de görülmektedir.

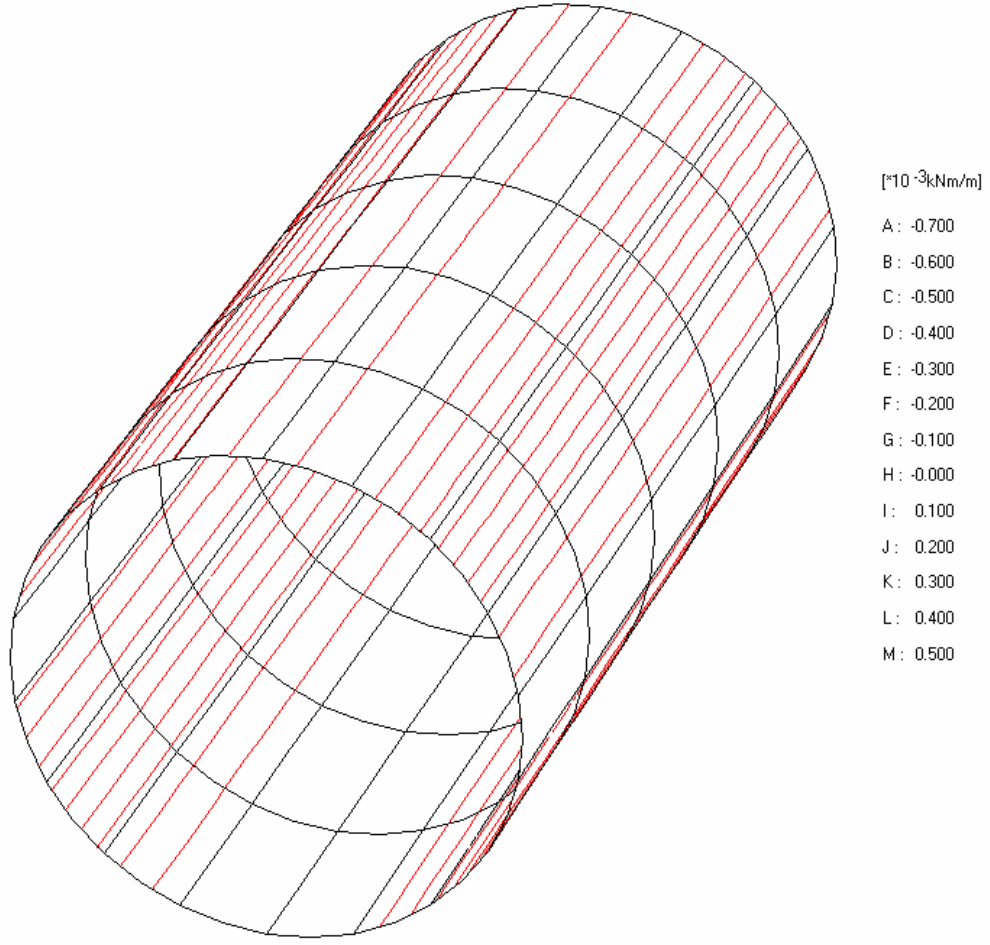
Çizelge 10.137 28 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Düşey Yükleme<br>(kPa) | Boru Tacının $\Delta y$<br>Düşey Yerdeğiştirme (mm) |         | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Momenti (kNm/m) |          |
|------------------------|-----------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------|----------|
|                        | 2D                                                  | 3D      | 2D                                                       | 3D       |
| 40                     | 0.320148                                            | 0.35124 | 0.000759                                                 | 0.00069  |
| 60                     | 0.47149                                             | 0.4983  | 0.0005687                                                | 0.000517 |
| 80                     | 0.622833                                            | 0.64536 | 0.001375                                                 | 0.00125  |
| 100                    | 0.774175                                            | 0.79243 | 0.00165                                                  | 0.0015   |

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 100 kPa yük altında 3D sayısal çözümde boru tacının düşey deplasmanı 0.79 mm hesaplanırken, 2D sayısal analizde 0.77 mm hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizinde 0.0015 kNm/m iken, 2D analizinde bu değer 0.0016 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Şekil 10.35 a'da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği yerdeğişimi ve 10.35 b'de boru kesitinde oluşan eğilme momenti dağılışının üç boyutlu davranışı görülmektedir. Kutu kesiti derinliği boyunca boru ve malzeme özelliklerinin değişmemesi 2D ve 3D analizlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermesinde etkili olmuştur.



a) Geri Dolgu Malzemesinin Toplam Deplasmanı



b) HDPE Boru Kesitinde Oluşan Eğilme Momentleri Dağılımı

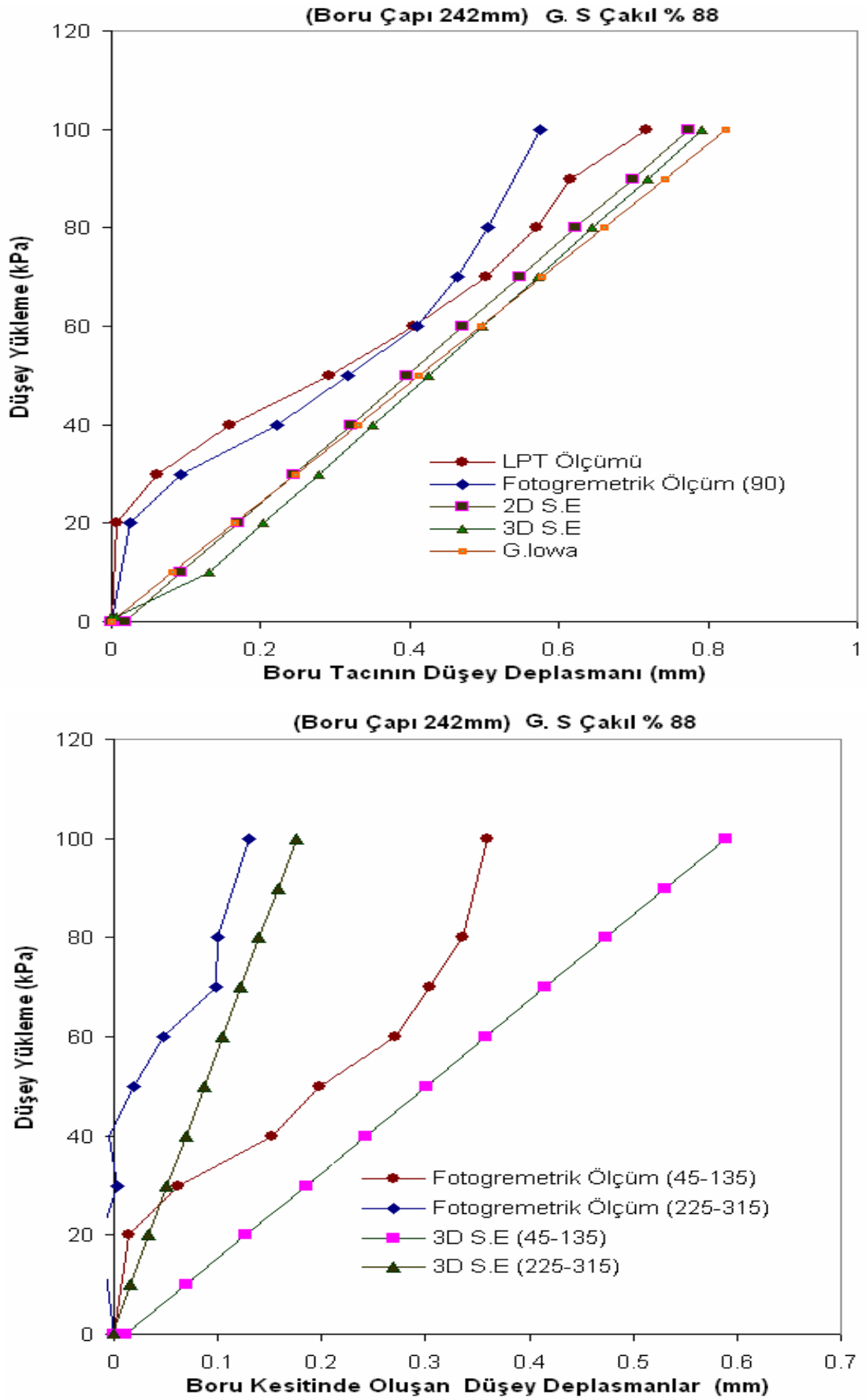
Şekil 10.35 (a,b) 28 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi

Boru kestinin düşey yönde ortaya çıkan yerdeğişimleri sayısal yöntemlerle hesaplanması yanında, fotogrametrik görüntülerden elde edilen boru kalça ve omuzlarındaki düşey deplasmanların 3D sayısal analizleri de yapılmıştır. Çizelge 10.138'de sayısal sonuçlar özetlenmektedir.

Çizelge 10.138 28 No'lu Deneyin Sayısal Analiz Sonuçları

| Boru Çemberinde Oluşan Deplasmanların 3D Nüm. Analizi |                 |                   |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)                                   | Omuz (45°-135°) | Kalça (225°-315°) |
| 20                                                    | 0.127221        | 0.0334766         |
| 40                                                    | 0.242607        | 0.0690335         |
| 60                                                    | 0.357993        | 0.104591          |
| 80                                                    | 0.473379        | 0.140148          |
| 100                                                   | 0.588765        | 0.175705          |

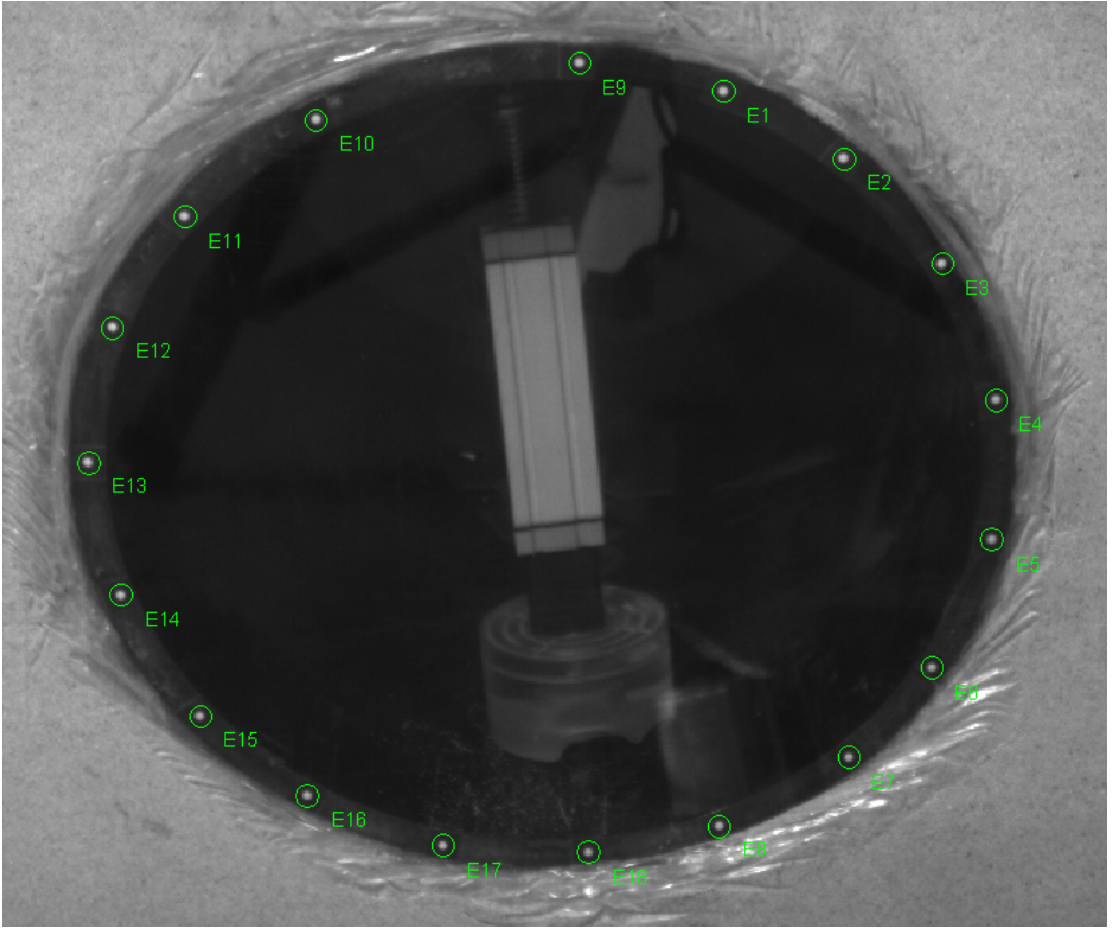
Çizelge 10.138'de görüldüğü gibi 200 mm borunun 100 kPa yük ve % 88 sıklıktaki çakıl ortamındaki sayısal analizlerinde omuz ve kalça bölgelerinin sırasıyla 0,58 mm ve 0,17 mm deplasman gösterdiği hesaplanmıştır. Bu bölgeye yerleştirilen eşlenik noktaların ise sırasıyla 0.35 mm ve 0.10 mm düşey yönde gösterdikleri fotogrametrik görüntüleme kayıtları elde edilmiştir. Yapılan bütün analizlerin grafiksel gösterimi Şekil 10.36'da görülebilir.



Şekil 10.36 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.5.5 29 No'lu Deney

29 No'lu deneyde 312 mm çapındaki borunun % 88 sıklıktaki kum geri dolgusunda ve 100 kPa düşey yükleme altındaki ekil değişimi LPT lm aygıtı ve fotogrametrik görüntüleme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla incelenen borunun n yüzüne şekil 10.37 ' de görüldüğü gibi numaralandırılmış 18 farklı eşlenik nokta yapıştırılmıştır. Deney süresince kameralar eşlenik noktaların  $X,Y$  ve  $Z$  eksenlerindeki deplasmanlarını görüntüleyerek kaydetmiş ve veriler üzerinde uygulanan algoritmik hesaplamalar ile yaklaşık % 2-5 hassasiyette ekil değişimleri belirlenmiştir. 29 No'lu deneyinin, Geliştirilmiş Iowa amprik ve 2D,3D sonlu elemanlar sayısal yöntemleri kullanılarak matematiksel analizleri gerçekleştirilmiştir.



şekil 10.37 29 No'lu Deneyin Eşlenik Noktaları

Çizelge 10.140’da 312 mm HDPE borunun 45,90,135,225, ve 315 noktaların fotogrametrik görüntüleme yönteminde elde edilen düşey deplasmanları ve düşey ekseninde yerleştirilen LPT ölçüm aygıtından alınan deney verilerinin toplu gösterimi bulunmaktadır.

Çizelge 10.139 29 No’lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi

| Düşey Yükleme<br>(kPa) | Eşlenik Noktaların Düşey Deplasmanı (mm) |        |         |          |          | LPT (Ölçüm Aygıtı)<br>Düşey Dep (mm) |
|------------------------|------------------------------------------|--------|---------|----------|----------|--------------------------------------|
|                        | 45(E11)                                  | 90(E2) | 135(E9) | 225(E23) | 315(E24) |                                      |
| 40                     | 0.1924                                   | 0.633  | 0.1713  | 0.0353   | 0.0604   | 0.310635895                          |
| 60                     | 0.3196                                   | 0.825  | 0.2585  | 0.1614   | 0.0589   | 0.628874089                          |
| 80                     | 0.4849                                   | 1.098  | 0.3114  | 0.1463   | 0.1214   | 0.886502363                          |
| 100                    | 0.6573                                   | 1.373  | 0.4323  | 0.1568   | 0.1911   | 1.265575087                          |
| 120                    | 0.8791                                   | 1.777  | 0.6166  | 0.3123   | 0.2691   | 1.653497902                          |
| 140                    | 1.0713                                   | 2.09   | 0.7579  | 0.2826   | 0.4143   | 1.970810688                          |
| 150                    | 1.2059                                   | 2.30   | 0.9745  | 0.5017   | 0.3894   | 2.313938386                          |

Çizelge 10.140’da görüldüğü gibi boru tacının deplasmanı LPT ölçümünde 2,31 mm olarak saptanırken, fotogrametrik ölçümde deplasman 2,30 mm olarak görüntülenmiştir.

#### i) 29 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

29 No’lu deneyin G.Iowa yöntemi eşitliği kullanılarak çözümü yapılmıştır. Bağıntılarda yer alan değişkenlerin büyüklükleri Çizelge 10.140’de analiz sonuçları ise 10.141’de gösterilmektedir.

Çizelge 10.140 29 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| $D_L$ | Gecikme Faktörü (1.0)                |
| $K$   | Yatak Katsayısı (0.083)              |
| $P_c$ | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (150 kPa)  |
| $E_p$ | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa) |
| $I$   | Atalet Momenti ( $1.83E-7$ ) $m^4/m$ |
| $E_s$ | Zeminin İkincil Young Modülü 23 MPa  |

Çizelge 10.141 29 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 20                         | 34.13    | 23          | 0.083 | 0.35818         |
| 40                         | 34.13    | 23          | 0.083 | 0.71636         |
| 60                         | 34.13    | 23          | 0.083 | 1.07454         |
| 80                         | 34.13    | 23          | 0.083 | 1.43272         |
| 100                        | 34.13    | 23          | 0.083 | 1.79090         |
| 150                        | 34.13    | 23          | 0.083 | 2.68635         |

### ii) 29 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

29 No'lu deneyin sayısal analizlerinde 2 ve 3 boyutlu analizler birlikte yapılmıştır Kullanılan zemin ve boru özellikleri Çizelge 10.142'de görülmektedir.

Çizelge 10.142 29 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı    |
|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                     |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                   |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 4640 kN/m                |
| $\phi$              | 33°                  | EI                  | 0,115kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_s$               | 23 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                     |

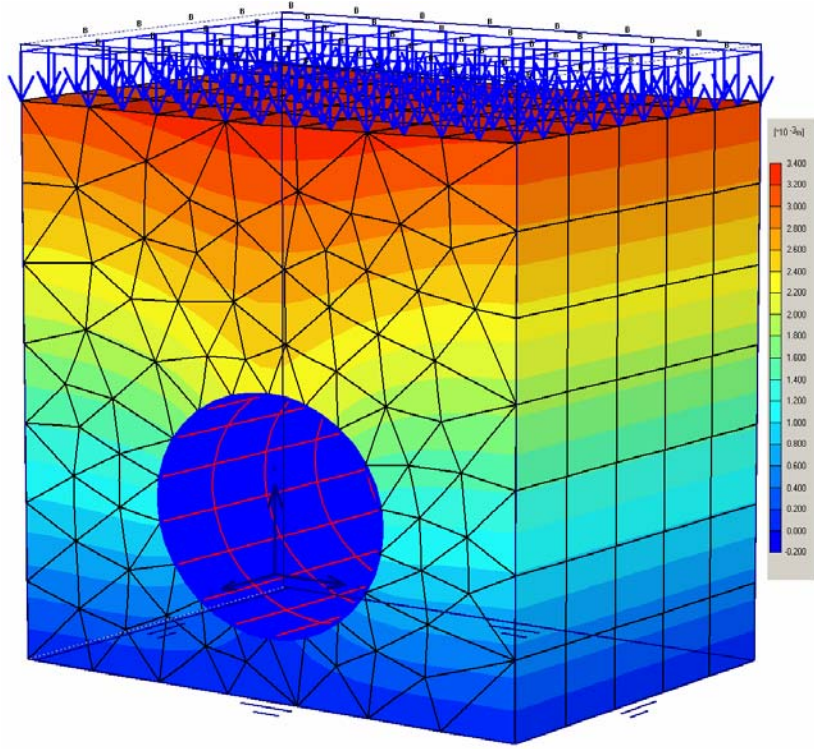
Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen boru tacının düşey yerdeğişimi ve en büyük eğilme momenti değerleri Çizelge 10.143'de görülmektedir.



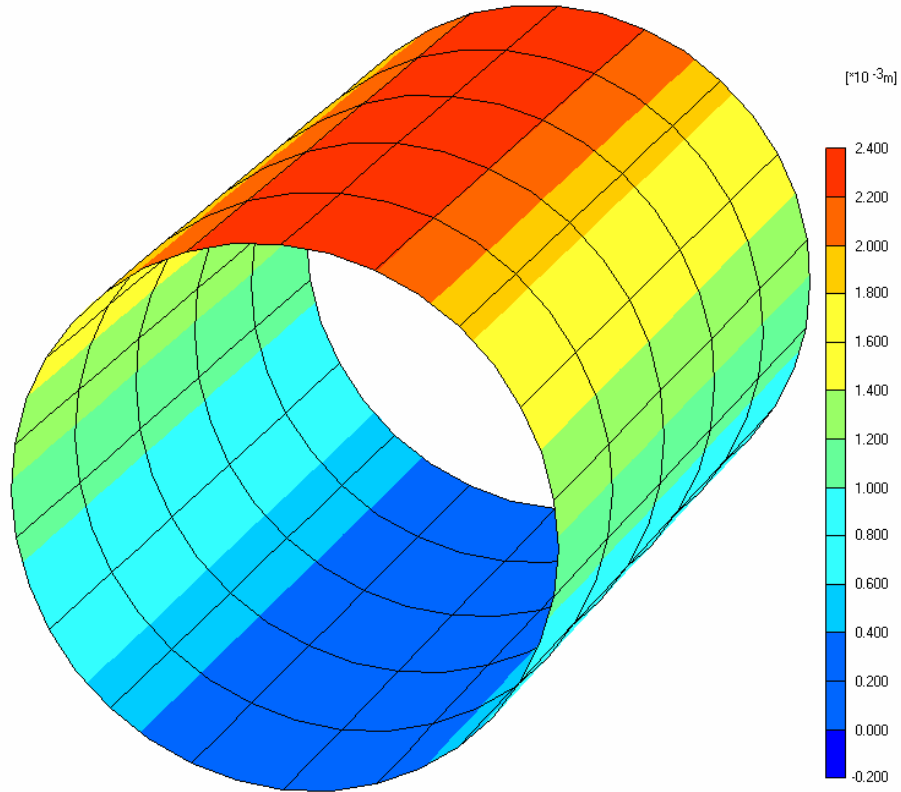
Çizelge 10.143 29 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

| Düşey<br>Yüklemeye<br>(kPa) | Boru Tacının<br>Düşey Deplasmanı (mm) |          | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Momenti (kNm/m) |         |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------|---------|
|                             | 2D                                    | 3D       | 2D                                                       | 3D      |
| 50                          | 0.965787                              | 0.856191 | 0.0011125                                                | 0.00089 |
| 70                          | 1.33338                               | 1.15603  | 0.0087125                                                | 0.00697 |
| 90                          | 1.70098                               | 1.45588  | 0.0112125                                                | 0.00897 |
| 100                         | 1.88478                               | 1.6058   | 0.012125                                                 | 0.0097  |
| 120                         | 2.25238                               | 1.90564  | 0.014                                                    | 0.0112  |
| 130                         | 2.43617                               | 2.05556  | 0.015375                                                 | 0.0123  |
| 140                         | 2.61997                               | 2.20548  | 0.01725                                                  | 0.0138  |
| 150                         | 2.80377                               | 2.40548  | 0.018125                                                 | 0.0145  |

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 150 kPa yük altında 3D analizde boru tacının düşey deplasmanı 2.40 mm hesaplanırken, 2D analizde 2.80 mm hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizinde 0.0145 kNm/m iken, 2D analizinde bu değer 0.0181 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal modeller sonucunda, Şekil 10.38 a'da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği deplasman davranışının ve 10.38 b'de boru kesitinde oluşan düşey deplasman görülmektedir. Kutu kesiti uzunluğu boyunca boru ve malzeme özelliklerinin değişmemesi 2D ve 3D analizlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermesinde etkili olmuştur.



a) Geri Dolgu Malzemesinin Toplam Deplasmanı



b) HDPE Boru Kesitinde Oluşan Düşey Deplasmanların Dağılımı.

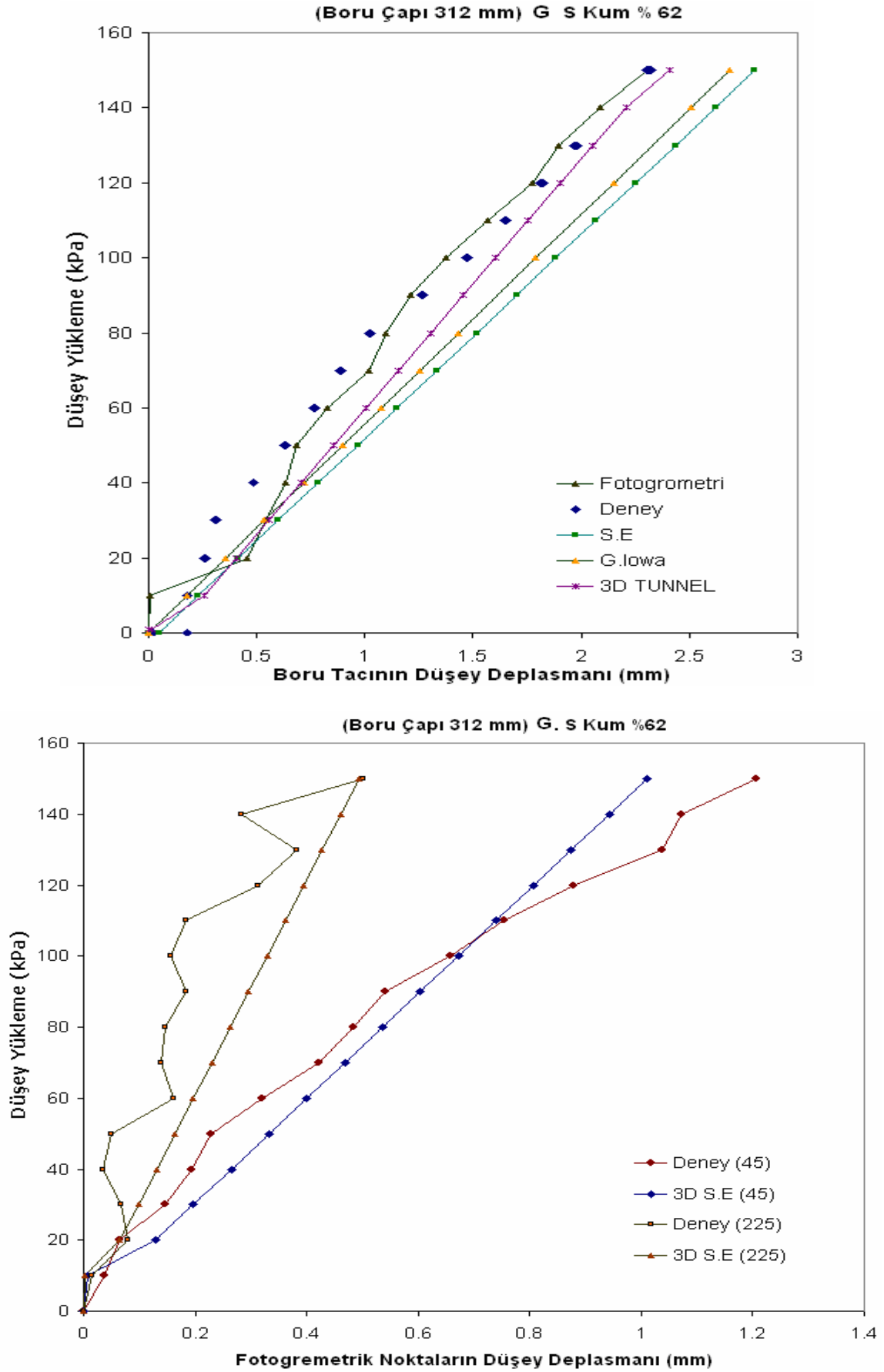
Şekil 10.38 (a,b) 29 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi

Boru kestinin düşey yönde ortaya çıkan deplasmanların sayısal yöntemlerle hesaplanması yanında, fotogrametrik görüntülerden elde edilen boru kalça ve omuzlarındaki düşey deplasmanların 3D sayısal analizleri de yapılmıştır. Çizelge 10.144’de sayısal sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 10.144 29No’lu Deneyde Boru Kesitinde Oluşan Deplasmanların Sayısal Analizleri

| Boru Çemberinde Oluşan Deplasmanların 3D Nüm. Analizi |                 |                   |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)                                   | Omuz (45°-135°) | Kalça (225°-315°) |
| 20                                                    | 0.197157        | 0.0789            |
| 40                                                    | 0.332721        | 0.0353            |
| 60                                                    | 0.468285        | 0.1614            |
| 80                                                    | 0.603849        | 0.1463            |
| 100                                                   | 0.739413        | 0.1568            |
| 120                                                   | 0.874976        | 0.3123            |
| 140                                                   | 1.01054         | 0.2826            |
| 150                                                   | 1.07832         | 0.5017            |

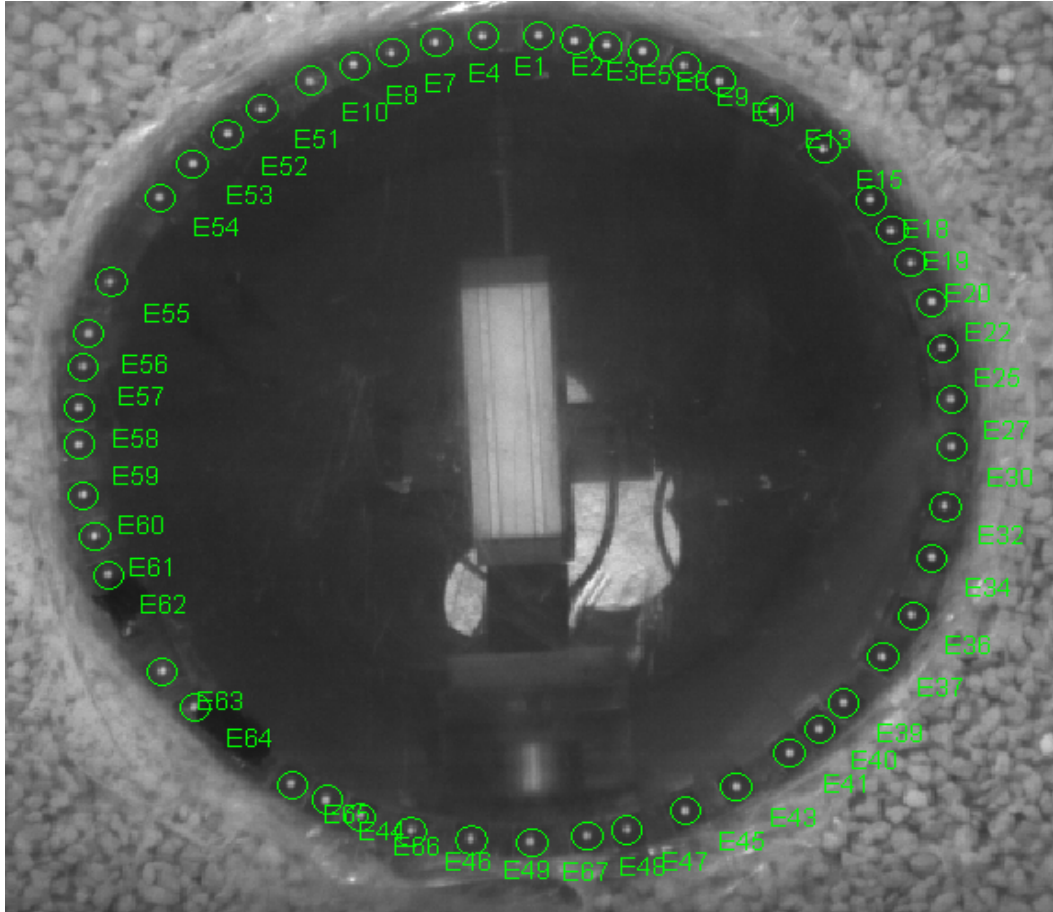
Çizelge 10.144’de görüldüğü gibi boru kesitinde omuz ve kalça bölgelerinin sırasıyla 0,58 mm ve 0,17 mm deplasman gösterdiği hesaplanmıştır. Bu bölgeye yerleştirilen eşlenik noktaların ise sırasıyla 0.35 mm ve 0.10 mm düşey yönde gösterdikleri fotogrametrik görüntüleme kayıtları elde edilmiştir. Yapılan bütün analizlerin grafiksel gösterimi Şekil 10.39’da görülebilir.



Şekil 10.39 29 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.5.6 30 No'lu Deney

30 No'lu deneyde 312 mm çapındaki borunun % 90 sıklıktaki çakıl geri dolgusunda ve 100 kPa düşey yükleme altındaki ekil değişimi LPT lm aygıtı ve fotogremetrik görüntüleme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla incelenen borunun n yüzüne şekil 10.40' da görüldüğü gibi numaralandırılmış 21 farklı eşlenik nokta yapıştırılmıştır. Deney süresince kameralar eşlenik noktaların  $X,Y$  ve  $Z$  eksenlerindeki deplasmanlarını görüntüleyerek kaydetmiş ve veriler üzerinde uygulanan algoritmik hesaplamalar ile yaklaşık % 2-6 hassasiyette ekil değişimleri belirlenmiştir. 30 No'lu deneyin, deney koşulları geri dolgu ve yükleme zellikleri Geliştirilmiş Iowa amprik ve 2D,3D sayısal yöntemleri kullanılarak sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir.



şekil 10.40 30 No'lu Deneyin Eşlenik Noktaları

Çizelge 10.145’de 200mm HDPE borunun 45°,90°,135°,225°, ve 315° noktaların fotogrametrik görüntüleme yönteminde elde edilen düşey yerdeğişimi ve düşey ekseninde yerleştirilen LPT ölçüm aygıtından alınan deney verilerin toplu gösterimi görülebilir.

Çizelge 10.145 30No’lu Deney Sonuçlarının Toplu Gösterimi

| Düşey Yükleme<br>(kPa) | Eşlenik Noktaların Düşey Deplasmanı (mm) |        |         |          |          | LPT (Ölçüm Aygıtı)<br>Düşey Dep (mm) |
|------------------------|------------------------------------------|--------|---------|----------|----------|--------------------------------------|
|                        | 45(E11)                                  | 90(E2) | 135(E9) | 225(E23) | 315(E24) |                                      |
| 20                     | 0.0312                                   | 0.098  | 0.0799  | 0.0086   | 0.0037   | 0.092221743                          |
| 30                     | 0.0997                                   | 0.195  | 0.1083  | 0.0158   | 0.0029   | 0.208443998                          |
| 40                     | 0.155                                    | 0.271  | 0.2263  | 0.0278   | 0.0179   | 0.345873669                          |
| 50                     | 0.2518                                   | 0.401  | 0.3135  | 0.0731   | 0.047    | 0.51628097                           |
| 60                     | 0.3348                                   | 0.501  | 0.3773  | 0.0889   | 0.067    | 0.64832706                           |
| 70                     | 0.392                                    | 0.619  | 0.4521  | 0.111    | 0.0681   | 0.781117266                          |
| 80                     | 0.4797                                   | 0.745  | 0.5668  | 0.1485   | 0.1095   | 0.917357206                          |
| 90                     | 0.5415                                   | 0.829  | 0.5222  | 0.1479   | 0.1021   | 1.043236796                          |
| 100                    | 0.5933                                   | 0.903  | 0.592   | 0.1916   | 0.1579   | 1.166399612                          |

Çizelge10.145’de görüldüğü gibi boru tacının yerdeğişimi LPT ölçümünde 1.66 mm olarak saptanırken, fotogrametrik ölçümde deplasman 0.90 mm olarak görüntülenmiştir.

#### i) 30 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Yöntemi ile Analizi

30 No’lu deneyin Geliştirilmiş Iowa yöntemi eşitliği kullanılarak çözümü yapılmıştır. Bağıntıda yeralan değişkenlerin büyüklükleri Çizelge 10.146’da gösterilmektedir.

Çizelge 10.146 30 No’lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizinde Kullanılan Değişkenler

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| D              | Boru Çapı ( 312 mm)                         |
| D <sub>L</sub> | Gecikme Faktörü (1.0)                       |
| K              | Yatak Katsayısı (0.083)                     |
| P <sub>c</sub> | Uygulanan Düşey Yük (kPa) (110 kPa)         |
| E <sub>p</sub> | HDPE borunun Young Modülü ( 900 MPa)        |
| I              | Atalet Momenti ( 1.83E-7) m <sup>4</sup> /m |
| E <sub>s</sub> | Zeminin Young Modülü 40 MPa                 |

30 No'lu deneyin Geliştirilmiş Iowa Eşitliği analizinden, 312 mm çapındaki borunun 150 kPa yük altında 1.57 mm düşey deplasman gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Her bir yükleme adımındaki diğer deplasmanlar Çizelge 10.147'de özetlenmiştir.

Çizelge 10.147 30 No'lu Deneyin Geliştirilmiş Iowa Analizi Sonuçları

| Geliştirilmiş Iowa Yöntemi |          |             |       |                 |
|----------------------------|----------|-------------|-------|-----------------|
| $P_c$ (kPa)                | $EI/r^3$ | $E_s$ (MPa) | (K)   | $\Delta y$ (mm) |
| 20                         | 34.13    | 40          | 0.083 | 0.209334        |
| 40                         | 34.13    | 40          | 0.083 | 0.418668        |
| 60                         | 34.13    | 40          | 0.083 | 0.628003        |
| 80                         | 34.13    | 40          | 0.083 | 0.837337        |
| 100                        | 34.13    | 40          | 0.083 | 1.046671        |
| 150                        | 34.13    | 40          | 0.083 | 1.570006        |

## ii) 30 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi

Deneyin sayısal analizlerinde 2 boyutlu 3 boyutlu analizler birlikte yapılmıştır. 30 No'lu deneyin 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizlerinde kullanılan zemin ve boru özellikleri Çizelge 10.148'de görülmektedir.

Çizelge 10.148 30 No'lu Deneyin Sayısal Analizlerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

| Zemin Modeli        | Mohr-Coulomb         | Boru Modeli         | Elastik Kiriş Elamanı     |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Zemin               | Kum                  | Boru                | HDPE                      |
| $\gamma_{kuru}$     | 17 kN/m <sup>3</sup> | D                   | 312 mm                    |
| Poisson Oranı $\nu$ | 0.33                 | EA                  | 4640 kN/m                 |
| $\phi$              | 33°                  | EI                  | 0.115 kNm <sup>2</sup> /m |
| $E_{50}$            | 40 MPa               | Poisson Oranı $\nu$ | 0.40                      |

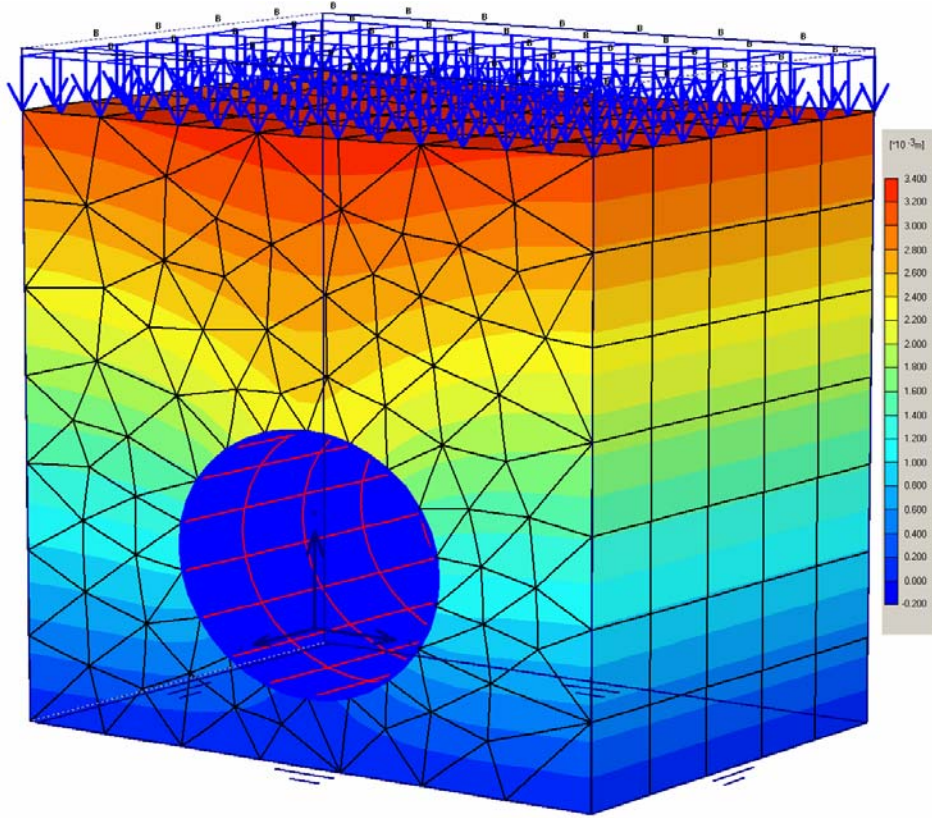
3D ve 2D sonlu elemanlar analizinden elde edilen boru tacının düşey yerdeğişimi ve en büyük eğilme momenti değerleri Çizelge 10.149'da görülmektedir.

Çizelge 10.149 30 No'lu Deneyin Sonlu Elemanlar Sayısal Analizi Sonuçları

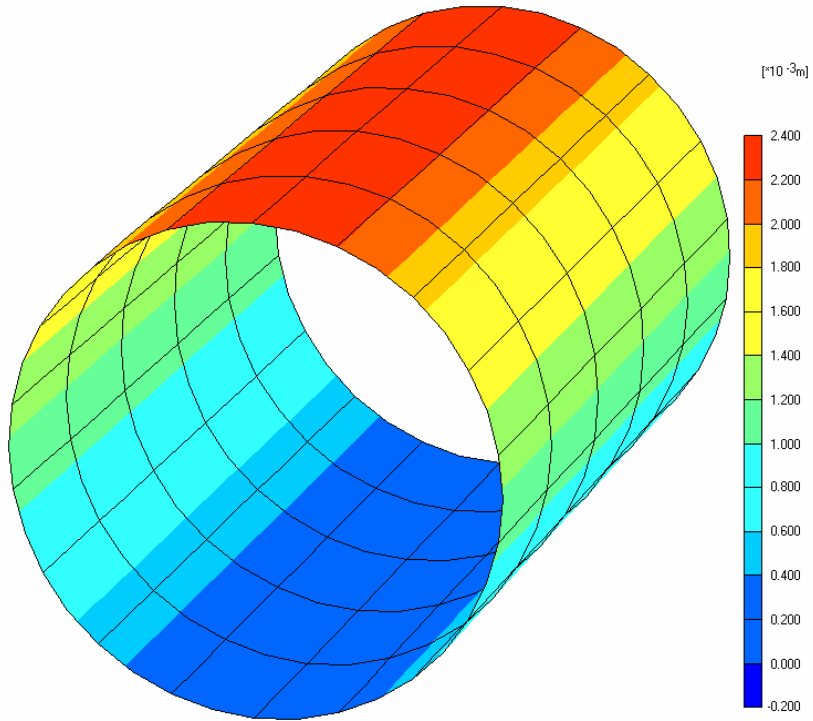
| Düşey<br>Yüklemeye (kPa) | Boru Tacının<br>Düşey Deplasmanı (mm) |           | Boru Kesitinde Oluşan En Büyük<br>Eğilme Momenti (kNm/m) |         |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|---------|
|                          | 2D                                    | 3D        | 2D                                                       | 3D      |
| 10                       | 0.155901                              | 0.0101467 | 0                                                        | 0       |
| 20                       | 0.277454                              | 0.173313  | 0.00094                                                  | 0.001   |
| 30                       | 0.399007                              | 0.27478   | 0.00162                                                  | 0.00161 |
| 40                       | 0.520559                              | 0.376247  | 0.0023                                                   | 0.00221 |
| 50                       | 0.642112                              | 0.477715  | 0.00298                                                  | 0.00281 |
| 60                       | 0.763665                              | 0.579182  | 0.00366                                                  | 0.00342 |
| 70                       | 0.885218                              | 0.680649  | 0.00434                                                  | 0.00402 |
| 80                       | 1.00677                               | 0.782116  | 0.00502                                                  | 0.00462 |
| 90                       | 1.12832                               | 0.883583  | 0.00569                                                  | 0.00523 |
| 90                       | 1.12832                               | 0.98505   | 0.00648                                                  | 0.00583 |
| 100                      | 1.24988                               | 1.08652   | 0.00716                                                  | 0.00643 |

Aynı yükleme ve malzeme değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerde 100 kPa yük altında 3D analizde boru tacının düşey deplasmanı 1.08 mm hesaplanırken, 2D analizde 1.24 mm hesaplanmıştır. Bununla birlikte boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momenti büyüklükleri 3D analizinde 0.0064 kNm/m iken, 2D analizinde bu değer 0.0071 kNm/m olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal modeller sonucunda, Şekil 10.41 a'da geri dolgu malzemesinin düşey yönde gösterdiği deplasmanın ve 10.41 b'de boru kesitinde oluşan eğilme momenti dağılışının üç boyutlu davranışı görülmektedir. Kutu kesiti uzunluğu boyunca boru ve malzeme özelliklerinin değişmemesi 2D ve 3D analizlerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermesinde etkili olmuştur.





a) Geri Dolgu Malzemesinin Toplam Deplasmanı



b) HDPE Boru Kesitinde Oluşan Düşey Yöndeki Yerdeğişimleri

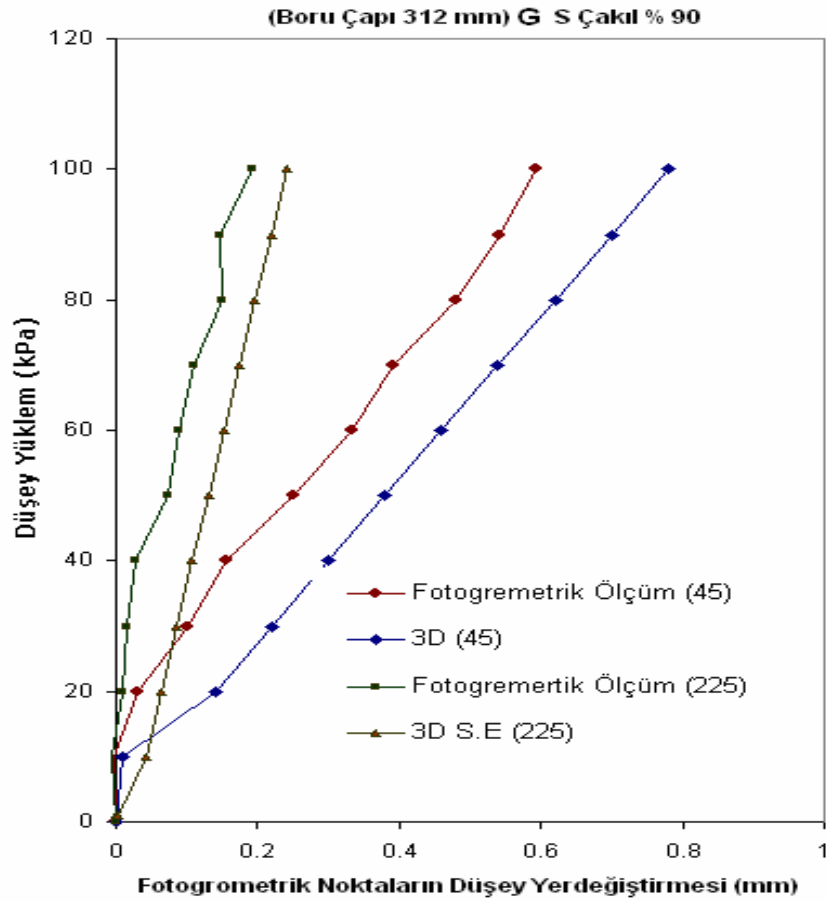
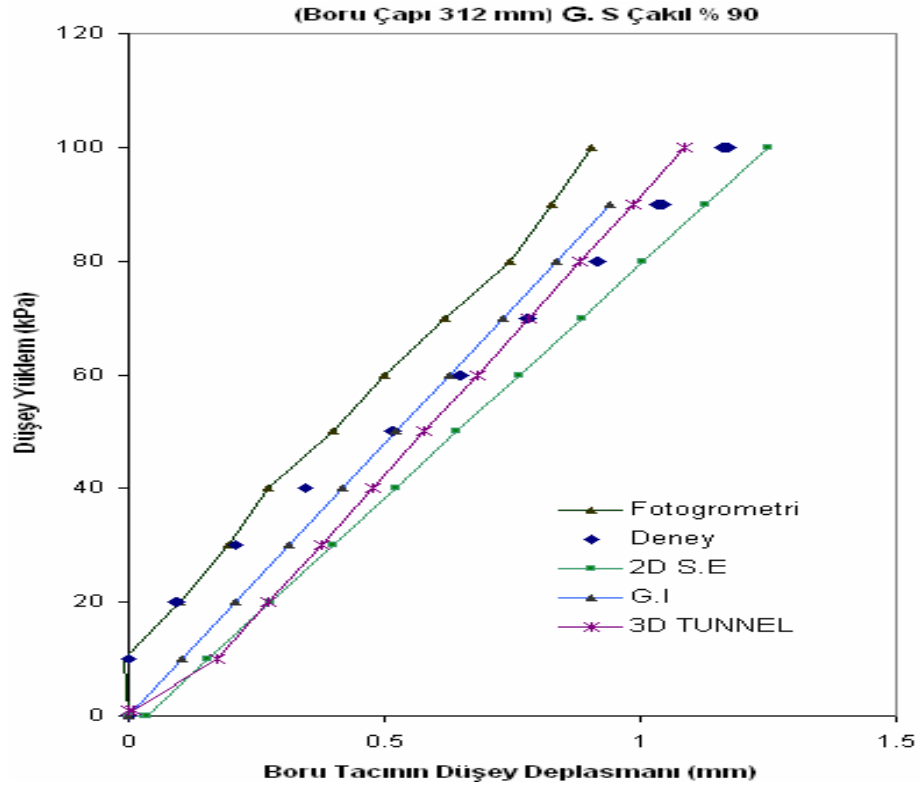
Şekil 10.41 (a,b) 30 No'lu Deneyin Üç Boyutlu Sayısal Analizi

Boru kestinin düşey yönde ortaya çıkan deplasmanların sayısal yöntemlerle hesaplanması yanında, fotogrametrik görüntülerden elde edilen boru bel ve omuzlarındaki düşey deplasmanların 3D sayısal analizleri de yapılmıştır. Çizelge 10.150’de sayısal sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 10.150 30 No’lu Deyede Omuz ve Bel Bölgelerindeki Düşey Yerdeğişimlerinin Sayısal Analizi

| Boru Çemberinde Oluşan Deplasmanların 3D Nüm. Analizi |                 |                   |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Düşey Yükleme (kPa)                                   | Omuz (45°-135°) | Kalça (225°-315°) |
| 10                                                    | 0,040           | 0,009             |
| 20                                                    | 0,058           | 0,131             |
| 30                                                    | 0,086           | 0,220             |
| 40                                                    | 0,104           | 0,294             |
| 50                                                    | 0,125           | 0,379             |
| 60                                                    | 0,150           | 0,456             |
| 70                                                    | 0,171           | 0,544             |
| 80                                                    | 0,193           | 0,621             |
| 90                                                    | 0,211           | 0,700             |
| 100                                                   | 0,239           | 0,780             |

Çizelge 10.150’de görüldüğü gibi boru kesitinde omuz ve kalça bölgelerinin sırasıyla 0,23 mm ve 0,78 mm deplasman gösterdiği hesaplanmıştır. Bu bölgeye yerleştirilen eşlenik noktaların ise sırasıyla 0.19 mm ve 0.59 mm düşey yönde gösterdikleri fotogrametrik görüntüleme kayıtları elde edilmiştir. Yapılan bütün analizlerin grafiksel gösterimi Şekil 10.42’de görülebilir.



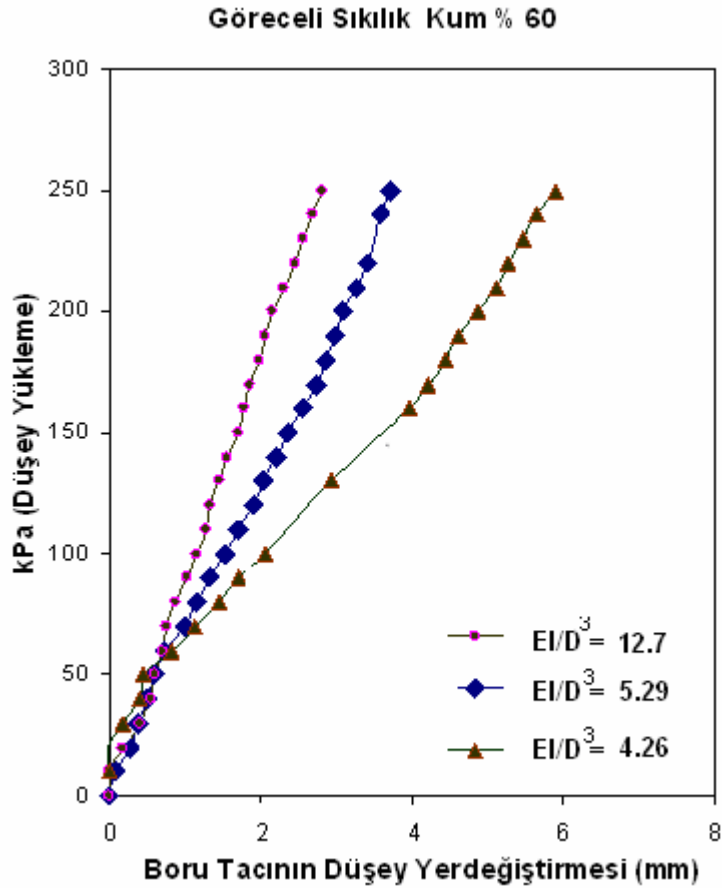
Şekil 10.42 30 No'lu Deneyin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### 10.6 Deneylerin Genel Değerlendirilmesi

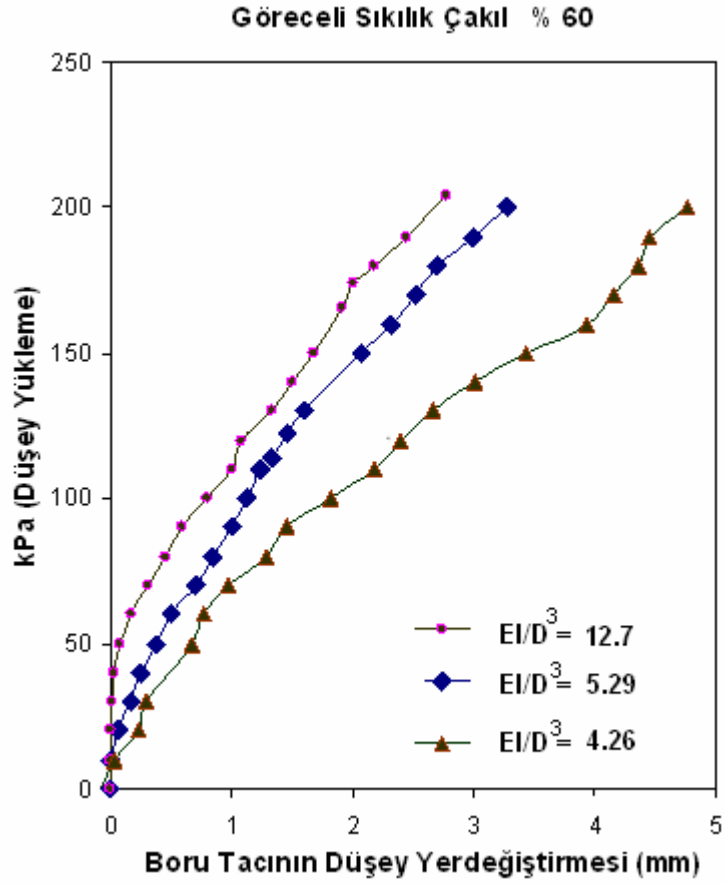
Bu çalışmada laboratuvar koşullarında hazırlanan bir deney düzeneği ile hendek ortamlarına yerleştirilen HDPE boruların davranışı kapsamlı bir inceleme planı ile ele alınmış ve boruların dayanımlarına etkili değişkenlerin incelenmeye çalışıldığı 120' ye yakın deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden 30'unun sunulduğu çalışmada başlıca şu değerlendirmelerde bulunulmuştur.

#### a) Boru Çapının Boru Davranışına Etkisi

Borunun çembersel rijitliği ( $EI/D^3$ ), borunun uzun veya kısa süreli Young Modülüne, et kalınlığına ve boru çapına bağlıdır. Deneysel çalışmalarda 200, 242 ve 312 mm çaplarında sırasıyla 12,10,12 mm et kalınlığında üç farklı HDPE boru kullanılmıştır. Boru çapı ve et kalınlığının boru davranışına olan etkisini belirleyebilmek amacıyla yaklaşık olarak eşit göreceli sıklıkta model kutusuna yerleştirilen kum ve çakıl geri dolgu ortamlarında ve eşit yükleme koşullarında deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 10.43 ve Şekil 10.44'de görülmektedir.



Şekil 10.43 Boru Çapının Boru Davranışına Olan Etkisi

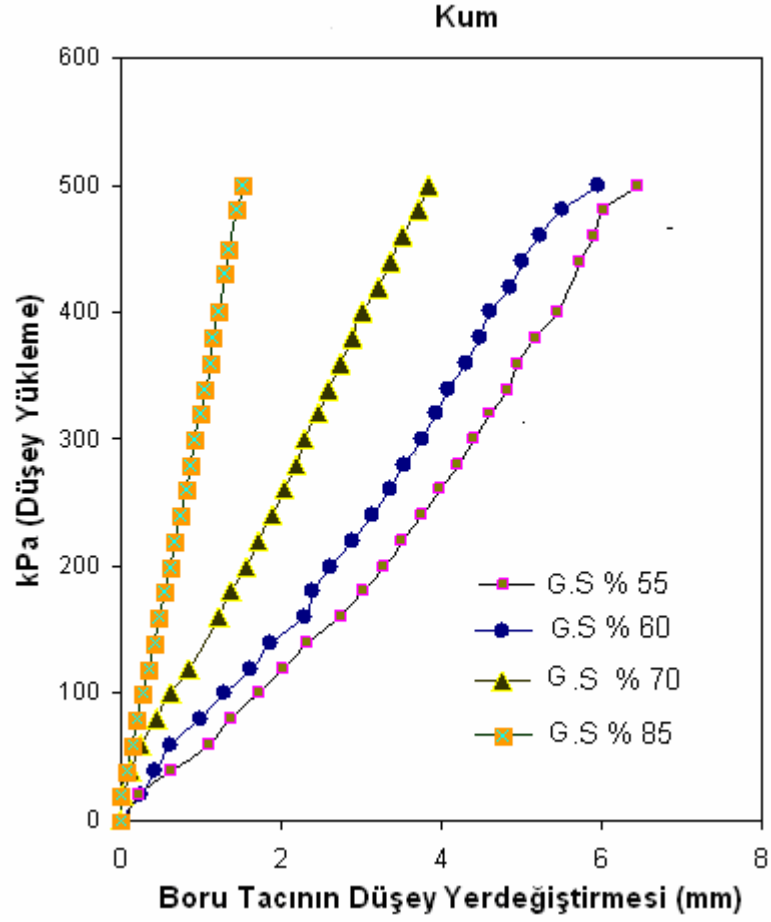


Şekil 10.44 Boru Çapının Boru Davranışına Olan Etkisi

Şekillerden görüldüğü gibi % 60 göreceli sıkılıktaki kum ve çakıl geri dolgusuna yerleştirilen boruların  $EI/D^3$  çembersel rijitlikleri arttıkça düşey yüklemeler altındaki şekil değişimleri azalmaktadır.

b) Geri Dolgu Malzemesi Sıkılığının Boru Davranışına Etkisi

Spangler (1941)'in üzerinde durduğu gibi, hendek ortamına etkiyen yükler, geri dolgu malzemesi ve boru rijitlikleri tarafından birlikte karşılanır. Bu bakımdan geri dolgu malzemesinin göreceli sıkılığının boru davranışında belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Bu etkinin niteliğini saptayabilmek amacıyla eşit yükleme koşullarında ve farklı göreceli sıkılıklarda bir dizi deney yapılmıştır. Geri dolgu sıkılığı ile boru davranışının göz önüne alındığı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 10.45'de görülmektedir.

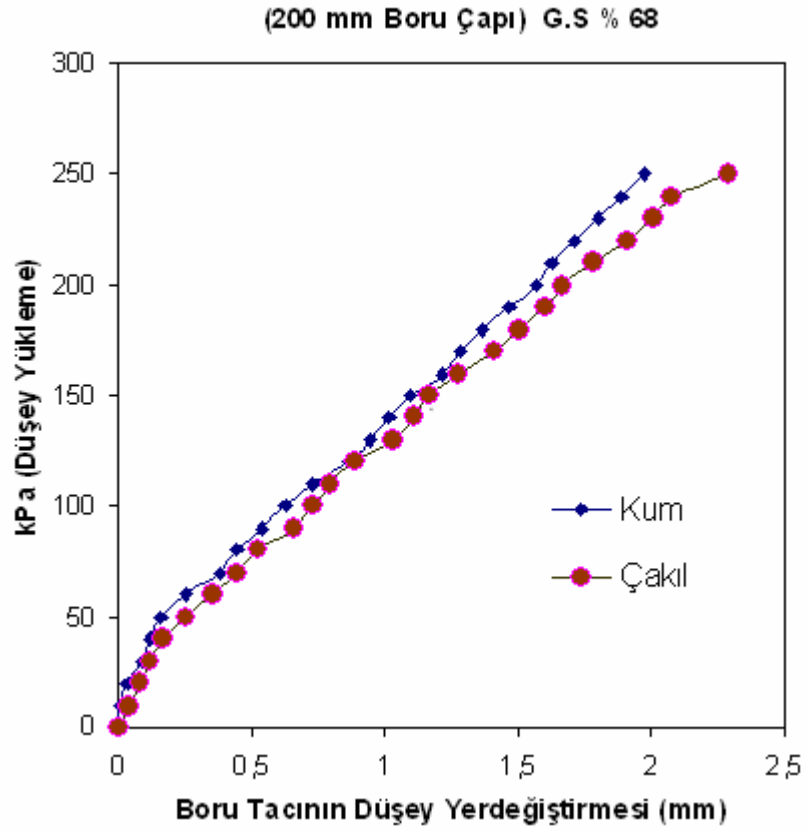


Şekil 10.45 Geri Dolgu Malzemesi Göreceli Sıkılığının Boru Davranışına Etkisi

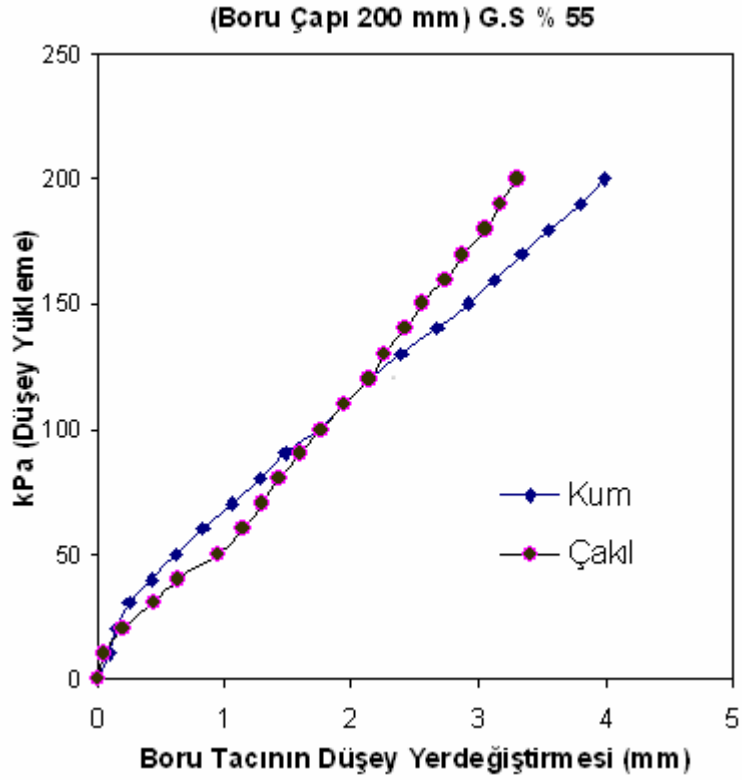
% 55, %60, %70 ve %85 sıkılıklarda yerleştirilen geri dolgu ortamlarındaki 200 mm çaplı HDPE borunun davranışı Şekil10.45’de görülmektedir. Sıkılık arttıkça boru tacının düşey yönde gösterdiği yerdeğiştirme belirgin olarak azalmakta ve boru dayanımı artmaktadır.

c) Geri Dolgu Malzemesi Türünün Boru Davranışına Etkisi

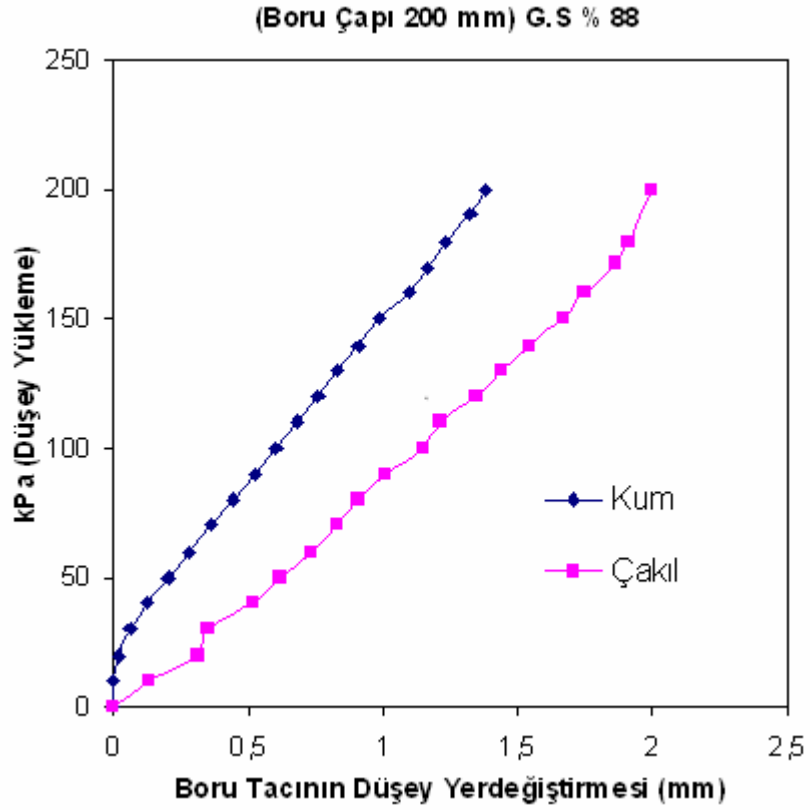
İnceleme kapsamında, eşit göreceli sıkılık koşullarında yerleştirilen HDPE boruların farklı geri dolgu ortamlarında gösterdikleri davranış değerlendirilmiş ve Şekil 10.46, 10.47 ve 10.48’de görülen grafikler elde edilmiştir.



Şekil 10.46 Dolgu Malzemesi Türünün Boru Davranışına Olan Etkisi



Şekil 10.47 Geri Dolgu Malzemesi Türünün Boru Davranışına Olan Etkisi

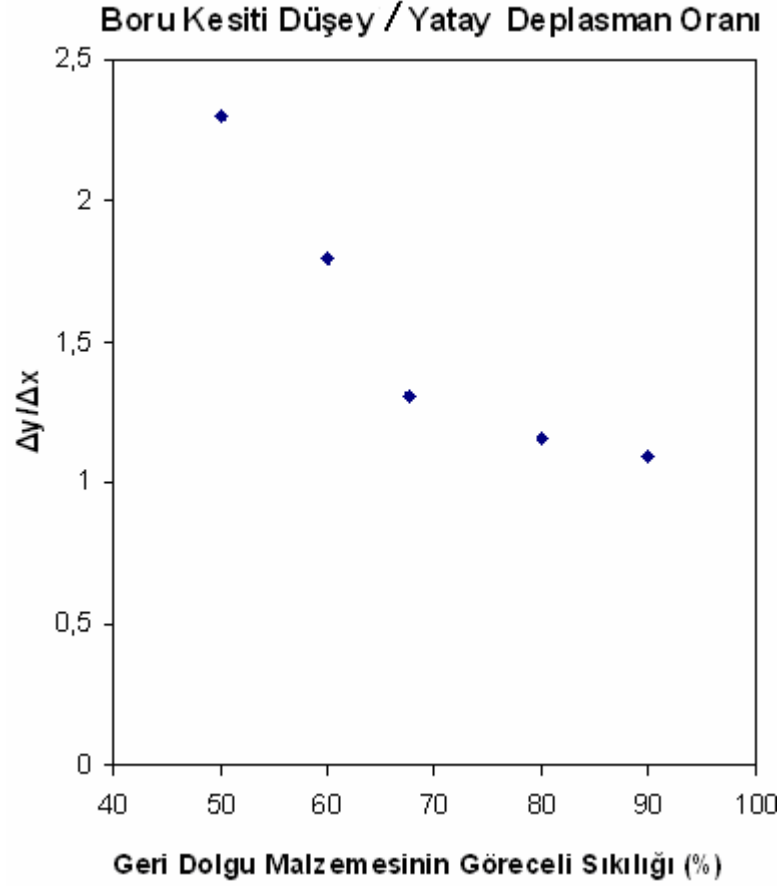


Şekil 10.48 Geri Dolgu Malzemesi Türünün Boru Davranışına Olan Etkisi

Şekiller 10.46,47 ve 48’de görüldüğü gibi aynı sıklık yüzdelere sahip çakıl ve kum geri dolgu ortamlarına yerleştirilen 200, 242 ve 312 mm çaplı HDPE borular aynı yüklemeler altında yaklaşık olarak eşit yerdeğişimleri ortaya koymaktadır.

Diğer yandan geri dolgu malzemesinin sıklığı arttıkça HDPE boruda oluşan şekil değişimleri farklılaşmaktadır. Düşük göreceli sıklıklarda boru çemberi kalp veya basık portakal biçiminde deforme olurken, yüksek göreceli sıklıklarda düşey ve yanal ekseninde birbirine yakın oranlarda (tam elipsoit) deformasyon gösterdikleri saptanmıştır. Sıklık derecesinin artışı ile boru şekil değişimi biçimi arasındaki bağıntı Şekil 10.49’da görülmektedir.

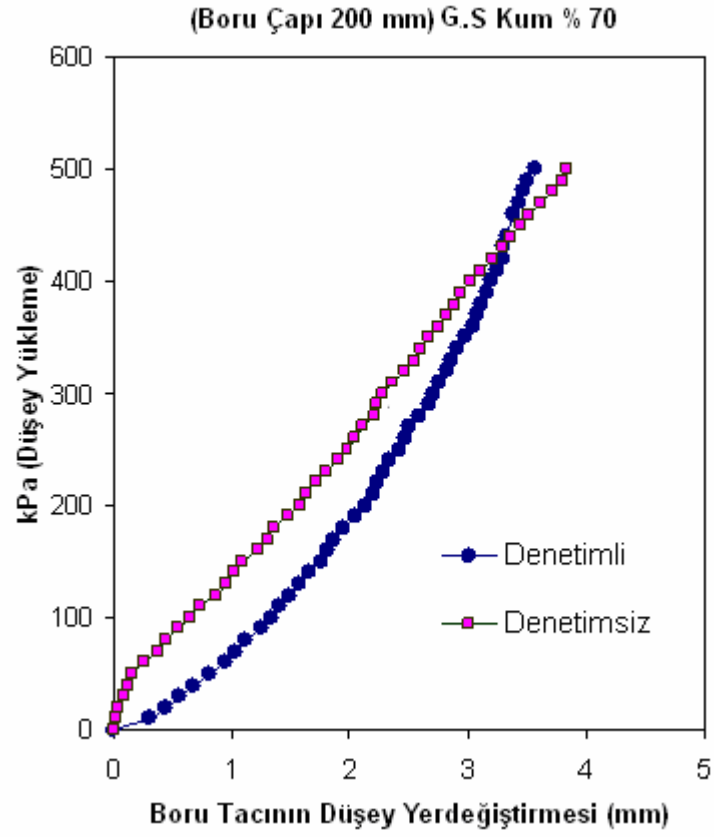




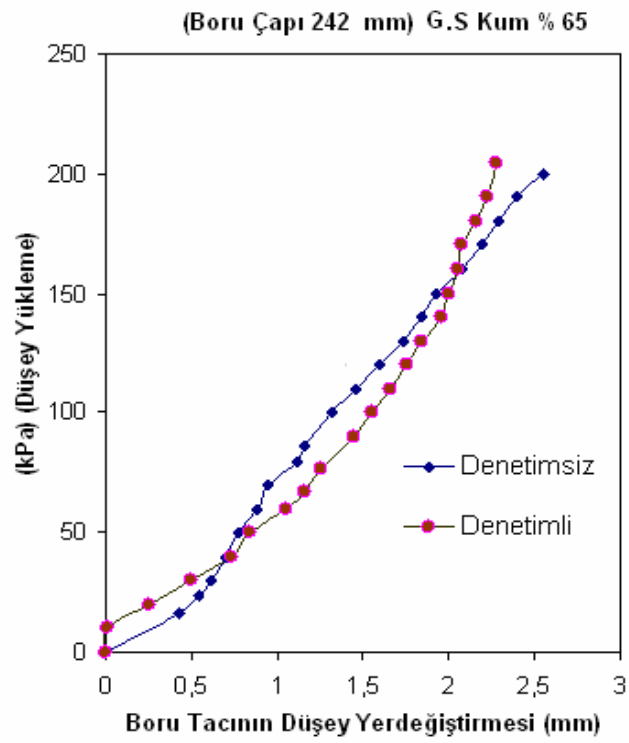
Şekil 10.49 Geri Dolgu Malzemesi Boru Çember Kesitinin Şekil Değişimine Etkisi

d) Yerleştirme Koşullarının Boru Davranışına Olan Etkisi

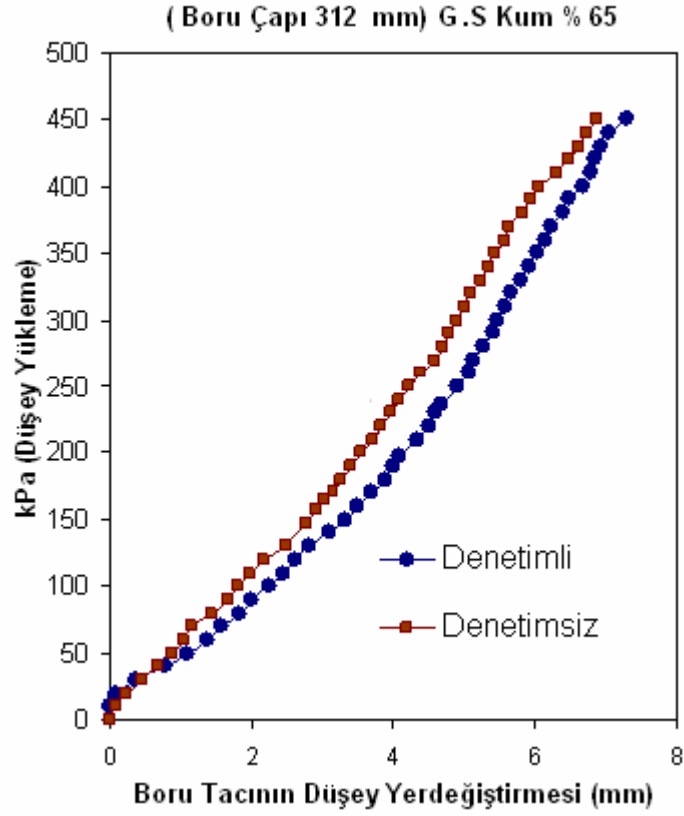
Geri dolgu malzemesinin hendek ortamına yerleştirilme biçiminin, boru davranışına olan etkisinin incelenmesi amacıyla deneysel çalışmalarda denetimli ve denetimsiz yerleştirme yöntemleri uygulanmıştır. Yağmurlama sistemi kullanılarak yerleştirilen denetimli dolgularda üniform bir dolgu ortamı oluşturulmuştur. Diğer yandan serbest döküm yöntemi ile üniform olmayan geri dolgu ortamları oluşturularak denetimsiz yerleştirme koşulları sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 10.50, 10.51 ve 10.52’de görülmektedir.



Şekil 10.50 Geri Dolgu Yerleştirme Biçiminin Boru Davranışına Olan Etkisi



Şekil 10.51 Geri Dolgu Yerleştirme Biçiminin Boru Davranışına Olan Etkisi



Şekil 10.52 Geri Dolgu Yerleştirme Biçiminin Boru Davranışına Olan Etkisi

Şekillerde görüldüğü gibi yerleştirme biçiminin nihai boru davranışında belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak yük-yerdeğişim eğrilerine özenle bakıldığında denetimsiz dolgu ortamlarında boru tacının düşey yerdeğişimi doğrusal bir eğimde artarken, denetimli dolgu ortamlarında bu davranış hiperbolik bir fonksiyon eğiminde oluştuğu görülmektedir.

## 11. SONUÇLAR

Tubitak tarafından desteklenen bu çalışmada, hendek ortamına yerleştirilen gömülü esnek boruların düşey ve yanal yüklemeler altında gösterdiği davranış, laboratuvar ortamında hazırlanan bir deney sistemi kullanılarak incelenmiştir.

10 Bölümden oluşan çalışmanın Giriş bölümünde yürütülen çalışmalar hakkında özet bilgiler verilmiştir. 2. bölümde gömülü borular hakkında genel bilgiler sunulmuş ve yük altında gösterdikleri davranış ve göçme biçimleri tanıtılmıştır. Çalışmanın 3. bölümünde gömülü boruların tasarım yöntemleri üzerinde durulmuş, zaman içerisinde geliştirilen, amprik, elastik, viskoelastik ve sonlu elemanlar sayısal yöntemleri anlatılmıştır. 4. bölümde gömülü borular üzerinde yapılmış arazi ve laboratuvar deneyleri tanıtılmış ve çalışmaların genel değerlendirmeleri yapılmıştır. 5. bölümde YTU Geoteknik ABD laboratuvarında kurulan model deney kutusu ve ölçüm sistemi tanıtılmış, tasarım aşamasından, ölçüm aygıtlarının kalibrasyonuna kadar yürütülen deney düzeneğinin kurulum süreci anlatılmıştır. Çalışmanın 6 ve 7. bölümlerinde deneysel çalışmalarda kullanılan zemin ve HDPE boruların mühendislik özellikleri tanıtılmıştır. Çakıl ve kum zemin malzemeleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ve sonuçları özetlenmiş, HDPE boruların malzeme özellikleri üretici firmalardan alınan veriler ışığında tanıtılmıştır. Çalışmanın 8. bölümünde deneysel uygulamaların sonlu elemanlar sayısal analizlerinin yapıldığı PLAXIS 7.2 ve PLAXIS TUNNEL 8.0 programları tanıtılmış ve çözümleme adımlarında kullanılan varsayımlar anlatılmıştır. 9. bölümde ise deneyler sırasında kullanılan fotogrametrik yöntemler üzerinde durulmuştur ve kaynaklarda yer alan inşaat mühendisliği problemlerinde fotogrametrik yöntemlerin uygulamaları anlatılmıştır. Son olarak 10. Bölümde, model hendek kutusunda yapılan 30 adet deneyin sonuçları, sayısal analizleri ve fotogrametrik ölçümleri değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu başlıklarda özetlenebilir;

- 1) Arazi ortamını yansıtmayı amacıyla ASTM ve AASTHO standartlarına bağlı kalınarak tasarlanan deney kutusu,  $K_0$  koşullarını sağlamakta oldukça başarılı olmuş ve yüksek dolgu yükleri altında bile %1 den daha az şekil değişimleri göstermiştir. Bu sayede ek güçlendirmeler kullanılarak rijitliği arttırılan kutu duvarları sayısal yöntemlerin sınır koşullarını oluşturabilmiştir.
- 2) Deneyin tasarım aşamasında boylemsal rijitliğin boru davranışına olan etkisini azaltabilmek için önceki çalışmalardan ve standartlardan yararlanılarak ortalama boru çapının 1.5 katı kadar bir uzunluk seçilmiş ve uzunluk 50 cm olarak belirlenmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalardan ve 3 boyutlu analizlerden elde edilen sonuçlara göre, seçilen uzunluk değeri boylamsal rijitlik etkisini göz ardı edebilecek niteliktedir.
- 3) Deneysel çalışmalarda düşey ve yatay yüklemeler için sertleştirilmiş membran yastıklar kullanılmıştır. İki ayrı membran kumaşın kenarlarından yapıştırılarak yapılan membran yastıklar kısa süreli yüklemelerde 500 kPa basınca kadar dayanım gösterebilmişlerdir.
  - 4) Deneysel çalışmalar, üç farklı boruda, iki farklı yerleştirme biçiminde, iki farklı geri dolgu zemininde ve iki farklı yükleme koşulunda yürütülmüştür. Deneysel çalışmaların değerlendirme bölümünde görüleceği gibi, boru et kalınlığının ve ortalama boru çapının boru davranışında etkili bir değişken olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, geri dolgu malzemesinin sıklık değerinin de davranışta çok etkili bir başka önemli etken olduğu görülmektedir. Sıklık derecesi arttıkça boru deplasman ve eğilme momenti büyüklükleri azalmakta dolayısı ile boru dayanımı artmaktadır. Sıklığın boru davranışına olan bir başka etkisi, sıklığın artmasıyla birlikte düşey/yatay yerdeğişim oranının 1'e yaklaşmasıdır.
  - 5) Laboratuar koşullarında eşdeğer sıklık ve düzgün yerleştirme koşullarının sağlanması için yağmurlama sistemi kullanılmıştır. Bunun yanında geri dolgu malzemesinin yerleştirme biçiminin boru davranışına olan etkisinin değerlendirilebilmesi için, yağmurlama sisteminin kullanılmadığı serbest (denetimsiz) dolgular da oluşturulmuştur. Her iki geri dolgu yerleştirme yönteminde yükleme adımlarına geçilmeden önce yaklaşık olarak boru çemberinde % 0.3-0.7 oranında deplasmanlar ölçülmüştür. Bu yerdeğişim değerlerinin gözardı edilebilir küçüklükte olduğu düşünürse, boru davranışında yerleştirme yönteminin ve sürecinin oldukça az etkili olduğu söylenebilir. Diğer taraftan denetimli ve denetimsiz geri dolgu ortamlarında düşey/yatay deplasmanların ve eğilme momentlerinin oluşumunda önemli bir fark saptanmamıştır.
  - 6) Mikroskobik incelemelere bakıldığında, silis kumunun oldukça ince danelerden ve eşdeğer bir mikro dokudan oluştuğu görülmektedir. Böyle bir dolgu ortamına yerleştirilen gömülü borunun boru-zemin ilişkisi değerlendirildiğinde, zemin mikro dokusunun boru çevresini çepecevre sararak bütünleşik bir davranış göstereceği öngörülebilir. Bunun tersine, çakıl malzemesinin iri köşegenli ve eşdeğer olmayan yüzey dokusu nedeniyle yüksek sıkışma enerjileri altında kalsalar bile boşluklu bir yapı oluşturacağı söylenebilir. Bu bakımdan, çakıl geri dolgusunda bulunan bir boru-zemin arayüzeyinde boyunca süresizlikler doğma olasılığı vardır. Deneysel

çalışmaların ilk adımlarında bu iki farklı arayüzey ortamının, boru çember kesitinde farklı gerilmeler ortaya çıkartacağı düşünülmüştür. Ancak, küçük deplasman yüzdeleri ve küçük yükleme aralıklarında çakıl ve kum geri dolgu ortamlarına yerleştirilmiş borularda belirgin bir farklı davranış biçimi saptanmamıştır. Bu benzerliğin en önemli nedeni; kaynaklarda yer aldığı gibi boru yüzeyinin kıvrımlı değil düz ve düşük sürtünme direncine sahip olması olarak değerlendirilmiştir.

- 7) Deneysel çalışmaların amprik eşitlikler çözümünde Geliştirilmiş Iowa Yöntemi kullanılmıştır. Eşitlikte boru davranışında en belirleyici değişken olan  $E'$  zemin reaksiyonu için, McGrath ve Masada'nın önerdiği  $M_s$  bir boyutlu Sıkışma Modülü yerine, üç eksenli basınç ve plaka yükleme deneylerinden elde edilen  $E_s$  zeminin ikincil Young Modülü kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, zeminin ikincil Young Modülünün, YTU kullanılan model deney sisteminde olduğu gibi  $K_o$  koşullarında ve yüksek sürsarj yükleri uygulamalarında daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Bunun yanında Geliştirilmiş Iowa yönteminin düşey ve yatay deplasmanlar birbirine eşit olarak varsaydığı tam elipsoit deformasyon şeklinden daha farklı olarak, kalp veya basık portakal biçimlerinde davranışlar saptanmıştır. Diğer taraftan boru kesitinde oluşan eğilme momenti büyüklüklerinden anlaşılabileceği gibi zemin pasif itkisi  $100^\circ$  açısız genişlikten daha farklı geometrilere gerilme dağılımlarının olduğu saptanmıştır.
- 8) Deneyleri sayısal olarak modellemesinde PLAXIS 7.2 ve PLAXIS TUNNEL 8.0 sonlu elemanlar paket programları kullanılmıştır. Analizlerde kısa süreli yüklemeler dikkate alınarak Mohr-Coloumb zemin modeli kabul edilmiş ve zeminlerin ikincil Young Modülleri kullanılmıştır. 2 ve 3 boyutlu sayısal analizlerde boru çemberinde ve boyuna doğrultuda oluşan en büyük eğilme momentleri ve düşey yönde oluşan şekil değişimleri hesaplanmıştır. Yürütülen sayısal analizler ve yapılan deneysel çalışmaların sonucunda sonlu elemanlar sayısal yöntemlerin boru davranışlarının belirlenmesinde oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Diğer yandan boru kesitinin düşey yönde gösterdiği deplasman büyüklükleri ve eğilme momenti değerleri yapılan 2 ve 3 boyutlu analizlerde birbirlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Uzunluk boyunca boru ve geri dolgu malzemelerinin değişmemesi 2 ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının birbirlerine yakın değerler vermesinde etkili olmuştur. Bu bakımdan boyuna nitelikleri değişmeyen problemler için 2 boyutlu sayısal analiz yöntemlerinin yeterli nitelikte sonuçlar vereceği söylenebilir. Ancak boru hatları gibi km'lerce süren

yapılar için üç boyutlu sonlu elemanlar analiz yöntemlerinin kullanılması gerektiği açıktır.

- 9) Bu çalışmada son olarak fotogrametrik yöntemler kullanılarak yük etkisi altında kalan bir HDPE borunun şekil değişimi incelenmiştir. Boru çember kesitini ortalama 5'er derecelik aralıklarda yapıştırılan eşlenik noktaların düşey, yanal ve boyuna doğrultudaki şekil değişimleri yüksek çözünürlüklü ve incelikli kameralar yardımıyla görüntülenmiştir. Noktaların fotogrametrik hesaplamalarla bulunan şekil değişimleri boru kesitinin istenilen her noktası için hiçbir ölçüm aygıtı kullanılmadan saptanabilmiştir. Yapılan LPT ve sayısal analizlerde ölçülen fotogrametrik görüntü deplasmanlarının (~%95) oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Fotogrametrik ölçümlere oluşan yanılma payının ise, 40 mm kalınlığındaki pleksiglas camın şeffaflık problemleri göstermesi ve ışın kırınımının istenilen kalibrasyon kalitesinde yapılamaması nedenleri ile ortaya çıktığı düşünülmektedir.

#### ***Gelecek Çalışmalar için Öneriler;***

- 1) Taşıt yükleri, çevrimli yüklemeler, iç basınç etkisindeki vakum yüklemeleri ve deniz altında döşenen borular için hidrostatik yüklemeler etkisinde kalan boruların davranışları farklı deney sistemleri kullanılarak laboratuvar ortamında incelenmesi denenebilir.
- 2) Homojen olmayan yataklama ortamları değerlendirilebilir ve uzunluk boyunca farklı yataklama koşullarının modellenmesi yapılabilir.
- 3) Aşırı yüklemeler altında kalan HDPE borularda ortaya çıkan burulma, burkulma, ve kırılma türü göçme ortamları laboratuvar koşullarında hazırlanan yükleme sistemlerinde modellenebilir.
- 4) Fotogrametrik yöntemlerin yalnızca deplasman ölçümleri değil, aynı zamanda eğilme ve burulma türü biçim değişimlerini saptayabilecek düzenlemelerle gömülü boruların davranışların saptanmasında kullanılabilir
- 5) Boru deformasyonlarının oluşmaya başlaması sırasında ortaya çıkan ses dalgalarını saptayarak analizler gerçekleştirebilen ses çözünürlüklü ölçüm aygıtlarından yararlanılan sistemler geliştirilebilir.
- 6) Yeraltı su seviyesi değişimleri, deprem etkileri ve sıvılaşma problemleri gibi beklenmedik doğa olaylarının boru dayanımına etkisinin değerlendirilebildiği deney sistemleri kurulabilme olanağı varsa, incelenmesi düşünülebilir.

**KAYNAKLAR**

- AWWA (2002), "Standart Specification for Plastic Pipes" American Water Works Association/ ABD
- Ahn., W., S., (1998), "An Experimental and Analytical Investigation of Viscoelastic Pipe-Soil Interaction" Phd Thesis Florida Atlantic University Florida / ABD
- ANSYS., Swanson Analysis System Inc (Version 5.7)
- AASHTO, (1996), "Standard Specification for Highway Bridges 16<sup>th</sup> Edition American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington. D.C/ ABD
- Adams., D.N., Muindi. T., and Selig E.T., (1989) "Polyethylene Pipe Under High Fill" Transportation Research Record No. 1231 pp 88-95
- Bashir.R. (2000), "Analysis and Design of Buried Pipelines" Ms Thesis., King Fahd University Duhara / S. Arabistan
- Bjerrum, L., Clausen., C.L., and Duncan J.M., (1972), "Earth Pressure on Flexible Structures" A State of Art Report" Proc. 5<sup>th</sup> European Conference on SMFE Vol 2 pp 169-196 Spain
- Burns, J.Q., and Richard., R., M., (1964), "Attenuation of Stresses for Buried Cylinders" Proc. Of Soil Symposium on Soil-Structure Interaction, Univ. of Arizona pp 379-392
- Brachman. R.W.I (1999), "Structural Performance of Leachate Collection Pipes" PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Eng. University of Western Ontario. London/Kanada
- Chua,K.M.,(1986), "Time –Dependent Interaction of Soil and Flexible Pipe" Phd Thesis Texas A&M University Texas/ABD
- Cho S., (2003), "Behaviour of Flexible Plastic Pipes with Flowable Backfill in trench Conditions" Phd Thesis. University of Houston / ABD
- Chambers., R., E. and McGrath. T., J.,(1981), "Structural Design of Buried Plastic Pipe" Proceedings of International ASCE Conference. ,New Orleans L.A. J. Schrock. Edition. March pp 10-25
- Dusunceli.N.&Çolak Ö, (2006), "Modeling viscoelastic and viscoplastic behavior of high density Polyethylene (HDPE) Journal of Engineering Materials And Technology-ASME 128 (4): 572-578 Sp. Iss./ ABD
- DiFrancesco. L.C. (1993), "Laboratory Testing of HDPE Drainage Pipes" Ms Thesis Department of Civil Eng. University of Ontario /Kanada
- Duncan.,J., M., and Hartley., J., D., (1982), "Evaluation of the Modulus of Soil Reaction E' and its Variation with Depth" Report No, UCB/GT/82-02. University of California Berkeley/ABD
- Ezdeşir A., Erbay E., Taşkıran İ., Yağcı M.A., Cöbek M., Bilgiç T., (1999). "Polimerler I",Pagev Yayınları, II. Baskı,
- Espinoza.,J.M., Chang. C.S, and Selig.E.t., (1980), "Computer Analysis of Newtown Creek Culvert" Journal of Geotech Div. ASCE Vol. 106. No. GT5 pp 531-556
- Fraser, C., and D. Brizzi, (2003), "Photogrammetric monitoring of structural deformation" The federation square atrium Project Optical 3-D Measurement Techniques VI, Volume II, pp. 89–95.
- FEMAP User's Manual. (1996), Version 4.5 for Windows, Enterprise Software Products Inc



- Fragher., E., Rogers., C.D.F., and Fleming., R.,P., (1998), “ Labaratory Determination of Soil Stiffness Data for Buried Plastic Pipes” Transportation Research Record 16624, No.98-0773 pp. 231-236
- Gabriel. L., H., Ster., J., F. And Anthony. B., (2001), “A Test Apparatus for Time Independent Stiffness of Thermoplastic Pipe” Transportation Research Board Washington D.C
- Greenwood., M., E., Lang., D.C., (1990), “Vertical Deflection of Buried Flexible Pipes” Buried Plastic Pipe Technology., ASTM STp 1093 Philedephia /ABD
- Hampel, U.ve Maas, H.-G., (2003), Application of digital photogrammetry for measuring deformation and cracks during load tests in civil engineering material testing. In: *6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*. Prof. A. Grün, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 22-25.9., Vol. II, pp. 80-88
- Howard, A.K., (1977), “Modulus of Soil Reaction Values for Buried Flexible Pipe, ASCE Journal of Geotechnical Eng. Division Vol. 103 no. GTI, pp 33-43
- Hoeg., K., (1966),”Pressure Distiribution on Underground Structural Cylinders” Technical Report No. AFWL TR 65-98 Kirtland Air Force Base /ABD
- Katona M.G., (1978), “CANDE: A Versatile Soil-Structure Design and Analysis Computer Program” Journal of Advances in Engineering Software VOL 1 p 3-9
- Janbu., N., (1963), “Soil Compressibility as Determined by Odemeter and Traxial Tests” Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng. Wiesbaden Vol. 1 pp 19-25
- Laidlaw., T., C., (1999), “ Influence of Loacal Support on Corrugated HDPE Pipes” Ms Thesis University of Western Ontoria Ontoria/ Kanada
- Leonards, J., (1975), “Performance of Pipe Culverts Buried in Soil” Reseach Project at Department of Civil Engineering, Purdue University / ABD
- Maas, H.-G., (1998),. Photogrammetric techniques for deformation measurements on masonry reservoir walls. The Proceedings of the IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Struc-tural Engineering, Eisenstadt, Austria, pp. 319–324.
- Maas, H.-G. Ve Hampel, U., (2006), Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 72, No. 1, pp. 39-45
- Marston, A., (1930), “Bulliton No 96.” Iowa Engineering Experiment Station, Ames Iowa/ABD
- Marston, A.,and A.O.Anderson (1913), “Bulliton No 31”. Iowa Engineering Experiment Station, Ames Iowa/ABD
- Masada., T., (1996), “Structural Performance of Profile Wall Plastic Pipes under Relatively Shallow Soil Cover and Subjected to Large Surface Laod” Phd Thesis., College of Eng. Technology Ohia University., Ohio / ABD
- Mark.E.Smith., (2004), “Drainage Pipe Deflection for High Heaps” Published in Mining Record 4<sup>th</sup> qt 2004
- McGrath. T., (1998), “Pipe Soil Interaction During Backfill Placement” Phd Thesis., University of Massachusetts Amherst / ABD

- Massicotte Dan., (2000), "Finite Element Calculations of Stresses and Deformations in Buried Flexible Pipes" Ms Thesis Univ. of Ottawa Department of Civil Eng. Ottawa/ABD
- Meyerhoff, G., G., (1966), "Composite Design of Shallow Burial Steel Structure" Proc. 47<sup>th</sup> Ann. Conv. Canada Good Roads Assn
- Musser, S., C., (1990), "CANDE -89 Culvert Analysis and Design Computer Program User's Manual" Technical Report, Federal Highway Administration / ABD
- Moser., A., P (1990), "Buried Pipe Design" McGraw-Hill New-York N.Y/ABD
- Moser., A., P (2001), "Buried Pipe Design Second Ed." McGraw-Hill New-York N.Y/ABD
- Nielson, F.,D., and Satish, N.D., (1972),"Design of Circular Soil-Culvert Systems" Highway Research Record No. 413, Soil Structure Interaction Symposium pp 67-76
- Plaxis User Guide (1998), Edited by Brinkgreve ve R.b.J., and Vermer P.A Published by A.A. Balkema Rotterdam
- Prevost., R., C., and Kienow., K., K., (1985), "Design of Non-Pressure Very Flexible Plastic Pipe" Proc,International Conference on Pipeline Eng. ASCE Modison pp 527-542 Wisconsin/ABD
- Rajani., B., Kuraoka. S., (1995), "Field Performance of PVC Water Mains Buried in Different Backfills" Advances in Underground Pipeline Eng. Second International Confarance pp 138-149
- Rogers, C.D.F (1988), "Some Observations on Flexible Pipe Response o Load" Transportation Reseach Record 1191 pp 1-11
- Selig.,E.T., DiFrancesco. L.C, and McGrath T.J (1993), "Laboratory Tests of Buried Pipe in Hoop Compression" Buried Plastic Pipe Technology ASTM STP 1222 pp 119-132 Philadelphia/ABD
- Spangler, M., G., (1941), "Structural Design of Flexible Pipe Culverts" Bulletin No 153. Iowa Engineering Experiment Station, Ames Iowa/ABD
- Sutra Dhar., (2002), "Limit States of Profile Theormoplastic Pipes Under Deep Buried Burials" Phd Thesis, University of Western Ontoria., Ontoria / Kanada
- Vipulunandan C., K., Moha (1999), "Soil Box Tests of Flexible Plastic Pipes" Poster Exhibition Texas/ ABD
- Wang., N. (2002), "Evaluation of Flexible Pipes Under Shallow Burial Depths" Ms Thesis Florida Atlantic Univ. Florida /ABD
- Watkins R. K.,(1966), "Structural Design of Buried Circular Conduits" Highway Reseach Record. No 145 Paper Sponsored by Committee on Buried Structures and Presented at 45<sup>th</sup> Annual Meeting 1966
- Whiteman, T., D. ve Lichti, D.D., (2002), Measurement of deflections in concrete beams by close range photogrammetry, ISPRS Commission IV Symposium: Geospatial Theory, Processing and Applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV, Part 4.
- Woodhouse,N.G. ve Robson,S., Eyre,J. (1999), "Vision Metrology and Three Dimensional Visualisation in Structural Testing and Monitoring". Photogrammetric Record XVI(94), 625-642. ISSN: 0031-868X
- Yapa., K.A.S. and Lytton R.,L., (1989), " An Analysis of Soil Box Tests on HDPE Pipes" Texas Transportation Institute, Texas A&M University Project RF 4880 Interim Report

- Yılmaztürk., F. (2007) “Yapi Elemanlarının Dinamik Testlerinde Yer Değiştirmelerin İzlenebilmesi İçin Videogrametrik Bir Sistem Tasarımı” Doktora Tezi İTÜ İstanbul (Basılmadı)
- Zhang.C. and Moore I.D. (1997b), “Nonlinear Mechanical Response of HDPE Part I: Experimental Investigation and Model Evaluation” Polymer Eng. And Science. Vol. 37, No.2 pp 404-413
- Zanzinger., h., and Gartung E., (1998), “HDPE – Geopipes Soil – Structure Interaction” Sixth International Conference on Geosynthetic IFAI, pp 197-200Atlanta G.A. /ABD
- Zolad. G.V., McGrath.T.J., and Selig. E., T., (1996),” Laboratory Tests of Buried Pipe Installation Procedures” Transportation Research Record 1541 pp 86-96

**ÖZGEÇMİŞ**

|           |                                                         |
|-----------|---------------------------------------------------------|
| 1988-1995 | Samanyolu Erkek Lisesi                                  |
| 1995-1999 | N.U.Aksaray Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl.                  |
| 2000-2002 | N.U. Fen Bilimleri Ens. Y.Lisans Programı               |
| 2002-2007 | Y.T.U Fen Bilimleri Ens. İnşaat Böl. Geoteknik Programı |