T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÜNİFORM OLMAYAN GERİDOLGU ORTAMLARINA YERLEŞTİRİLEN GÖMÜLÜ ESNEK BORULARIN DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Can ERENSON

DANIŞMAN
Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ

AKSARAY, 2020

TEŞEKKÜR

Akademisyen bakış açısını ve araştırma ruhunu bana kazandıran, çözüme giden yolda yaratıcı fikirlerle ufkumu genişleten ve hedeflerim doğrultusunda emeklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca emeklerini, düşünsel ve fiziki olarak bir an olsun eksik etmeyen çok değerli Prof. Dr. Mehmet Emin KARA ve Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME hocalarıma, araştırmalarım ve deneysel çalışmalarımda bana destek olan hocam Öğr. Gör. Yakup BÖLÜKBAŞ'a, en ihtiyaç duyduğum zamanlarda imdadıma yetişen mesai arkadaşım Arş. Gör. Ramazan ORUÇ'a, tez yazımı esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Mert MUTLU'ya bana olan katkılarından dolayı sonsuz kez teşekkür ederim.

Mücadele etmeyi ve sabretmeyi bana öğreten çok muhterem babacığım Süleyman Erdener ERENSON'a, şefkat ve sevgisini her daim hissettiğim çok sevgili anneciğim Fatma ERENSON'a, her koşulda daima güler yüzüyle beni karşılayan kıymetli eşim İnş. Yük. Müh. Berna ERENSON'a, bana her şeyi daha anlamlı hissettiren oğlum, aslan parçam Canberk ERENSON'a, emekleri ve güzel dilekleri ile hep yanımda olan Mehmet ve Fatma KARAKUZU'ya, kardeşliği ile beni ağabeylik ile tanıştıran Tuğba KARAKUZU'ya da çok teşekkür ederim.

Doktora tezimin deney aşamalarında laboratuvar imkanlarının gelişmesine katkıda bulunan Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP 2015-086 ve 2018-051) teşekkür ederim. Deney materyallerinin temin edilme aşamalarında yardımlarının esirgemeyen Kuzeyboru Plastik San. ve Tic. Ltd. Şirketi'ne, Siltaş Silis Kumları San. Tic. A.Ş.'ye ve Baydemir Profil Sac İnş. San. ve Tic. Ltd. Şirketi'ne de teşekkürlerimi sunarım.

Can ERENSON

AKSARAY, 2020

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR……i
İÇİNDEKİLER……...ii
ÖZET……... v
ŞEKİLLER DİZİNİ……..vii
ÇİZELGELER DİZİNİ……xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……...xii
1. GİRİŞ…….. 1
1.1 Literatür Özeti 3
2. GÖMÜLÜ BORULARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ…… 23
2.1 Esnek ve Rijit Boruların Farklılıkları ve Teknik Özellikleri 24
2.2 Gömülü Borular Üzerine Etkiyen Dış Yükler..... 27
2.2.1 Zemin yükü…….... 28
2.2.2 Hareketli yükler…… 29
2.2.3 Boru hattı boyunca etkiyen yükler…… 30
2.2.4 Don etkisi sonucunda meydana gelen yükler…… 30
2.3 Esnek Boruların Göçme Türleri 30
2.3.1 Boru duvarının ezilmesi…… 31
2.3.2 Boru duvarının burkulması……... 32
2.3.3 Kesitte gözlemlenen aşırı şekil değiştirmeler……... 33
2.3.4 Normal ve kayma şekil değiştirmeleri…… 34
2.3.5 Boru hattı doğrultusundaki gerilmeler…….…….…… 34
2.3.5.1 Üniform olmayan taban desteği……. 36
2.3.5.2 Farklı oturmalar…… 36
2.3.5.3 Yer hareketleri……... 36
2.3.6 İlave kesme kuvveti yükleri…….. 37
2.3.7 Yorulma çatlakları…… 37
2.4 Boru Yerleştirme Yöntemleri..... 38
2.4.1 Dolgu ortamlarına yerleştirilmiş borular…….. 38
2.4.2 Hendek ortamlarına yerleştirilmiş borular…… 39
2.4.3 Kazısız metotlar…… 39
2.5 Güzergah Seçimi 42
2.6 Boru Hattının İnşaat Aşamaları..... 43
2.7 Yataklama 44
2.8 Sıkıştırma İşlemleri 45
2.9 Bağlama ve Birleştirme Teknikleri 46
3. TASARIM VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ……...49
3.1. Marston Yük Teorisi 49
3.2. Spangler Yük Teorisi ve Iowa Eşitliği 51
3.3. Geliştirilmiş Iowa Eşitliği ve Watkins Hesaplama Yöntemi 53
3.4. Masada Derivasyonu..... 56
3.5. Diğer Metotlar ve Eşitlikler 59
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz 64
3.7. Standartlar, Sınır Koşulları ve Boyutlandırma..... 67
4. MATERYAL VE METOT……..70
4.1 Malzeme Özellikleri..... 70
4.1.1 Geridolgu ortamı ve silis kumu…… 70
4.1.1.1 Elek analizi ve endeks özellikleri…….. 70

4.1.1.2 Relatif sıkılık ilişkisi…….. 72
4.1.1.3 Üç eksenli basınç deneyleri…… 73
4.1.2 HDPE borular ve özellikleri…….. 77
4.1.2.1 Sabit hızda çekme testi ve malzeme parametrelerinin tayini……. 80
4.1.2.2 Kalite kontrol ve uygunluk kriterleri……. 82
4.1.3 Yarım kesitli atık araç lastikleri…… 86
4.1.4 Geri kazanılmış atık araç lastik parçaları ve kauçuk granüller……. 89
4.2 Deney Kutusu ve Çerçeve Sistemi 91
4.3 Yükleme Düzeneği 94
4.4 Ölçüm Sistemi 95
4.4.1 Potansiyometrik cetveller……. 96
4.4.2 Birim deformasyon ölçerler……..…… 97
4.4.3 Zemin basınç ölçer…….. 102
4.4.4 Yük hücresi…… 103
4.5 Kum Aktarma Helezonu 103
4.6 Cihaz Kalibrasyonları ve Testleri 105
4.7 Veri Toplama ve Aktarma 108
4.8 Nihai Deney Düzeneği 109
5. LABORATUVAR DENEYLERİ……..110
5.1 HDPE Boruların Direkt Yükleme Altında ve Geridolgu Ortamlarında Gerçekleştirilen Laboratuvar Deneyleri 110
5.2 Kumlu Geridolgu Ortamlarına Gömülü HDPE Boru Deneyleri 112
5.2.1 %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamlarına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışlarının incelenmesi…… 112
5.2.2 Boru hattı ortasında atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının incelenmesi…… 116
5.2.3 Boru hattı boyunca atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının incelenmesi…… 121
5.3 Kumlu Yataklama Ortamında ve Kauçuk Üstdolgu Ortamına Yerleştirilmiş HDPE Gömülü Borunun Deformasyon Davranışının İncelenmesi 126
5.4 Kauçuk Yataklama Ortamında Kumlu Geridolgu Ortamına Yerleştirilmiş HDPE Gömülü Borunun Deformasyon Davranışının İncelenmesi 129
5.5 Relatif Sıkılık Değerlerine Göre Tüm Uygulamaların Karşılaştırılması 130
5.6 Düşey Yükleme Altında %75, %60 ve %45 Relatif Sıkılık Koşullarında Oturma Karakteristiklerinin İncelenmesi 134
5.7 Düşey Yükleme Altında Kauçuk Üstdolgulu ve Kauçuk Yataklamalı Deneylerde Oturma Karakteristiklerinin İncelenmesi 135
5.8 Düşey Yükleme Altında Eğilme Momenti Verilerinin İncelenmesi 136
6. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ……...141
6.1 Programa Girilen Malzeme Parametreleri 141
6.1.1 Deney kutusu ve yükleme plakası özellikleri……. 141
6.1.2 Silis kumu ve Mohr–Coulomb modeli…… 142
6.1.3 Yarım kesitli atık araç lastikleri, lastik parçaları ve hiperelastik model .144
6.2 Sistem Geometrisi ve Çizimi 146
6.3 Sonlu Eleman Ağları Üretme 149
6.4 Temas Bölgelerinin Tanımlanması ve Atanması 151
6.5 Mesnetler ve Sınır Şartları 153
6.6 Yükleme Koşulları 153

6.7 Çözümleme 154
6.8 Deformasyon ve Gerilme – Şekil Değiştirme Analizleri 155
6.9 Analiz Sonuçları..... 156
6.9.1 %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi…….....157
6.9.2 Boru hattı ortasında atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi……..……...160
6.9.3 Boru hattı boyunca atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi……..……...164
6.9.4 Kumlu yataklama ortamında ve kauçuk üstdolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi……..…..... 167
6.9.5 Kauçuk yataklama ortamında ve kumlu geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi…….…….. 168
7. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI……172
KAYNAKLAR…… 178
ÖZGEÇMİŞ…… 193

DOKTORA TEZİ

ÜNİFORM OLMAYAN GERİDOLGU ORTAMLARINA YERLEŞTİRİLEN GÖMÜLÜ ESNEK BORULARIN DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Can ERENSON

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ

ÖZET

Nüfus artışına bağlı yeni yerleşim alanları kuruldukça ihtiyaçlar gereği petrol ve doğalgaz boru hatlarında, içme suyu, sulama, atık su şebekelerinde, katı madde taşınımında ve drenaj gerektiren uygulamalarda yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru kullanımı günden güne artmaktadır. Uzun servis ömrü, esnekliği, yüksek korozyon ve yorgunluk dirençli olması, hafifliği, pürüzsüzlüğü, kolay kurulumu ve birleştirilebilmesi, sıcaklık veya soğukluk bakımından geniş aralıklarda kullanılabilmesi, ekonomik oluşu, elektrik yalıtımlı olması, tat ve koku bırakmaması ve çevreyle barışçıl olması nedeniyle HDPE boruların tercih edilmesi söz konusu eğilimin göstergelerindendir. Bu doktora tezinde, HDPE esnek boruların %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamlarındaki deformasyon davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kapsamlı laboratuvar araştırmaları ve ANSYS sonlu elemanlar programı sonucunda, kademeli yükleme altında birim deformasyon ölçerler ile donatılmış ve 400 mm çaplı, 9,8 mm et kalınlıklı ve 1500 mm uzunluğundaki geridolgu ortamına gömülü boruların farklı sıkılık koşullarında taç ve bel bölgelerinde oluşan deformasyonlara bağlı olarak kritik kesitlerde göçme durumları gözlemlenmiştir. Bu çerçevede, yine farklı sıkılık koşullarında, takviye olarak kritik kesitlerde ve boru hattı boyunca olmak üzere yarım kesitli atık araç lastikleri boru üzerine sabitlenerek deneyler yürütülmüştür. Sonuç olarak, yarım kesitli atık araç lastiği takviyelerinin kullanıldığı bölgelerdeki deformasyon ve eğilme momenti değerlerini ciddi ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Boru hattı üzerine uygulanan yarım kesitli atık araç lastikleri, kritik kesitlerde taç bölgesi için %45 ile %51, bel bölgesi için %57 ile %69 arasında daha az deformasyon gözlemlenmesini sağlamıştır. Çalışmada ayrıca, atık lastiklerden geri kazanılmış granül kauçuk tabakalarının üstdolgu ve yataklama bölgesinde sönümleyici bir tabaka olarak kullanılması incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, boru hattı üzerinde kullanılan yarım kesitli atık araç lastiklerinin üstünlükleri kapsamlı laboratuvar deneyleri ve nümerik analizler sonucu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: ANSYS, Geri kazanım, Gömülü boru, Nümerik analiz, Silis kumu, Yüksek yoğunluklu polietilen.

Mart, 2020; 193 sayfa

Ph.D. THESIS

AN INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF BURIED FLEXIBLE PIPES IN NONUNIFORM BACKFILL MATERIALS

Can ERENSON

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ

ABSTRACT

Due to population growth, new residential areas are being established. In this regard, depending on basic needs, high-density polyethylene (HDPE) pipe usage is increasing day by day in oil and gas pipelines, drinking water, irrigation, wastewater networks, solid matter transportation and drainage applications. HDPE pipes are widely preferred and the indicators of this trend are long service life, flexibility, high corrosion and fatigue resistance, smoothness, easy installation and jointing, using in a wide range of temperatures, economical, electrical insulated, taste and odor-free, environment friendly. In this Ph.D. dissertation, the deformation behavior of HDPE pipes in silica sand backfill was investigated experimentally and numerically under different relative density conditions (75%, 60% and 45%). Diameter, wall thickness and length of the HDPE pipes equipped with strain gauges are 400 mm, 9.8 mm and 1500 mm, respectively. As a result of comprehensive laboratory tests and ANSYS finite element software outputs, failure conditions were observed in critical sections which are crown and springlines related to deformations. In this context, under the different relative density conditions, half-section waste vehicle tires were fitted on the pipe in critical sections and along the pipeline for reinforcement. In the strengthening experiments, it was observed that the deformation and bending moment values significantly decreased in the regions where half-sections waste vehicle tire reinforcements were used. In the tests where waste vehicle tires were applied in critical sections, less deformations were observed between 45% and 51% in the crown and 57% and 69% in the springlines. Additionally, the use of recycled granular rubber layers from waste tires as an absorber layer in the upper region of the backfill and bedding material was investigated. As a result of the investigations, the advantages of half-section waste vehicle tires used on the pipeline were demonstrated by extensive laboratory tests and numerical analysis.

Keywords: ANSYS, Buried pipe, Recycling, Silica sand, High-density polyethylene, Numerical analysis.

March, 2020; 193 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Boru kısımları ve geometrik terimler. 23
Şekil 2.2. Aşırı yüke maruz esnek ve rijit borulardaki göçme biçimleri 25
Şekil 2.3. Kemerlenme mekanizmaları, (a) negatif projeksiyon, (b) pozitif projeksiyon durumu 27
Şekil 2.4. Boru performansına etki eden zemin bölgeleri 27
Şekil 2.5. Esnek boruların ezilme biçimi 31
Şekil 2.6. Esnek boruların burkulma biçimi 33
Şekil 2.7. Esnek borularda aşırı deformasyon ve ters eğiklik 33
Şekil 2.8. Boyuna doğrultusundaki kırılma türleri 35
Şekil 2.9. Boyuna doğrultudaki eğilme sonucu oluşan deformasyon biçimleri 35
Şekil 2.10. Boru çakma (sürme) yöntemi 40
Şekil 2.11. Doğrusal delgi yöntemi 41
Şekil 2.12. Boru itme 41
Şekil 2.13. Mikrotünel uygulaması 42
Şekil 3.1. Marston hendek kesiti 50
Şekil 3.2. Spangler gerilme dağılışı 52
Şekil 3.3. Gömülü borunun yataklanması 53
Şekil 3.4. Relatif sıkılık değişimine göre boru taç deplasman değerlendirilmesinde deney verileri ile Masada Derivasyonu'nun karşılaştırılması. 58
Şekil 3.5. Relatif sıkılık değişimine göre boru bel deplasman değerlendirilmesinde deney verileri ile Watkins Geliştirilmiş Iowa Eşitliği karşılaştırılması 59
Şekil 4.1. Silis kumu elek analizi. 70
Şekil 4.2. Silis kumu granülometri eğrisi. 71
Şekil 4.3. %45 relatif sıkılık değerleri için üç eksenli basınç deneyi sonuçları 74
Şekil 4.4. %60 relatif sıkılık değerleri için üç eksenli basınç deneyi sonuçları 74
Şekil 4.5. %75 relatif sıkılık değerleri için üç eksenli basınç deneyi sonuçları 75
Şekil 4.6. %45 relatif sıkılık değerleri için gerilme-şekil değiştirme grafiği 75
Şekil 4.7. %60 relatif sıkılık değerleri için gerilme-şekil değiştirme grafiği 76
Şekil 4.8. %75 relatif sıkılık değerleri için gerilme-şekil değiştirme grafiği 76
Şekil 4.9. Kayma mukavemeti parametreleri tayini için üç eksenli basınç deneyi 77
Şekil 4.10. Sabit hızda çekme testi ve şekil değiştirme ölçümü için kalibrasyon. 81
Şekil 4.11. Sabit hızda çekme testine göre HDPE borunun gerilme-uzama grafiği. 82
Şekil 4.12. HDPE borular üzerinde yapılan kalite – uygunluk deneyleri. 85
Şekil 4.13. Yarım kesitli atık araç lastiklerinin boru üzerinde yerleşimi 87
Şekil 4.14. Yarım kesitli atık araç lastiklerinin parçalama işlemleri. 88
Şekil 4.15. Araç lastik kesit ve katmanları. 89
Şekil 4.16. Parçalanarak geri kazanılmış atık lastik parçalarının ve granüllerin elek analizi. 90
Şekil 4.17. Parçalanarak geri kazanılmış atık lastik parçaları ve granüllerin üstdolgu ve yatak malzemesi olarak kullanımı 90
Şekil 4.18. Yükleme sonucunda kutunun yanal deformasyon değerleri. 93
Şekil 4.19. Literatürde yer alan bazı deney kutuları. 94
Şekil 4.20. Deney kutusu ve ölçüm sisteminin yerleşimi. 96
Şekil 4.21. Boru içerisine yerleştirilmiş potansiyometrik cetvel ve birim deformasyon ölçer formasyonu. 97

Şekil 4.22. Potansiyometrik cetveller ile yükleme plakası üzerinden oturma ölçümü 97
Şekil 4.23. Birim deformasyon ölçerlerin yerleşimi. 99
Şekil 4.24. Birim şekil değiştirme 100
Şekil 4.25. Wheatstone köprüsü 100
Şekil 4.26. Boru hattı L/2 ve L/4 kesitlerinde birim deformasyon ölçer yerleşimi. 102
Şekil 4.27. Zemin basınç ölçer mikrokontrolcüsünün devre şeması. 103
Şekil 4.28. Kum aktarma helezonunun kısımları. 104
Şekil 4.29. Kum aktarma helezonunun deney sistemi içerisindeki yeri. 105
Şekil 4.30. Yük hücresi kalibrasyonu 107
Şekil 4.31. Zemin basınç ölçer kalibrasyonu. 108
Şekil 4.32. Mikrokontrolcü devresi ve LCD gösterge. 108
Şekil 4.33. Veri toplama ünitesi. 109
Şekil 4.34. Nihai deney sistemi 109
Şekil 5.1. HDPE boru numunesine direkt yükleme deneyi. 111
Şekil 5.2. Relatif sıkılık koşullarının HDPE gömülü boru deformasyonlarına etkisinin araştırıldığı laboratuvar deneyleri. 112
Şekil 5.3. Geridolgu malzemesi relatif sıkılık değerlerine göre yük–deplasman grafiği. 116
Şekil 5.4. Boru hattı ortası kısmi lastik uygulamasında relatif sıkılık değerlerine göre yük–deplasman grafiği. 121
Şekil 5.5. Boru hattı boyunca yapılan atık araç lastik uygulamasında relatif sıkılık değerlerine göre yük–deplasman grafiği. 126
Şekil 5.6. Parçalanmış atık araç lastiklerinin üstdolgu olarak kullanıldığı deneyde zemin yüzeyinde meydana gelen oturma ve kabarmalar. 127
Şekil 5.7. Parçalanmış atık araç lastiklerinin yatak malzemesi olarak kullanıldığı deneyde zemin yüzeyinde meydana gelen aşırı oturma. 129
Şekil 5.8. %75 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük–deplasman grafiği. 131
Şekil 5.9. %60 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük–deplasman grafiği. 132
Şekil 5.10. %45 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük–deplasman grafiği. 133
Şekil 5.11. %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen oturma–düşey yük grafiği. 134
Şekil 5.12. %75 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen oturma–düşey yük grafiği. 135
Şekil 5.13. Granül kauçuk tabakaların deney kutusu içerisinde yerleşim mesafeleri 136
Şekil 5.14. L/2 kesitinin düşey yük-taç bölgesi eğilme momenti grafiği. 137
Şekil 5.15. L/4 kesitinin yük-taç bölgesi eğilme momenti grafiği. 138
Şekil 5.16. L/2 kesitinin yük-bel bölgesi eğilme momenti grafiği. 139
Şekil 5.17. L/4 kesitinin yük-bel bölgesi eğilme momenti grafiği. 140
Şekil 6.1. E_{50} Young modülü 142
Şekil 6.2. Mohr-Coulomb akma yüzeyi 143
Şekil 6.3. Space Claim tasarımı. 147
Şekil 6.4. Boru hattı üzerinde yarım kesitli atık araç lastiklerinin gösterimi. 147
Şekil 6.5. Geridolgu ortamı içerisinde yarım kesitli atık araç lastiklerinin gösterimi. 148

Şekil 6.6. Yataklama, boru, lastik ve geridolgu kesiti. 148
Şekil 6.7. Düşey yük altında düşey deformasyon kontür gösterimi. 149
Şekil 6.8. Ağ üretimi işlemleri ve boru üzerinde fine mesh. 151
Şekil 6.9. Kum – boru ve kutu – kum arayüzey tanımları. 152
Şekil 6.10. Proje menüsü ve model menüsü. 154
Şekil 6.11. Çözüm menüsü ve deformasyon arabirimi. 156
Şekil 6.12. Çözüm menüsü ve gerilme arabirimi. 156
Şekil 6.13. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 157
Şekil 6.14. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 158
Şekil 6.15. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 158
Şekil 6.16. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 159
Şekil 6.17. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 159
Şekil 6.18. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 160
Şekil 6.19. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 161
Şekil 6.20. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 161
Şekil 6.21. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 162
Şekil 6.22. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 162
Şekil 6.23. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 163
Şekil 6.24. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 163
Şekil 6.25. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 164
Şekil 6.26. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 164
Şekil 6.27. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 165
Şekil 6.28. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 165

Şekil 6.29. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 166
Şekil 6.30. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 166
Şekil 6.31. Kauçuk üstdolgu ortamına gömülü HDPE borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü. 167
Şekil 6.32. Kauçuk üstdolgu ortamına gömülü HDPE borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü. 168
Şekil 6.33. Kauçuk yataklamalı sistem içerisinde kumlu geridolgu ortamına gömülü HDPE borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü (X-Y doğrultulu). 169
Şekil 6.34. Kauçuk yataklamalı sistem içerisinde kumlu geridolgu ortamına gömülü HDPE borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü (Y-Z doğrultulu). 169
Şekil 6.35. Relatif sıkılık koşullarına göre laboratuvar deney sonuçları ve nümerik analiz sonuçlarının düşey yük–taç deplasmanı üzerinden karşılaştırılması. 170
Şekil 6.36. Relatif sıkılık koşullarına göre laboratuvar deney sonuçları ve nümerik analiz sonuçlarının düşey yük–bel deplasmanı üzerinden karşılaştırılması. 171

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Esnek ve rijit boruların şekil değiştirme sınırları 25
Çizelge 2.2. Trafik sınıflarına göre yük değerleri. 30
Çizelge 3.1. Bazı zemin türleri için ɣ, K ve μ' değerleri 51
Çizelge 3.2. Yataklama açısına göre yataklama katsayısı değerleri 53
Çizelge 3.3. Howard zemin reaksiyon çizelgesi 55
Çizelge 3.4. J ve K yatak katsayıları. 57
Çizelge 3.5. Greenwood ve Lang yatak katsayıları 60
Çizelge 3.6. Standartlara göre belirlenen zemin ortamı genişlikleri. 68
Çizelge 4.1. Silis kumunun efektif çap, üniformluk katsayısı ve eğrilik katsayısı. ... 71
Çizelge 4.2. Silis kumunun maksimum ve minimum boşluk oranı ile özgül ağırlığı 72
Çizelge 4.3. Relatif sıkılık – mühendislik özellikleri ilişkisi. 73
Çizelge 4.4. Polietilen boruların sınıflandırılması 79
Çizelge 4.5. Polietilen hammaddesinin kimyasal özellikleri 80
Çizelge 4.6. HDPE borunun elastisite modülü ve poisson oranı 81
Çizelge 4.7. Atık lastiklerin mühendislik parametreleri 86
Çizelge 4.8. Atık araç lastik parçalarının mühendislik parametreleri. 91
Çizelge 4.9. Kullanılan atık araç lastik parçalarının bileşen içeriği. 91
Çizelge 5.1. %75 sıkılıkta boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 113
Çizelge 5.2. %60 sıkılıkta boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 114
Çizelge 5.3. %45 sıkılıkta boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 115
Çizelge 5.4. %75 sıkılıkta boru hattının sadece ortasında atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri 118
Çizelge 5.5. %60 sıkılıkta boru hattının sadece ortasında atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 119
Çizelge 5.6. %45 sıkılıkta boru hattının sadece ortasında atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 120
Çizelge 5.7. %75 sıkılıkta boru hattı boyunca atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 123
Çizelge 5.8. %60 sıkılıkta boru hattı boyunca atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 124
Çizelge 5.9. %45 sıkılıkta boru hattı boyunca atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 125
Çizelge 5.10. Kauçuk üstdolgulu deney sisteminde güçlendirmesiz boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 128
Çizelge 5.11. Kauçuk yataklamalı deney sisteminde güçlendirmesiz boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri. 130
Çizelge 6.1. St37 çeliği malzeme parametreleri. 141
Çizelge 6.2. ANSYS kontakt türleri ve karakteristikleri 153
Çizelge 7.1. Deney sonuçları, ANSYS çıktıları ve hesaplama yöntemleri verileri. 173

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AFS	American Foundrymen Society
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Hendek Genişliği
BHB	Boru Hattı Boyunca
BHO	Boru Hattı Ortasında
C	Zemin Yükü Katsayısı
C_1	Greenwood – Lang Zemin – Boru Etkileşim Katsayısı
C_c	Eğrilik Katsayısı
C_u	Uniformluk Katsayısı
CAD	Bilgisayar Destekli Çizim
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
CB	Karbon Siyahı
CH	Yüksek Plastisiteli Killi Zemin
CL	Düşük Plastisiteli Killi Zemin
CTP	Cam Takviyeli Polyester
D	Boru Çapı
D_L	Gecikme Faktörü
D_r	Relatif Sıkılık
DKE	Düşey Kemerlenme Etkisi
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
ε	Birim Şekil Değiştirme
e	Boşluk Oranı
e_{max}	Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	Minimum Boşluk Oranı
E	Elastisite Modülü
E'	Zemin Reaksiyon Modülü
E_b	Boru Çemberinde Deplasman Kaynaklı Eğilme Şekil Değişimleri
E_c	Dış Basınç Gerilmelerinden Kaynaklanan Basınç Şekil Değişimleri
E_i	Başlangıç Elastisite Modülü
E_p	İç Basınç Gerilmelerinde Kaynaklanan Basınç Şekil Değişimleri
E_{50}	İkincil Elastisite Modülü
EPS	Genleştirilmiş Polistiren Köpük
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEMAP	Finite Element Modeling and Postprocessing
GF	Kazanç Katsayısı
GFRP	Fiberglasla Güçlendirilmiş Plastik
GKÜ	Granül Kauçuk Üstdolgu
GKY	Granül Kauçuk Yataklama
GP	Kötü Derecelenmiş Çakıllı Zemin
GW	İyi Derecelenmiş Çakıllı Zemin
H	Dolgu Yüksekliği
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HPP	Sıcak Piro-yoğunlaşma

I	Atalet Momenti
ISO	International Organization for Standardization
J	Yatak Katsayısı
K	Yatak Katsayısı
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
L	Boru Hat Uzunluğu
LASDER	Lastik Sanayicileri Derneği
LL	Likit Limit
LUSAS	London University Structural Analysis System
LVDT	Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör
M_b	Eğilme Momenti
M_s	Geridolgu Malzemesinin Bir Boyutlu Sıkışma Modülü
MDPE	Orta Yoğunluklu Polietilen
MFR	Kütlesel Akış Hızı
MH	Yüksek Plastisiteli Siltli Zemin
MIT	Massachusetts Institute of Technology
ML	Düşük Plastisiteli Siltli Zemin
MRS	Gerekli Asgari Dayanım
MVR	Hacimsel Akış Hızı
N	Düşü Sayısı
NC	Normal Konsolide
NDE	Tahribatsız İnceleme
NPP	Nükleer Enerji Santrali
OIT	Oksidasyon İndüksiyon Süresi
ÖTL	Ömrünü Tamamlamış Lastik
P_0	Zemin Jeolojik Yükü
P_i	İç Basınç
P_t	Trafik Yükü
P_v	Düşey Doğrultudaki Zemin Basıncı
PB	Polibütilen
PE	Polietilen
PEX	Çapraz Bağlı Polietilen
PL	Plastik Limit
PN	Anma Basıncı
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil Klorür
q_{cs}	Kritik Gerilme
q_p	Pik Gerilme
Q_t	Tekerlek Yükü
r	Boru Yarıçapı
R	Direnç
r_m	Boru Ortalama Yarıçapı
SC	Killi Kumlu Zemin
SLA	Sequantial Limit Analysis
SM	Siltli Kumlu Zemin
SP	Kötü Derecelenmiş Kumlu Zemin
S_R	Halka Rijitliği
SW	İyi Derecelenmiş Kumlu Zemin

t	Boru Et Kalınlığı
TS	Türk Standartları
UPVC	Plastikleştirilmemiş Polivinil Klorür
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UV	Ultraviyole
W	Gerinme Enerjisi Potansiyeli
W_c	Marston Yükü
ν	Poisson Oranı
γ	Birim Hacim Ağırlık
γ_{max}	Maksimum Birim Hacim Ağırlık
γ_{min}	Minimum Birim Hacim Ağırlık
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı
σ	Gerilme
Δx	Boru Yatay Deformasyonu
ΔH	Yatay Deformasyın Farkı
ΔL	Uzama Oranı
ΔR	Direnç Farkı
ΔV	Düşey Deformasyon Farkı
Δy	Boru Düşey Deformasyonu
ς	Leonhardt Eşitliği
Ω	Ohm
Ψ	Genleşme Açısı
λ	Uzama Oranı

1. GİRİŞ

Her geçen gün artan insan nüfusu, yüksek miktardaki enerji ihtiyacını da açığa çıkarmaktadır. Dünyanın farklı bölgelerinde enerji ihtiyacının karşılanması hususunda ulusal ve uluslararası çapta çok büyük sorunlar geçmişte yaşanmış olup şu anda da günümüzde bu sıkıntılar yaşanmaya devam etmektedir. Bu bağlamda, global ekonomide söz sahibi olmak için ve insanoğlunun enerji ve temel gereksinimlerinin karşılanması için boru hatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Petrol ve doğalgaz boru hatları, içme suyu, sulama ve atık su şebekeleri, tahliye uygulamaları ve endüstriyel işlemlerde borular kullanılmakta olup akla gelebilecek her türlü madde taşınımı bu şekilde gerçekleştirilmektedir. Polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), polipropilen (PP), çapraz bağlı polietilen (PEX), cam takviyeli polyester (CTP), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polibütilen (PB) ve teflon türevleri gibi borular tüm bu çeşitli ihtiyaçlar doğrultusunda kullanım alanları, üstünlükleri ve sakıncalarına göre tercih edilmektedir. Dünya genelinde enerji tüketiminin artması ile beraber kaynaklardan yerleşim alanlarına aktarılacak hizmetlerin taşınmasında ise yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular çok büyük bir paya sahiptir. Uzun servis ömrü, esnek yapısı, yüksek korozyon ve yorgunluk direnci, hafif ve pürüzsüz olması, kolay kurulum ve birleştirilebilme özelliği, çok yüksek sıcaklık aralığında kullanımı, düşük maliyeti, elektrik yalıtımlı oluşu, tat ve koku bırakmama özelliği ve doğa dostu olması, yüksek yoğunluklu polietilen boruların tercih edilmesinin nedenlerindendir. İnsan ihtiyaçlarının kesintisiz ve güvenli bir biçimde giderilebilmesi için boru hatlarının emniyeti büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, geridolgu ortamlarına gömülü HDPE boruların deformasyon davranışları incelenerek hasar görme ihtimali bulunan kesitlere gelen gerilmelerin azaltılması yönünde araştırmalar yapılmıştır.

Diğer bir yandan HDPE boruların yüksek performans kriterleri, boru hattı sağlığı açısından tek başına yeterli olmamaktadır. Aynı zamanda boru hattının bulunduğu zemin profili de en az boru türü seçimi, boyutlandırma, tasarım ve iyileştirme adımları kadar önemlidir. Zeminlerin mühendislik özellikleri gereği daneler arası kuvvetlerin oluşturdukları etkiler zeminde meydana gelecek etkileşimlerin çeşitliliğine göre değişmektedir. Bu doğrultuda, zemin üzerine gelecek yük, yükün uygulanış şekli, zemin türü, zemin koşulları, sıkılık derecesi ve uygulanacak iyileştirme metodu

zeminin taşıma kapasitesini, oturma değerlerini ve göçme mekanizmasını etkilemektedir. Ayrıca, taşıma kapasitesi düşük zeminlere uygulanacak iyileştirme türünün de zemin ile etkili bir biçimde çalışabilmesi için uygun iyileştirme yönteminin de seçilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, araziye emniyetli, ekonomik ve uzun ömürlü tasarımları inşa edebilmek öncelikli sorumlulukların başında gelmektedir. Bu kriterler göz önünde bulundurulduğunda, teorik hesaplamalara dayalı tasarımı güvenilir bir şekilde arazide uygulayabilmek için de saha koşullarını hassas bir biçimde yansıtacak şekilde laboratuvar ortamında deneyler yapmak gerekmektedir.

Boruların çembersel ve teğetsel deformasyonlarının meydana gelmesinde, boylamsal rijitliğin etkisini daha düşük seviyelere indirgemek için deney kutusunun derinliği, daha önceki deneysel çalışmalarda edinilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Sonsuz zemin ortamının laboratuvar çalışmalarına yansıtılabilmesi için ASTM D2321 (2008) ve AASHTO Sec30 (1996) standartlarında belirtilen boru çapına göre yataklama seviyesi, gömme derinliği, boru ile kutu duvarları arasındaki mesafe gibi sınır şartlarına göre deney kutusunun boyutları seçilmiştir.

Emniyetli boru hatları ve dolayısıyla çevreye zarar vermeyen uzun servis ömürlü altyapılar ortaya koyabilmek için hazırlanan bu doktora tezinde, farklı sıkılık koşullarındaki silis kumlu geridolgu ortamlarında HDPE boruların deformasyon davranışları ve gerilme analizleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca çalışmada, yükleme adımları sonucunda kritik bölgeler ve kesitler belirlenerek söz konusu bölgelerin lokal veya genel olarak atık veya geri kazanılmış malzemeler ile güçlendirilmesi deneysel ve aynı zamanda nümerik olarak incelenmiştir.

Laboratuvar ortamında arazinin ve boru hattının gerçek koşulardaki gibi temsil edilmesi ile zamana bağlı olarak sahada yaşanabilecek davranışlar gözlemlenmiştir. Bu hususta, yük etkisinde zeminlerin oturma davranışları incelenerek boru deformasyon ilişkilendirmeleri yapılmıştır. Ayrıca, zeminde gerçekleşen veya gerçekleşebilmesi muhtemel oturmalar farklı şekillerde sorunlara sebebiyet verebilmektedir. Bu oturmalar, yapı–zemin etkileşimi kapsamında basit duvar çatlaklarından kapsamlı yapısal hasarlara kadar sorunlara yol açmaktadır. Bu sebepten ötürü, zeminlerin yük etkisinde oturmalarının doğru tahmini ve hassas bir biçimde hesaplanabilmesi yapının, çevrenin ve insanların emniyeti açısından büyük önem

taşımaktadır. Sonuç olarak, farklı sıkılık şartlarında yapılan hesaplamalar, laboratuvar deneyleri ve modellemeler ile bu verilerin ilişkilendirilmeleri, gerçek hayatta karşımıza çıkabilecek boru deformasyon ve oturma problemlerinin ortadan kaldırılmasına veya minimal seviyelerde tutulmasına ışık tutacaktır.

Gömülü esnek boruların malzeme özellikleri, geridolgu ortamlarındaki deformasyon davranışları, tasarım ve boyutlandırılması, boru hattı güvenliğinin artırılması üzerine literatürde farklı koşullarda yürütülmüş pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar standartlar ölçüsünde belirlenen küçük ya da tam ölçekli deney kutularında, arazi koşullarında veya model olarak bilgisayar programlarında testlere ve analizlere tabi tutulmaktadır. Çalışma süresince incelenen kaynaklar ve literatür taramalarından birçoğuna Bölüm 1.1: "Literatür Özeti" kısmında yer verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Petrol ve doğalgaz taşımacılığı için yaygın olarak kullanılan gömülü borular şehir içi ve şehirlerarası taşımacılık için her ülkede farklı standartlara göre tasarlanmaktadırlar (Tian vd., 2015). Ancak, tüm bu standartların büyük bir çoğunluğu Marston-Spangler teorisi ve bu teoriden yola çıkarak geliştirilmiş teorilerden faydalanarak türetilmiştir. Gömülü boruların yük deformasyon ilişkisi üzerine bilinen ilk kapsamlı çalışma Terzaghi göçme hipotezleri kullanılarak geliştirilmiş ve bu yük teorisi Anson Marston tarafından Iowa State Üniversitesi'nde ortaya konmuştur. Hendek ortamı içerisine konuşlandırılan borulara etkiyen yüklerin saptanmasına yönelik yürütülen araştırmaların başlangıcı olarak literatürde yer almaktadır (Marston ve Anderson, 1913). Gömülü esnek boruların deformasyon davranışlarının kapsamlı bir biçimde incelendiği ve literatürün temelini oluşturan en önemli çalışma ise Merlin Grant Spangler'in yayınlamış olduğu "Esnek Boruların Tasarımı" isimli araştırması olarak bilinmektedir (Spangler, 1941). Spangler, kapsamlı arazi deneyleri sonucunda ortaya koyduğu çıkarımlar sonrasında yarı amprik eşitlikler geliştirmiştir. Böylelikle, gömülü esnek boruların yük etkisi altındaki davranış farklılıklarının ve deformasyon büyüklüklerinin tespit edilebileceğini ileri sürmüştür.

Reynold Watkins ise 1958 yılında, geliştirilen eşitlik üzerinde zemin reaksiyon modülü katsayısını dikkate alarak geliştirmelerde bulunmuştur. Geliştirilmiş Iowa

Eşitliği olarak literatürde yer alan formülasyonun boru davranışını hassas bir biçimde temsil edilemediğine kanaat getiren bazı araştırmacılar ise yeni eşitlikler ortaya koymuşlardır. Bu süreçte, Greenwood ve Lang (1990) geridolgu ile doğal zemin arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak, McGrath (1998) ile Sargand vd. (2005) ise kemerlenme etkisi ile çembersel ve eğilme rijitliklerini dikkate alarak eşitlikler öne sürmüşlerdir. Burns ve Richard (1964) ise zemini tam elastik olarak kabul ederek, Hoeg ise 1966 yılında yanal itki katsayısını Poisson oranından bağımsız bir biçimde tanımlayarak eşitlikler ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Chua ve Lytton (1989) PE türü esnek boruların viskoelastik termoplastik karakteristiklerini boru davranışı ile ilişkilendiren bir çözüm sunmuşlardır.

Marston ve Spangler'in ortaya koyduğu ve geliştirdiği tasarı ve hesaplama yöntemleri ile bu kaynakların referans olarak alınıp ileri sürülen diğer metotlara ayrıntılı olarak Bölüm 2: "Tasarım ve Hesaplama Yöntemleri" kısmında değinilmiştir. Daha sonraki dönemlerde pek çok analiz yöntemi geliştirilip sektöre yansıtılsa da zemin bünyesindeki düzensizlikler, değişken yükleme koşulları ve belirli bir standartta tutulamayan kontrol altına alınması zor deney süreçleri, birtakım boru deformasyon davranışlarının hassas bir biçimde saptanmasını engellemektedir. Bu sebeplerden dolayı, boru-zemin ilişkisini daha şeffaf bir biçimde ortaya koymak ve daha kesin tasarım yöntemleri öne sürebilmek maksadıyla teorik ve deneysel araştırmalar günümüzde devam etmektedir. Ancak, arazi koşullarında sürdürülen deneyler daha gerçekçi sonuçlar verebilse de ortam koşullarının sürekli olarak değişmesi, sistem kurulumlarının uzun sürmesi ve yüksek maliyetlerin oluşması birçok durumda arazi deneylerinin gerçekleştirilmesi ve kesin sonuçlar vermesini olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı araştırmacılar çoğunlukla son zamanlarda arazi ortamını temsil eden laboratuvar deneylerini tercih etmektedirler. Bu doktora tezi çerçevesinde sürdürülen kapsamlı laboratuvar deneylerinde geridolgu ortamlarına yerleştirilmiş gömülü HDPE esnek boruların farklı sıkılık koşullarındaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca, atık araç lastiklerinin ve atık kauçuk granüllerin deformasyonu azaltmaya yönelik katkısının araştırıldığı bu çalışmada ANSYS programı kullanılarak nümerik analizler yapılmıştır.

Türkiye'de yaklaşık olarak her yıl 300000 ton araç lastiği ömrünü tamamlamaktadır ve LASDER verilerine göre bu miktarın 100000 tondan daha fazlası geri dönüşüme

kazandırılmaktadır. Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) kontrolü ve değerlendirilmesi, yönetmelikler, mevzuatlar ve kanunlar ile yürütülmektedir. Bu kapsamda, Çevre ve Orman Bakanlığı'nın Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği ve 2872 kanun numaralı Çevre Kanunu'nun bu referanslardan bazılarıdır. Ekolojik dengenin bozulmasının ve canlı sağlığının tehdit edilmesinin önüne geçmek amacıyla ÖTL yönetimi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada araştırılan konulardan bir tanesi de atıl halde bulunan araç lastiklerinin farklı bir uygulama tekniği ile boru hattı üzerinde güçlendirme malzemesi olarak kullanılmasıdır. ÖTL, lastik diş derinliğinin 1.6 mm veya daha altına düşen ve üretim amacına yönelik olarak tekrar kullanılamayacak halde bulunan lastikler için nitelendirilmektedir. Bayiler, dernekler ve kurumlar tarafından toplanan ÖTL'ler geri kazanım tesislerinde bütüncül, parçalı, kırçıllı, şeritli, granüllü vb. farklı şekillerde değerlendirilerek istiflenmektedir. Bu tezde ÖTL'ler, yarım halde boru hattı üzerine güçlendirme malzemesi olarak ve granüller halde üstdolgu ile yatak malzemesi olarak incelenmiştir. Uygulanan yöntemlerin üstünlük ve sakıncaları Bölüm 7'de "Deney Sonuçlarının Yorumlanması" başlığı altında belirtilmiştir.

Yürütülen çalışmaların birçoğunda, gömülü borular üzerine, geridolgu ortamlarına veya yataklama tabakasına takviyeler yapılarak ya da sağlam tabakalar oluşturularak deformasyonların azaltılması ve uzun servis ömrü sunulması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, geocell, geogrid, geosentetik, geofoam, geobelt, atık materyaller, dolgu malzemeleri vb. uygulamalar ile sürdürülen çalışmalardan bazıları literatürde şu şekilde yer almaktadır:

Teja (2018), statik yükleme altında gömülü boruların yüklemeler altındaki deformasyon davranışlarını incelemişlerdir. Statik yükleme etkisinde borunun üzerine gelen gerilmeler doğrultusunda enine kesit boyunca gözlemlenen deformasyonlar ve gömme boyunun deformasyon davranışına olan etkileri bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Daha sonra aynı şartlar altında geogrid takviyeler kullanılarak borunun yapısal performansı üzerine yorumlamalarda bulunulmuştur. Çalışmada, 0,6 m genişliğinde 1 m derinliğinde açılan hendek içerisine yerleştirilen boruların taç kısmı ve üzengi hattı üzerine gerilme ölçerler yerleştirilmiş olup yükleme süresince okumalar alınmıştır. Sistem üzerine 252, 504, 756, 1008, 1260 ve 1512 kg olmak üzere

yükler konularak her aşama için geogrid takviyelerin etkinliği incelenmiştir. Sonuç olarak, beklenildiği üzere gömme derinliğindeki artış borunun taç ve üzengi hattı kısımlarındaki sehimleri azaltmıştır. Ayrıca, gömme derinliği arttıkça geogrid takviyesinin etkinliğinin daha da artması çalışmada vurgulanmıştır.

Bir başka çalışmada, geosentetik ile güçlendirilmiş sistemler üzerindeki gerilmeleri ölçmek için geliştirilen geobelt sistemleri incelenmiştir. Geobelt sistemi, içerisinde bulundurduğu sensörler yardımıyla ölçüm fonksiyonlarına dayanarak deformasyon değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Farklı teknolojiler kullanılarak elde edilen HDPE ve HPP (sıcak piro-yoğunlaşma) boruları üzerinde izolasyon, hızlı ve yavaş olmak üzere iki tipte çekme testi ve süneklik testleri yapılmıştır. Sonuç olarak çekme testlerinde geosentetik takviyeli zemin ortamı içerisinde test edilen numunelerde deformasyon değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Ek olarak, katkı maddesi olarak karbon siyahı (CB) içeren HDPE boruların %44, %45, %47,5 ve %50 CB içerik oranları için gerilme – zaman ilişkilendirmeleri belirtilmiştir (Cui vd., 2018).

Geocell takviyeli zemin ortamlarına gömülü 250 mm çapındaki HDPE boruların tam ölçekli model testlerinin gerçekleştirildiği bir araştırmada, tekrarlı yükler altında üç boyut (3D) bazında incelemelerde bulunulmuştur. Boru çapının 1,5 ve 2 katı derinliklere gömülmek üzere 800 kPa tekrarlı yük altında 100 mm boyunda geocell takviyeler kullanılarak bir dizi deney yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, boruların deformasyon davranışında zemin yüzeyi oturmalarının, geocell kullanmanın ve boru üzerindeki transfer basıncının önemli ölçüde etkili olduğu gözlemlenmiştir. 110 mm x 110 mm bir cep boy geocell kullanımı doğrultusunda takviyesiz numunelere göre düşey radyal gerilmelerde %16, zemin yüzeyi oturmalarında ise %43'e varan azalmalar elde edilmiştir (Khalaj vd., 2017).

Gömülü boru hatları uygulamalarında iyileştirme yöntemlerinden biri olan geofoam aplikasyonlarının üzerinde çalışmalar yürüten Mane vd., (2017), görüntü işleme tekniği kullanarak ön yüzü şeffaf olan bir kutu üzerinden aldıkları verileri okuyarak yük ve deplasman değerleri üzerine yorumlamalarda bulunmuşlardır. Geofoam genişliğini ve yoğunluğunu değişken olarak belirleyen araştırmacılar geofoam kullanımının yüksek plastisiteli killi zemine gömülü boru üzerinde etkinliği hakkında sonuçlara varmışlardır. Sonuç olarak, geofoam kullanıldığı takdirde, boru üzerine

aktarılan gerilmenin azaldığı ve geofoam yoğunluğunun ve genişliğinin arttıkça boru üzerindeki yükün de azaldığı gözlemlenmiştir.

Kauçuk lastik kalıntılarını betonarme boru içerisine ilave ederek yük altında test eden araştırmacılar Trentin vd., (2016), rijit boruların gerilmelere karşı düşük direnç göstermesi, yüksek ağırlıkları, fazla su absorbsiyonu, çatlama kolaylığı ve kırılma eğiliminin fazla olması gibi dezavantajlarının ortadan kaldırılmasına yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışma sonuçları arasında, atıl halde bulunan kauçuk lif materyallerinin beton içerisinde kullanılmasının daha yüksek yük altında dahi ilk çatlama performansına olumlu etkilerde bulunduğu ve daha az su emdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerden yola çıkılarak, atıl kauçuk malzemelerin boru hatları ve sistemleri içerisinde farklı koşullarda kullanılabileceği önerilmiştir.

Fattah ve Redha, (2016) geocell takviyeli kumlu zemin yataklarına gömülmüş PVC boru üzerinde laboratuvar çalışmaları yürütmüşlerdir. Çalışmanın amacı, geocell takviyelerin sistem üzerine etkiyen dinamik yükleri nasıl karşıladığını ortaya koymaktır. Boruların dış çapı 110 mm ve et kalınlığı 1,4 mm olarak seçilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, geocell kullanılan deneylerde geocell kullanılmayanlara göre ortalama zemin yüzey oturmalarında %70, düşey yöndeki basınç değerlerinde %48 oranında azalmalar görülmüştür.

Nirmala ve Rajkumar, (2016) zemin özelliklerine bağlı olarak gömülü UPVC boruların mekanik davranışları üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Araştırmada, geogrid takviyeli ve takviyesiz olarak gevşek ve sıkı kum zemin ortamı içerisine UPVC borular yerleştirilmiş ve statik yükleme koşulları altında boru performansları incelenmiştir. Ayrıca, zemin – boru etkileşiminde boru üzerindeki zemin tabakası kalınlığı ve boru çapı üzerine yorumlamalarda bulunulmuş ve sonuç olarak boru üzerine uygulanan geogrid takviyelerinin UPVC boruların düşey yöndeki deformasyonlarını azalttığı gözlemlenmiştir.

Hegde ve Sitharam, (2015) çalışmalarında geocell takviyeli kumlu ortamlara gömülmüş PVC boruların davranışını laboratuvar ortamında ve nümerik çalışmalar ile araştırmışlardır. Araştırmacılar, yeraltına uygulanacak sistemlerde geocell takviyelerin etkinliğinin incelenmesi için 75 mm çapında ve 1,4 mm kalınlığında PVC

boruyu kumlu ortama gömerek ve araç yüklerine maruz bırakarak simüle etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, sisteme geocell takviyelerin yapılması borunun deformasyon değerlerinde bir düşüş göstermesini sağlamıştır. Ayrıca, geocell takviyeleri kum ortamında basınç değerlerinde %50, gerilme değerlerinde ise %40'tan fazla azalma gözlemlenmiştir. Ek olarak, deneysel sonuçlar FLAC3D kullanılarak 3 boyutlu nümerik yöntemlerle karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Mehrjardi vd., (2012) gömülü esnek boruların içerisindeki gerilmelerin azaltılmasına yönelik bir takım uygulamalar üzerine çalışmalarını yürütmüşlerdir. Bu amaç doğrultusunda tekrarlı yükleme koşullarında kauçuk esaslı parçalanmış atık lastikleri, zemin ile karıştırarak elde edilen dolgu malzemesi içerisine yerleştirilen gömülü esnek boruların davranışı incelenmiştir. Atık lastikler ufalanmış ve kıyılmış şeritler halinde olmak üzere 2 farklı formasyonda ve %5, %10 ve %20 karışım oranlarında dolgu malzemesi içerisine dahil edilmiştir. Yükleme sistemi dört farklı tekrarda yapılmış olup tüm deney seti geocell takviyeli olarak da teste tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, ufalanmış lastik parçacıkları ile zemin karışımı kullanılan deneydeki boruda tekrarlı yükler altında maksimum gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Ancak, şeritler halinde kıyılmış lastik parçacıklarının dahil edildiği karışımda zemin yüzeyindeki oturma değerleri ve borunun radyal genişlemesi azalmıştır. Ek olarak, gömülme derinliği arttıkça da borudaki yorulma azalmaktadır. Buna ilaveten geocell takviyesi ile beraber söz konusu değerlerde düşüş devam etmektedir. Deney setleri arasında, minimum zemin yüzeyindeki oturma değerini ve borudaki en düşük genleşim değerini %5 oranında şeritler halinde kıyılmış lastik parçalarının bulunduğu ve ortama geocell takviye edilmiş deney sağlamıştır.

Tafreshi ve Khalaj, (2008) kumlu zemin ortamı içerisine gömülü HDPE boru yerleştirerek araç yükleri altında zemin gerilmelerinin analizi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Borunun deformasyon değerleri sekiz farklı noktadan okunarak tüm testlerde gerilme şiddeti 5.5 kg/cm^2 uygulanmıştır. Deney setinde değişkenler kumlu zemin ortamının relatif sıkılığı, güçlendirme tabakalarının sayısı ve borunun gömülme boyu olarak belirlenmiştir. Araştırma, boru çapının 1,5 ile 3 katı arasında derinliklerde ve %42, %57, %72 relatif sıkılıklarda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, geogrid takviyesi kullanılan deneyde düşey yönde çap değişiminin ve zemin yüzey

oturmasının sırasıyla %56 ve %65'e düşebileceği ve gömülü boru hattının emniyetinin arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, relatif sıkılığın ve gömme derinliğinin artması takviye sayısı yüksekliğinin verimini azaltmıştır. Deney hassasiyeti için aynı mühendislik özelliklerine sahip boru, zemin ortamı ve geogrid türünün kullanılması da araştırmacılar tarafından önerilmiştir.

Rajkumar ve Ilamparuthi, (2008) gevşek ve sıkı kumlu zemin ortamlarına gömülen ve yüzey basınçlarına maruz bırakılan esnek PVC borular üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında, tüm deney setlerini geogrid takviyeli ve takviyesiz olarak incelenmişlerdir. Araştırma sonucunda, sisteme geogrid takviyesinin boruların taç kısımlarındaki deplasmanların azalmasına yardımcı olduğu ve sığ gömülme boylarının daha iyi koruma sağladığı gözlemlenmiştir.

Yine bir başka çalışmada Dash vd., (2003) bu sefer farklı bir yatak malzemesi (kil yataklı) kullanarak geocell uygulamalarını rijit bir dairesel temel sistemi altında incelemişlerdir. Sistem bir kutu içerisine yerleştirilmiş olup seri deneyler boyunca temelin üzerinde bulunan yük, temelin oturması ve oluşan deformasyonlar ölçülmüştür. Sonuç olarak, geocell ile iyileştirme yapılan deneylerde nihai taşıma gücü artmış ve temel yatağında oluşan deformasyonlar azalmıştır. Geogrid desteği ile yapılan deneyler de ise en iyi sonucu 7 kat fazla taşıma kapasitesi ile kil yatağı üzerinde bulunan ve üzerinde kum tabakası olan deney seti vermiştir.

Dash vd., (2001) laboratuvar şartlarında kum yataklı zemin ortamına geocell şilteli malzeme yerleştirerek zeminin ne ölçüde iyileşeceği üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Değişken parametreleri, geocell yerleşim şekli, hücre boyutu, hücre yüksekliği, hücre genişliği ve zemin üst kotundan itibaren derinliği olarak belirlemişlerdir. Farklı relatif sıkılıktaki zemin ortamında elde edilen deneyler sonucu oturmalar %50 oranına kadar azalırken nihai taşıma gücü değeri sekiz kat daha fazla kapasiteye kadar ulaşmıştır.

Çelik bir tank veya rijit bir kutu içerisinde geocell uygulamalar ile ilgili olarak araştırmacılar, farklı mühendislik özelliklerine sahip zeminlerde, farklı boyutlarda ve koşullarda geocell uygulamaları yürütmüşler ve değişkenler etkisinde ortaya çıkan sonuçları incelemişlerdir. Uygulanan geocell katmanın, gerilmelerin azaltılmasında etkin rol oynadığını öne süren araştırmacılar deformasyonların bu şekilde minimalize

edilebileceğini vurgulamışlardır (Dash vd., (2007); Pokharel vd., (2010); Latha ve Rajagopal, (2007)).

Yukarıda belirtilen çalışmalarda kullanılan tüm takviye malzemelerin ve oluşturulan tabakaların boru hatlarına ve sistemlere sağladığı katkıların yanı sıra finansal getirileri göz önünde bulundurulduğunda bu doktora tezi çalışmasında atık lastik ve kauçuk malzemelerin takviye olarak veya sönümleyici olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece, sektörde kullanılan takviyelerin beraberinde getirdiği yüksek maliyetlerin minimum seviyelerde tutulması hedeflenmiştir. Daha önce atık araç lastiklerinin, kauçuk granüllerin ve lastik parçalarının gömülü boru hatları üzerine yürütülen çalışmalarda kullanıldığı araştırmalar da literatürde mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır:

Atıl kamyon lastiklerinin depolanması ve imha edilmesinin sıkıntılarına dikkat çeken başka bir çalışmada Gattis ve Everett, (1996) lastikler parçalanmadan bütün bir halde karayolu drenaj borusu olarak kullanılmıştır. Sistem üzerinde yapılan gözlemler sonucu hat boyunca herhangi bir yapısal veya sızma sorunu ile karşılaşılmamıştır. Ancak, araştırmacılar boru ek bölgelerinde kısmi sızmalar gözlemlendiği için söz konusu bölgelerde iyileştirmeler ve geliştirmeler yapılması hususunda görüşlerde bulunmuşlardır.

Bütüncül olarak veya parçalanmış halde farklı sektörlerde ve kullanım alanlarında atık araç lastikleri ve atık kauçuk materyallerin kullanımına yönelik yürütülen başka bir çalışmada Kuo vd., (2003) ise kauçuk esaslı atık malzemelerin inşaat mühendisliği uygulama alanlarında değerlendirilmesi üzerine vurgulamalar yapılmıştır. Bu kapsamda bütün haldeki lastikler; dalgakıranlar, halka açık alanlar, erozyon kontrolü ve bariyerlerde kullanılabilirken birkaç parçaya ayrılmış haldeki atık lastikler; contalar, rondeleler, izolatörler, kemerler, yastık malzemeleri, rıhtım tamponlarında kullanılabilmektedir. Doğranmış, dilimlenmiş veya kırçıl haline getirilmiş lastik atıkları ise hafif dolgu malzemesi olarak veya bahçe düzenlemelerinde geri kazandırılabilmektedir. Parçalanıp preslenmiş haldeki atıklar da paspas, çamurluk, dolgu, demiryolu geçitleri ve asfalt kaplama katkısı olarak değerlendirilmektedirler. Tüm bu kullanım alanlarının yanı sıra alternatif olarak atık lastikler çeşitli boyutlarda, koruma tabakası oluşturulmasında, hendekler ve sondaj kuyularında, drenaj

sistemlerinde, dayanma yapılarında, kritik eğimli arazilerin stabilizasyonunda, geotekstil – lastik kompozit duvar ya da gaz depolama tesislerinin toplama alanlarında örtü tabakası olarak tercih edilmektedirler.

Değinilen çalışmaların ışığında, sportif faaliyetlerin gerçekleştirileceği alanların zeminlerinden otomotiv endüstrisine, yapıştırıcı sektöründen yalıtım sektörüne kadar pek çok daha inşaat, makine ve üretim mühendisliği alanına hizmet eden kauçuk kökenli malzemelerin kullanımı geçmişten günümüze revaçtadır. Bu kapsamda, Canadian Council of Minister of the Environment (Kanada Çevre Bakanlığı Konseyi, 1994) atık lastiklerin boru hattı uygulamalarında kullanımı üzerine tavsiye raporu sunmuştur ve American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Kurumu, 2004) söz konusu bu uygulamalar hakkında standartlar yayınlamıştır.

Ayrıca, bu çalışmaların haricinde atık lastiklerin geoteknik mühendisliği alanında geri dönüşümü üzerine birçok patent başvurusu ve uygulaması mevcuttur. Atıl haldeki lastiklerin zemin ortamlarına hem drenaj hem de stabilizasyon amaçlı gömülmesi pek çok farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır. Atık lastiklerin boru hatları üzerinde farklı amaçlarla kullanılması çerçevesinde patenti alınmış çalışmalardan bazıları şunlardır:

Atık su ve kimyasal madde karışmış suların zemin içerisinden aktarımı, sirkülasyonu ve depolanması üzerine önerilerde bulunmuş yatırımcılar Herd vd., (1998) atık lastikleri söz konusu amaçlar için dolgu ve iletim aracı olarak kullanmak üzere patent almışlardır.

Yine bir başka patenti alınmış projede ise Hater vd., (2001) atık lastik parçalarını parçalanmış ve öğütülmüş halde HDPE boru hatlarının üzerinde farklı özellik ve gradasyonlardaki geridolgu malzemesine karıştırarak kullanmayı önermişlerdir.

Yukarıda belirtilen çalışmaların haricinde laboratuvar koşullarında deney kutuları içerisinde gerçekleştirilen araştırmalardan bazıları ise aşağıda verilmiştir.

El Naggar (2011), kuru ve kohezyonsuz bir zemin ortamı içerisine yerleştirilmiş kutu menfez vasıtası ile statik ve sismik yükler etkisinde zeminde oluşan basınç dağılımlarını incelemiş ve kemerlenme hakkında yorumlamalarda bulunmuştur. Bir kutu içerisinde oluşturulan sistemin göçme durumları farklı formlarda ortaya çıkmıştır.

Bunlar; yanal yayılma, yüzey yenilmesi, menfezin tepe ve yanlarında toprak basıncının artması olarak tespit edilmiştir. Deney, iki farklı kalınlıktaki kutu menfezlerin %50 ve %90 relatif sıkılıktaki kuru kuma yerleştirilip sistemin toplamda yedi kez sarsılmasıyla teste tabi tutulmuştur. Konum sensörleri (LVDT, linear variable differential transformer) yardımıyla da sistemin tepe noktasından ölçümler alınarak sonuçlar elde edilmiştir.

Gömülü esnek boruların davranışı üzerine geleneksel bir yaklaşım olan Iowa eşitliğinin kullanıldığı bir çalışmada Akınay ve Kılıç, (2016) yatay yöndeki esnemelerin tahmini üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışmada, son yıllarda geliştirilmiş Iowa Eşitliği'nin eksiklikleri olduğu düşünülen taraflarına birtakım müdahalelerde bulunarak arazi ortamını en iyi şekilde yansıtılacak araştırmalar yürütülmüştür. Araştırmacılar, bu çalışmada Iowa Yaklaşımı ile Alman Standartları tarafından önerilen yöntemleri vurgulayarak örnekler üzerinden karşılaştırılmalar yapmışlardır. Deneylerde, üzerine kalın dolgular inşa edilen iki adet HPDE deney borusunun esnemeleri hesaplanmıştır. McGrath (1998) tarafından geliştirilen eşitliğin ve Alman Standardı'nın (ATV-DVWK-A 127E, 2000) sunduğu hesap yöntemleri ile boruların düşey ve yatay yöndeki esnemelerini gerçek ölçümlerle benzer sonuçlar göstermiştir. Kullanılan bu yöntemler ile yapılan hesaplamalarda tüm yükleme adımlarını yansıtan bir sekant modülünün kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği de araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Ayrıca, McGrath (1998) ve Sargand vd., (2005) eşitlikleri ile ilaveten bir deney seti daha yapılmış ve bu seride gömlekleme dolgusunun bir boyutlu sıkışma modülü Leonhardt Faktörü (Leonhardt, 1979) ile çarpılmıştır. Doğal zemin için Masada'nın (2009) çalışmasında ortaya koyduğu değerlerden seçilen E′ değeri gömlekleme dolgusu için belirlenen E′ değerlerine yaklaşık olduğu için söz konusu değişiklik sonuçlara fazla etkide bulunmamıştır. Ancak, doğal zemin koşullarının boru davranışını olumlu veya olumsuz etkileyebileceği durumlarda Iowa Metodu ile hassas bir tahmin elde etmek için zemin reaksiyon modülünün Leonhardt Faktörü ile çarpılarak düzeltilmesi gerekmektedir (Leonhardt, 1979).

Ayrıca, Akınay vd., (2016) yine bir başka HDPE boru üzerine etkiyen gerilmeler etkisindeki esnemeleri araştırdığı çalışmasında, laboratuvar ortamında incelemeler

yapmışlardır. Sıkışabilir malzeme olarak seçilen boru nominal çapının 1/6'sı kalınlığında, boru dış çapı genişliğinde ve 10 kg/m³ nominal yoğunlukta EPS geofoam panel üç farklı formasyonda boru tacı üzerine, boru tabanı altına ve hem boru tacı üstüne hem de boru tabanı altına olmak üzere yerleştirilmiştir. Sonuç olarak, boru tacı üzerinde yer alan EPS geofoam panel boru tacına etkiyen düşey gerilmeyi %76'ya kadar, boru tabanı altına yerleştirilen EPS Geofoam panel de boru tabanına etkiyen düşey gerilmeyi %49'a kadar azaltmıştır. Tek panel kullanılan sistemde 5-6 metre kalınlığında dolgu yükü altında borudaki esnemeler sıfıra yakın iken çift panel kullanımının yararlı bir çözüm olmadığı da gözlemlenmiştir (Kılıç ve Akınay, 2019).

HDPE boru deformasyon davranışının nümerik analizler ile incelendiği diğer bir çalışmada ise yine EPS geofoam malzeme kullanılarak düşük rijitlikli boruların yüksek rijitliklikli borular ile benzer davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Nümerik analizler Plaxis 2D programında HDPE boru için lineer elastik model, kumlu zemin ortamı için Pekleşen Zemin Modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Boru çevresinin EPS ile sarılması neticesinde boru üzerinde meydana gelen gerilmelerde %60 ile %70 arasında azalma tespit edilmiştir (Akyelken ve Kılıç, 2019).

Boru üzerinde güçlendirme elemanı olarak geogrid takviye ve EPS blok kullanılan başka bir çalışmada da UPVC ve HDPE boruların tekrarlı yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak araştırmada, geogrid güçlendirmeli ve EPS blokların kullanılmasının boru taç bölgesi şekil değiştirmelerinin ve zemin yüzey oturmalarının azalması bakımından önemli rol oynadığı vurgulanmıştır (Azizian vd., 2020).

Won (2009), araştırmasında zemine uygulanan takviyelerin temellerin taşıma kapasitesinin artmasına katkısını ve kumlu zemin ortamında gömülü esnek boru üzerindeki gerilmeler etkisindeki borunun deformasyonunu ne ölçüde azaltabileceği üzerine çalışmıştır. Deneyler, 880 mm x 450 mm x 980 mm ölçülerinde bir kutu içerisinde değişken parametreler takviye tabaka sayısı, takviye malzemesinin türü ve boru gömülme derinliği seçilerek laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. En iyi sonuçları iki takviye tabakası içeren deney seti gösterirken daha fazla takviye tabakası içeren deneylerde bir artış gözlenmemiştir.

Terzi ve Yıldırım, (2009) çalışmalarında esnek boruların düşey yükler altında şekil değişimlerinin ve zamana bağlı davranışlarının çelik ve beton malzemelerden imal edilen rijit borular ile mukayese edildiğinde pek çok bakımdan değişkenlik gösterdiğini ve düşey yükler altındaki deformasyon davranışlarının, geri dolgu malzemesi ve yerleştirme koşullarına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmada, 100 mm yarıçapındaki bir HDPE esnek borunun düşey yükler altındaki davranışı laboratuvar ortamında deney setleri kurularak incelenmiştir. Sistem, deney kutusu, şişebilen membran yastıklar, yağmurlama sistemi ve konum sensörleri kullanılarak oluşturulmuştur. Farklı zemin ortamları için yapılan uygulamalarda matematiksel analizler için Geliştirilmiş Iowa Yöntemini temel alan Masada Derivasyonu kullanılmış ve deney sonuçları ile matematiksel sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapılan yorumlamalar sonucunda geri dolgu malzemesinin boru davranışında önemli bir etken olduğu görülmüş, Masada Derivasyonunun boru dayanımının tahmininde güvenilir çözümler ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, ASTM ve ASTHO metotları dikkate alınarak oluşturulan sistemin doğal ortamı hassas bir şekilde yansıttığı görülmüştür. Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için kullanılan yöntem, aygıtlarının doğru ve hassas okumalar elde etmesini sağlamıştır ve bu açıdan Daley-Riley yönteminin doğruluğu görülmüştür. Ayrıca, Young modulü plaka yükleme deneyleri ile bulunmuş olup matematiksel analizlerden elde edilen sonuçlara bakıldığında plaka yükleme deney sonuçlarının doğru saptandığı anlaşılmaktadır. Zemin sıkılığı arttıkça boru deformasyonun azaldığı görülmüştür ve sıkılığın boru davranışı üzerinde çok ciddi ölçüde etkin olduğu görülmektedir. Boru kesitinde meydana gelen en büyük eğilme momentleri borunun yan duvarlarında oluşurken bu durum eşdeğer özellikte olan bir zemin ortamının ve yataklama seviyesi özelliklerinin boru davranışındaki etkisini ortaya koymaktadır.

Gömülü boru deformasyon davranışlarının nümerik analizler ile araştırıldığı, bilgisayar programlarının kullanıldığı ve modellerin öne sürüldüğü çalışmaların yer aldığı literatür taraması ise şu şekildedir:

Halabian ve Hokmabadi, (2018) fay hareketlerinin, toprak kaymalarının ve sıvılaşma olaylarının gömülü boru hatlarının davranışları ve hizmetlerine yönelik büyük ölçekli sorunlara sebebiyet verebileceğini vurgulamışlardır. Bunun üzerine, bu olaylar

etkisinde zeminde ve boruda oluşması muhtemel deformasyonların incelenmesi hakkında araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada, büyük deformasyonlar dahilinde çelik, oluklu ve oluksuz HDPE boruların sismik davranışı araştırılmıştır ve zemin-boru etkileşimindeki serbestlik derecelerinin sayısının azaltılmasına yönelik hibrit bir yaklaşım tercih edilmiştir. Bu metodoloji, borunun kendisinin yanı sıra boru etrafında hareket eden zeminin de sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi içermektedir. Yapısal performanslar üç ana analiz yaklaşımı şeklinde değerlendirilmiştir. Bunlar, "beam modelling", "shell modelling" ve "soil-shell" zemin malzeme modelleridir. Farklı analiz tiplerine göre metodolojilerden elde edilen sonuçlar arasındaki karşılaştırmalar, maksimum boyuna gerilmeler, basınç gerilmeleri ve boru deformasyonlarına bakılarak yapılmıştır. Ayrıca çalışmada, Riks metodu dikkate alınarak yapılan modellemelerde burkulma davranışı incelenerek analiz yöntemleri arasındaki karşılaştırmalar ele alınmıştır.

Rofooei vd., (2015) çelik ve HDPE borular üzerinde her iki eksende oblik ve ters atımlı faylanma davranışı üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. ANSYS programında yapılan modellemelerde değişken parametreler borunun malzeme türü, gömülme derinliği – boru çapı oranı, boru çapı – et kalınlığı oranı ve fay – boru kesişimi arasındaki açı olarak belirlenmiştir. İki malzeme türü için de elde edilen veriler sonuç olarak Kanada Petrol ve Gaz Hatları Birliği Standartları (2007) ile karşılaştırılarak sonuçlar tablolaştırılmıştır.

Dezfooli vd., (2014) Teksas'ta bir arazide üç farklı bölgede büyük çaplı boruların 3 boyutlu non-linear sonlu elemanlar analizi modelini oluşturarak incelenmelerde bulunmuşlardır. Araştırmacılar değişken olarak, kullandıkları malzemeyi, gömme derinliğini ve kanal genişliğini seçmişlerdir. ANSYS programı kullanılarak oluşturulan söz konusu modellemeler ile arazideki gerçek yüklemeler sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmış olup sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Noor ve Dhar, (2003) ASCE 1993 standartlarına uygun olarak trafik yükleri altında zemine gömülü boruların davranışına yönelik ANSYS programında 3 boyutlu modellemeler yapmıştır. Lineer elastik model kullanarak modellenen sonlu elemanlar analizinde sonuç olarak, gömülme derinliğinin en az boru çapının 1,5 katı kadar olması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca araştırmacılar, ASCE (1993) standartlarında yapılan

önermelerin hareketli yüklerin beraberinde getireceği etkiler üzerinde yakın tahminlerde bulunduğunu, gerilme dağılımlarının enine ve boyuna doğrultuda benzer olduğunu ve her bir teker yükünün etkisinin yükleme alanından 1 m uzakta azalmaya başladığını vurgulamışlardır.

ANSYS programı ile gömülü borular üzerinde sadece deformasyon, gerilme, burkulma, ezilme vb. davranış analizlerinin yanı sıra ısı transferi, sızma, akış, şebeke (ağ), zemin boru etkileşimi, çelik veya çelik takviyeli borular için korozyon davranışı, sismik etki altındaki davranış gibi analizler de araştırmacılar tarafından yapılmıştır (Xu ve Feng (2017); Xu vd., (2017); Qasim (2017); Hosseini ve Ajideh, (2001); Öner (2016); Dezfooli vd., (2014)).

HDPE borular ve zemin içerisindeki davranışı ile ilgili LUSAS programı ile gerilme analizleri yapılan çalışmalar da literatürde mevcuttur. Islam ve Masud, (2011) Malezya'da gerçekleşen bir vaka sonucunda hasar alan HDPE boruların LUSAS programında modellemeleri ve analizlerini yaparak vakadaki değerler ile paralel sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmada, 600 mm uzunluğunda dört adet hasarlı örnek ve 200 mm uzunluğunda çift cidarlı HDPE boruların hasarsız numuneleri laboratuvarda birtakım testlere tabi tutulmuştur. Numunelerin aşırı dolgu yükünden dolayı hasar gördüğü tespit edilmiş ve %5'lik deformasyonu (7,5 mm) belirlenen (450 N) yüklerden çok daha düşük değerlerde (300 N) aldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuç olarak, vaka değerleri ile karşılaştırıldığında LUSAS programından elde edilen veriler, bu kapsamda borular üzerinde yapılan deneylerden çok daha fazla yakın sonuçlar ortaya koymuştur. Borunun mekanik davranışı üzerine numunelerin deformasyon davranışı ANSYS ile incelenmiştir ve vakadaki ile benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

LUSAS yapısal analiz programı ile modellemesi yapılan bir başka çalışmada GFRP (fiberglas ile güçlendirilmiş plastik) borular için statik analizlerde bulunulmuştur. Araç yükleri, düşey ve yanal zemin basınçları etkisinde dokuz tipte boru maksimum gerilme değerleri ve deplasmanları açısından değerlendirilmiştir. Boru uzunluğu boyunca ve radyal gerilmeler bakımından incelenen boru üzerinde LUSAS programı vasıtasıyla okunabilmektedir (Han vd., 2010). Ayrıca LUSAS ile modellenmiş ve analiz edilmiş bu çalışma haricinde gömülü boruların bağlantı ve birleşim bölgeleri ile ilgili araştırmalarda da bulunulmuştur (Han vd., 2012).

Boruların termal davranışlarının incelendiği bir yüksek lisans tezi çalışmasında ise polimer kompozit esaslı borular üzerinde termal etkileşimlerin boru davranışına etkileri incelenmiştir. Değişken sıcaklıklarda ve sıvı kimyasına maruz kalan kompozitlerin mekanizmalarının anlaşılması ve dayanıklılıklarının geliştirilmesi gerektiği vurgulanan çalışmada, jeotermal sıvıyla değişik matriks malzemelerden (polyester, epoksi ve karbon parçacıkları içeren) oluşan kompozit borular arasındaki etkileşiminin ve bu kompozitlerdeki bozunum mekanizmaları üzerinde odaklanılmıştır. Numuneler üzerinde, gerilme-uzama davranışları, elastik modüller, kırılma noktasındaki uzama değerleri ve enerji emme miktarlarının bulunması için mekanik deneyler yapılmıştır. Daha sonra, üretilen değişik türlerdeki kompozitlerin ısı kayıpları ve sıcaklık dağılımlarının analizi için ısıl iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. İzolasyonsuz farklı elemanlardan meydana gelen boru kesitlerindeki sıcaklık dağılımları ise LUSAS bilgisayar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, polyester kompozit boruların diğer epoksi kompozit borulara göre eksenel ve radyal baskı altında daha yüksek mekanik performansa sahip olduğu bulunmuştur (Toğulga, 2003).

Bir başka yüksek lisans tez çalışmasının ilk kısmında zemine gömülü boruların yerleşim formasyonları, boruya gelen yüklerin hesaplanması, zemin – boru rölatif rijitlikleri ve boru dizaynını etkileyen unsurlar anlatılmıştır ve tez çalışmasının ikinci kısmında LUSAS programı ile farklı zemin ortamlarında geridolgu yükseklikleri ve boru çapları değişken olarak belirlenerek analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yataklamanın, boru çapının ve geridolgu yüksekliğinin boru üzerindeki gerilmelere nasıl bir etkide bulunacağı incelenmiştir (İşkan, 2001).

Demirci (2014), araştırmasında yanal yönde kalıcı zemin deformasyonlarına maruz kalan boru hatlarının davranışı, değişken boru et kalınlıkları, boru tipi, boru çapı, kalıcı zemin deformasyonu tipi ve genişliği, kalıcı zemin deformasyon miktarı, zemin ortamının içsel sürtünme açısı, borunun gömülme derinliği için ABAQUS programı yardımıyla analiz edilmiştir. İlk analiz grubunda öncelikle diğer parametreler sabit tutularak boru et kalınlığı 2 mm ile 8 mm arasında daha sonra yine diğer tüm parametreler sabit tutularak bu sefer boru çapı 0,5 m ile 1 m arasında seçilmiştir. Aynı şekilde daha sonra da zeminlerin kayma mukavemeti açısı sırasıyla 25°, 30° ve 35°,

gömülü boru derinlikleri ise sonlu elemanlar modellerinde 0,6 m, 0,8 m, 1 m ve 1,2 m olarak seçilmiştir. Maksimum yanal kalıcı zemin deplasmanı değerleri ise 1,3 m, 3 m ve 5 m olarak seçilmiş olup farklı zemin deformasyonları altında gömülü boru davranışı incelenmiştir. Yanal kalıcı zemin deformasyonu bölgesi genişliği 10 m, 30 m ve 50 m olarak sonlu elemanlar modellerinde analiz edilmiştir. Deney setlerinde kullanılan çelik borular X-42, X-52, X-60 ve X-70 olmak üzere 4 farklı tipte belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarında, maksimum ve minimum boru eğilme momenti ve maksimum boru deplasmanları elde edilmiştir. Maksimum ve minimum boru momentlerinin ve maksimum boru deplasmanlarının boru çapına, boru et kalınlığına, boru tipine, kalıcı zemin deformasyonu tipi ve genişliğine, kalıcı zemin deformasyonu miktarına, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısına ve boru gömülü derinliğine bağlı olarak değişimi gözlemlenmiştir. Ek olarak, farklı kalıcı zemin deformasyonunun görüldüğü bölgelerin genişlikleri için boruda oluşan deplasman dağılımları saptanmış ve kullanılan kalıcı zemin deplasmanı dağılımı ile boruda oluşan deplasman dağılımları mukayese edilmiştir. Araştırmacının çalışması ayrıntılı olarak incelendiğinde diğer sonuçlar şu şekilde karşımıza çıkmaktadır:

- İnce et kalınlığına sahip boruların daha esnek bir davranışa sahip olduğu sonucu çıkarılmıştır.
- Rijit borular esnek borulara göre daha az deplasman göstermektedirler.
- Boru rijitliğinin artması borudaki eğilme momentlerini de arttırmaktadır.
- Kalıcı zemin deformasyonu bölgesinin genişliği yanal kalıcı zemin deformasyonuna maruz boru davranışını ciddi ölçüde etkilemektedir. Boru, kalıcı zemin deformasyonu bölgelerinde rijit bir boru gibi davranış sergilemektedir.
- Boru geniş kalıcı zemin deformasyonu bölgelerinde ise esnek boru gibi davranmaktadır. Kalıcı zemin deformasyonu modelleri bölgesel ani kalıcı zemin deformasyonu ve yayılı dağılı zemin deformasyonu olarak ikiye ayrılmakta ve boru davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.
- Yayılı dağılı zemin deformasyonu modelinde maksimum ve minimum boru momentleri kalıcı zemin deformasyonu merkezinde ve sınırlarında ortaya çıkmaktadır.

- Bölgesel ani kalıcı zemin deformasyonu modelinde ise kalıcı zemin deformasyonu merkezinde ve sınırlarında boru momentleri neredeyse sıfırdır.

Bir başka gömülü boruların deformasyonlarının incelendiği çalışmada, HDPE boruların iki boyutlu (2D) sonlu elemanlar modeli ile analizi ele alınmıştır. Boru çapı olarak 0,3 m ve 0,6 m belirlenmiş olup zemin sıkılık derecesi %95 seçilmiştir. Farklı kalınlıklardaki zemin örtüsü değerlerine göre PLAXIS 2D programında boru çevresindeki gerilmeler ve gerilmeler etkisindeki deformasyonlar analiz edilmiştir ve nümerik ilişkilendirmeler verilmiştir (Zhou vd., 2017).

Tüm bu deneysel ve nümerik çalışmaların haricinde, deney kutularına yerleştirilen malzemelerin (pvc, hdpe, alüminyum, çelik vb. esaslı) zemin ile olan ilişkilerinin araştırıldığı çalışmalar, geçirimlilik deneylerinin yapıldığı testler, sarsma tablası düzeneği ile üzerine yerleştirilen kutu deneyleri, bir tarafı hareketli duvar olan kutu deneylerinde yanal sıkıştırma ile uygulanan mobil düzenekler, bir tarafı pleksiglas şeffaf duvar olan kutu deneylerinde uygulanan görüntüleme teknikleri, nümerik analiz ile yapılan modellemelerin deneysel çalışma ile karşılaştırıldığı çalışmaları ele alan araştırmalar gibi büyük ölçekli kutuların içerisinde uygulamaların yapıldığı birçok yayın literatürde yerini almıştır.

Gömülü HDPE boruların deformasyon davranışında önemli bir rol oynayan farklı zemin oturmalarını ele alan bir çalışmada tam ölçekli seri model deneyler yapılmıştır. 300 mm ve 400 mm çaplı üç adet HDPE çift katmanlı koruge boru 0,6 m ve 0,9 m gömülme derinliklerinde incelenmiş olup yük etkisindeki davranışları incelenmiştir. Çalışmada geridolgu malzemesi olarak Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi' ne göre (USCS) kötü derecelendirilmiş (SP) Yangtze Nehri kumu kullanılmıştır ve uniformluk katsayısı 2,86, eğrilik katsayısı 0,94 olarak belirlenmiştir. Deney sistemi rijit bir kutu içerisinde gerçekleştirilerek yük etkisindeki boru deformasyonları hakkında veriler elde edilmiştir. Ayrıca, zemin yüzeyi üzerinden oturma değerleri okunarak borunun üç farklı kesitindeki deformasyonlara göre yorumlamalar yapılmıştır. Sonuçlar doğrultusunda, borunun düşey yöndeki deplasman değeri gömülme derinliği ile birlikte artmakta ve boru çapının azalması ile birlikte azalmaktadır (Zhou vd., 2017).

Jahromi vd., (2018) deprem kaynaklı toprak kaymasına bağlı olarak farklı gömme derinliklerinde eğim faktörü ve boru performansının değişimini incelemişlerdir. 1G ölçekli bir sarsma tablasında üç fiziksel model oluşturulan çalışmada, sistemde şevin dört farklı bölgesi deneysel olarak araştırılmıştır. Üç farklı gömme derinliğinin incelendiği araştırmada, bu derinlikler laboratuvar ölçeğinde 11, 21 ve 31 cm olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ise deformasyonları azaltmak için en iyi çözümün boruların toprak kaymasının etkilediği bölgelerden geçmemesini sağlamaktır. Diğer bir deyişle araştırmacılar, boru güzergahının iyi seçilmesinin öncelikli hedef olarak belirlenmesinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Yeni geliştirilmiş bir ardışık limit analiz (SLA, sequantial limit analysis) tekniği ile deniz altında yer alan boru hatlarının yanal burkulma ve deformasyon davranışlarını inceleyen bir başka çalışmada, boru ile zemin ilişkisi araştırılmıştır. (Kong vd., 2017).

Deniz içerisine yerleştirilen HDPE esnek boruların uzun servis ömrü verebilmesi için GFRP (cam elyaf takviyeli polimerler) ile güçlendirilmiş boruların su hareketleri doğrultusunda sıklıkla deformasyona uğramasını engellemeyi hedefleyen Rajendran vd., (2018), IS11551, BS2782, IS11273, IS11320, ASTM D792, ASTM D648 ve ASTM D638 standartları rehberliğinde hesaplamalarda bulunarak boru dizaynında fikirler ortaya koymuştur. Sonuç olarak, denizden gelen yüklerin tahmini yerel koşullara ve boru hattı tarafından taşınan maddenin türüne bağlı olduğu belirtilmiştir.

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru, nükleer enerji santralinde (NPP) güvenlik ve emniyetle ilgili olmayan uygulamalarda soğutma suyunu taşımak için başarıyla kullanıldığını belirten bir çalışmada Zheng vd., (2018) NPP'de HDPE borusu için uygulanabilir bir NDE tekniğinin bulunmaması nedeniyle şu anda uygulanabilir hiçbir standardın bulunmadığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, NPP' de hem HDPE boru için hem de 400 mm'den daha küçük çapa ve daha büyük bir boyuta sahip NDE teknolojisindeki güncel gelişmeleri ele almaktadır. Ayrıca, ilgili yönetmelik ve standartların güvenlik ve verimlilik gerekliliklerine uygun olarak etkili bir ultrasonik test yöntemi elde etmek için bu çalışmada ana teknik problemler analiz edilmiştir.

Zhou vd., (2018) çalışmalarında, açık deniz boru hatları üzerinde killi zemine kısmen gömülmüş ve hem düşey hem de yanal yönde yüklemeye maruz kalan boru hattının

taşıma kapasitesinin tespitine yer vermişlerdir. Boru ve zemin arasında çekme gerilmelerinin varlığına dikkat çeken çalışmada, farklı yük kombinasyonlarının boru hattı davranışına olan etkileri incelenmiştir ve araştırmacılar benzer çalışmalarda varılan sonuçlar ile kıyaslamalarda bulunmuşlardır (Cheuk vd., (2008); Randolph ve White (2008); Hodder ve Cassidy (2010); Zhang vd., (2002); Tian vd., (2015); Merfield vd., (2008); Chatterjee vd., (2012); Dutta vd., (2015)). Sonlu elemanlar analizi kullanılarak yürütülen çalışmanın sonucunda, gerilim katsayısının arttıkça yatay taşıma kapasitesinin de önemli derecede arttığı gözlemlenmiştir.

Gömülü boruların performansının sismik dalga yayılımından ve faz dışı indüksiyon hareketine bağlı olarak etkilendiğini vurgulayan başka bir çalışmada Saberi vd., (2011), sismik tepki altında gömülü borunun büküm bölgesinde meydana gelen büküm açısı ve zemin mekanik özelliklerinin etkisinin değerlendirilmesi üzerine üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak boru ve boru-zemin etkileşimi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Çap-kalınlık oranı ve gömülme oranı değişkenler olarak belirlenirken neticede, çap – kalınlık oranının gömülme oranına göre daha dikkat edilmesi gereken bir unsur olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, tez çalışmasının ilerleyen süreçlerinde deformasyon okumalarının hassas ve doğru olması için Reddy ve Ataoğlu (2002) ve Hauch ve Bai (2000) çalışmalarından örnek hesaplamalar incelenmiştir. Söz konusu çalışmalarda borular üzerinde oluşan eğilme momentlerinin sistem üzerine etkisinden bahsedilmiştir.

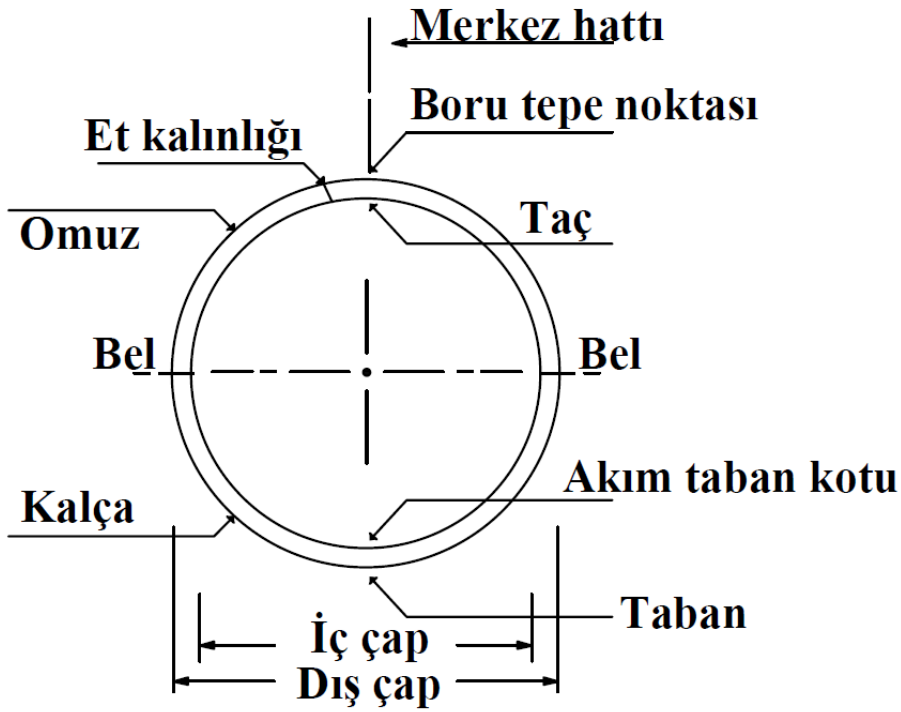
Birçok farklı amaca yönelik olarak kullanılan gömülü boruların maruz kaldıkları yükler etkisinde gerilme analizinin ayrıntılı bir biçimde incelenmesi gerektiğini vurgulayan Abdulaliyev vd., (2015) araştırmasında iç basıncı olmayan, dairesel halka kesitli, gömülü esnek boruların gerilme analizinde fotoelastisite metodu kullanmışlardır. Çalışmada, model üzerine etkiyen yükler, gömülme ortamının ağırlığı ve bu ortamın üst yüzeyinden uygulanan dış yük etkilerinin birleşiminden oluşturulmuştur. Modellerde oluşan fotoelastik şeritler ile halkanın iç ve dış kenarları boyunca asal gerilmelerin farkının dağılımı elde edilmiştir.

Deneysel çalışmaların dışında arazide canlı yüklemeler altında tam ölçekli testler de gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Arockiasamy vd., (2006), HDPE ve PVC borulardan oluşan altı farklı tipte esnek boruyu 900 mm ve 1200 mm'lik çaplarda olmak üzere

arazide kötü derecelendirilmiş kum ve silt içeren geri dolgu malzemesi içerisine yerleştirmişlerdir. Yükleme koşulları ise her bir dingil yükü 181 kN olan kamyonun sistem üzerinden geçirilmesiyle oluşturulmuştur ve değişkenlerin boru davranışını nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, deney sonuçları sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. GÖMÜLÜ BORULARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

En genel tarifleri ile dairesel kesitli boruların geometrik özelliklerini yansıtan terimler Şekil 2.1'deki gibi adlandırılmaktadır. Tipik bir boru kesiti dikkate alındığında tepe bölgesine taç, yan duvarlara bel, taç ile bel arasındaki orta noktalara omuz, dip kısma taban ve bel ile taban arasında kalan bölgeler ise kalça olarak tanımlanır.



Şekil 2.1. Boru kısımları ve geometrik terimler.

Boruların mukavemet ve tasarım kriterlerini belirleyen beş parametre bulunmaktadır. Bunlar:

E: Elastisite modülü,

υ: Poisson oranı,

I: Atalet momenti,

A: Kesit alanı,

r: Yarıçap,

D: Çap.

Yukarıdaki parametrelerin mukavemet değeri borunun servis ömrü ve zaman içindeki deformasyon niceliğini belirler. Hendek ortamı dışında, elastisite modülü, atalet momenti, et kalınlığı, kesit alanı ve boru çapı, borunun davranışını belirleyen karakteristik değerlerdir. Bu kapsamda, borunun eğilme rijitliği Eşitlik 2.1, çembersel rijitlik Eşitlik 2.2 ve atalet momenti ise Eşitlik 2.3'teki gibi gösterilmektedir.

$$\text{Borunun eğilme rijitliği: } E.I/D^2 \tag{2.1}$$

$$\text{Borunun çembersel rijitliği: } E.I/D^3 \tag{2.2}$$

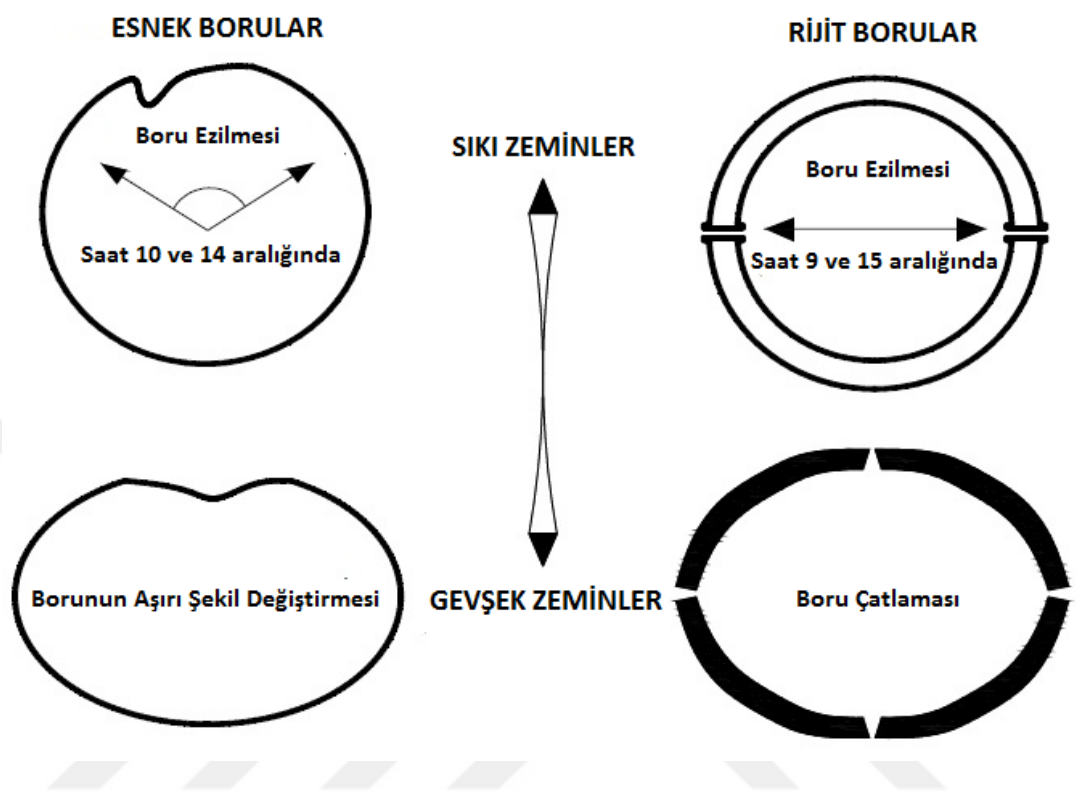
$$\text{Atalet momenti: } I = t^3/12 \tag{2.3}$$

2.1 Esnek ve Rijit Boruların Farklılıkları ve Teknik Özellikleri

Gömülü borular, dış kuvvetler doğrultusunda kesitlerinde oluşan şekil değiştirmelere ve bu kuvvetlere karşı gösterdikleri zamana bağlı davranış türüne göre esnek veya rijit boru olarak sınıflandırılmaktadır. Esnek borular, üzerlerine aktarılan yük etkisinde esneme, uzama, burulma kabiliyeti bulunan ve deformasyon almaya devam ederken yük taşıyabilen borulardır. Kesitlerinde var olan gerilmeleri nispi olarak yataklama ve yan geri dolgulara aktararak servis kabiliyetini koruyabilirler. Rijit borularda ise kuvvet etkisinde esneklik davranışı gözlemlenmez ve boru üzerinde kalıcı plastik şekil değiştirmeler gözlemlenir. Kritik düşey yükler ekseninde boru dönülemez nitelikte deformasyonlar gösterir (Sun vd., 2005; Jonasson ve Watkins, 1998); Lueke ve Ariaratnam, 2005). Rijit borular, yükü boru taç bölgesinden yataklama tabakasına kadar aktararak gerilme alırken esnek borular geridolgunun yanal pasif itkisinden faydalanarak yükü yan duvarlarından geridolguya aktarırlar. Bir başka ifade ile esnek borularda oturmalar, geridolgu ile zeminin birbirlerinden farklı şekillerde yaptığı hareketler sebebiyle taç bölgesinde oluşmakta iken rijit borularda oturmalar büyük oranda hendek kenarlarında gözlemlenmektedir.

Aşırı düşey yüklemelere maruz kalan esnek ve rijit boruların göçme biçimlerine göre de davranış özellikleri vardır. Aşırı yükler altında gevşek ve sıkı ortam koşulları için şekil değiştirme formları Şekil 2.2'de görülmektedir. Geridolgu malzemesinin gevşek yerleştirildiği durumlar için esnek borularda burulma ve aşırı şekil değiştirmeler

gözlemlenirken rijit borularda boru duvarlarında ezilmeler ve yatay ile düşey eksen birleşimlerinde çatlaklar göstererek ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.2. Aşırı yüke maruz esnek ve rijit borulardaki göçme biçimleri (Wang, 2002).

Boruların sınıfının belirlenmesinde Amerikan Su İşleri Dairesi'nin (1997) önermiş olduğu Çizelge 2.1'de verilen deformasyon limit değerleri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Esnek ve rijit boruların şekil değiştirme sınırları (AWWA M.45, 2002).

Boru Sınıfı	Boru Çapına Göre Şekil Değiştirme Yüzdesi (%)
Rijit	0,1
Yarı Rijit	<3,0
Esnek	>3,0

Rijit boruların yük taşıma kapasiteleri doğrudan boru ve imalatta kullanılan malzemenin mukavemeti ile ilişkilidir. Rijit boruların tasarımında ideal boru tür ve geometrisinin seçilmesi için öncelikle geri dolgu yükü hareketli ve gerekli ise dinamik

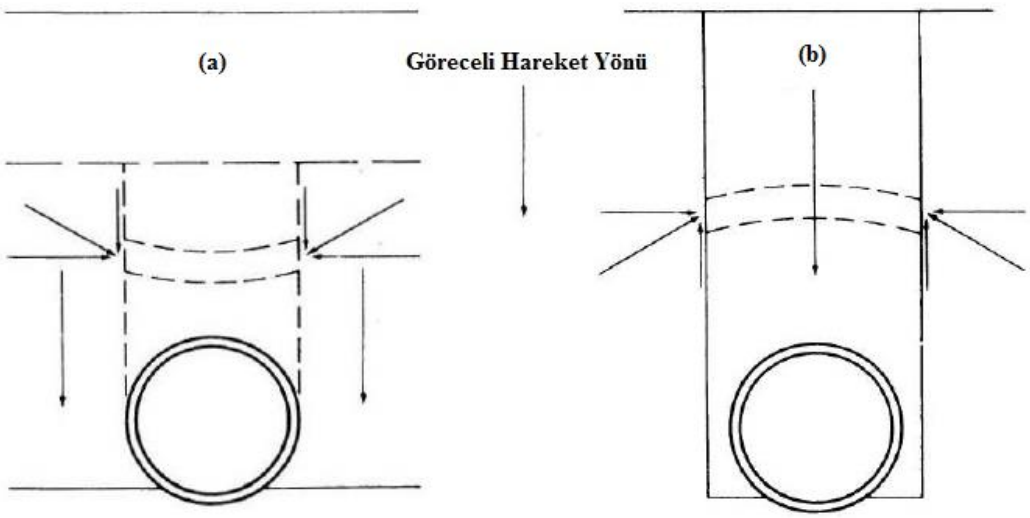
yükler dikkate alınmalıdır. Daha sonra yataklama türü ve bu yataklama türüne göre yük faktörleri belirlenir. Güvenlik katsayısı ile emniyetli tarafta kalındıktan sonra boru mukavemeti tayin edilmektedir.

Esnek boruların yük taşıma kapasiteleri ise borunun yatay yönlü şekil değiştirmelerine karşı meydana gelen pasif toprak basıncının direnci ile ilişkilidir. Tasarım aşamasında yük, boru çevresindeki zeminin rijitliği ve boru rijitliği büyük önem taşımaktadır. Borulara etkiyen yükler prizma yükü teorisi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Esnek boruların şekil değiştirme sınırları eğilme kapasitelerine bağlıdır (Moser, 1990; Ayalp, 2006).

Kemerlenme etkisi:

Hendek ortamı içerisinde boru hattının davranışını gömülü borunun geometrik ve mekanik özellikleri ile geridolgu malzemesinin geoteknik özellikleri belirler. Üç farklı mühendislik özelliğine sahip malzemelerin değişken koşullarda bir arada hizmet vermesi için farklı mühendislik özelliklerinin beraber ele alınması gerekmektedir. Malzemelerin mukavemet özelliklerine bağlı olarak şekil değiştirmelerin ortaya çıktığı göz önüne alınırsa boru yan duvarları çevresindeki malzemelerin birbirlerine göre gösterdikleri relatif hareketler sonucunda boru taç kısmında kemerlenme etkisi meydana gelir. Zemin mobilizasyonu ile ortaya çıkan kemerlenme durumunun niceliği ve davranışa etkisi özellikle esnek boruların davranışı açısından önemli bir parametredir. Bilinen iki tür kemerlenme mekanizması bulunmaktadır. Bunlar Şekil 2.3'te gösterildiği gibi pozitif projeksiyonlu (olumlu kemerlenme) ve negatif projeksiyonlu (olumsuz kemerlenme) olarak adlandırılır.

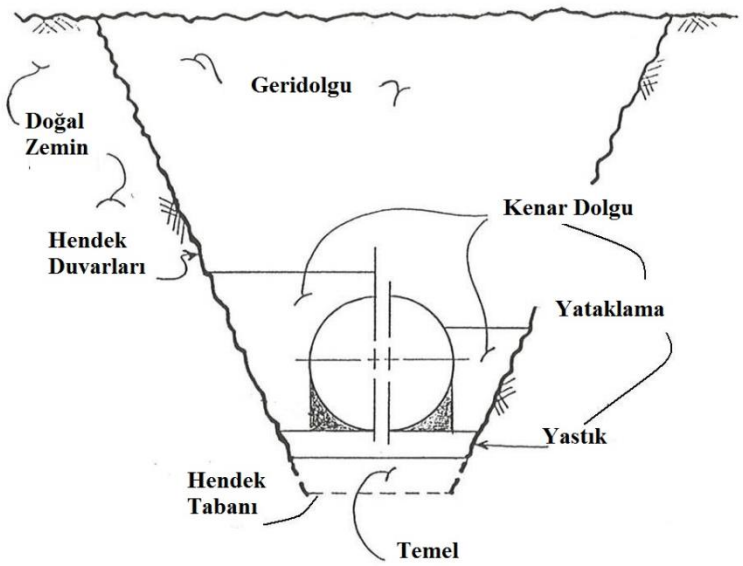
Pozitif projeksiyonlu durumda boru yan kesitinde yer alan dolguların yan yüzeylerde, boru üzerindeki dolgudan daha az miktarlarda oturma meydana gelmesi olayıdır. Bu sayede boru taç kısmındaki yük hafiflemektedir. Negatif projeksiyon durumunda ise bunun tam aksine boru tacı düzlemine etkiyen yük dağılımı olması gereken sürşarj yükünden daha büyük değerlerde meydana gelmektedir (Terzi, 2007).



Şekil 2.3. Kemerlenme mekanizmaları, (a) negatif projeksiyon, (b) pozitif projeksiyon durumu (Spangler ve Handy, 1982).

2.2 Gömülü Borular Üzerine Etkiyen Dış Yükler

Boru performansı üzerinde dış yüklerin aktarmış olduğu kuvvetler, doğal zemin üzerinden geridolgu ortamına, hendek duvarlarına, kenar dolgulara, yataklama tabakasına, yastık bölgesine kısaca etki aralığındaki hendek ortamına ulaşmaktadır. Bu kapsamda boru performansına etki eden zemin bölgeleri Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Boru performansına etki eden zemin bölgeleri (Ayalp, 2006).

2.2.1 Zemin yükü

Gömülü borularda boyutlandırma ve tasarım aşamaları statik zemin yükü ve hareketli yüklerin büyüklüğü esas alınarak yapılmaktadır. Kaplama tabakası ve temel tabakasının düşük kalınlıklarda olduğu hendek yerleşimlerinde trafik yüküne bağlı tekrarlı ve dinamik yükler daha etkin bir şekilde gömülü boru kesitine etkimektedir. Böylesi ortamlarda zemin yükünden aktarılan gerilmeler hendek ortamındaki geridolgu yükleri ile birlikte ele alınarak hesaplanmalıdırlar (Linsley, 1992; ASTM B 788/B 788 M, 2004). Bu değerlendirmeler çerçevesinde elde edilen Eşitlik 2.4 aşağıda verilmiştir.

$$P_0 = C.\gamma.D.B \tag{2.4}$$

Burada;

P_0: Zemin jeolojik yükü (N/m),

C: Zemin yükü katsayısı,

ɣ: Zemin özgül ağırlığı (N/m^3),

D: Boru dış çapı açısı,

B: Hendek genişliği.

Hendek ortamındaki C katsayısının hesaplanması Eşitlik 2.5'te verilmiştir. Bu eşitlik içinde yer alan "K" dolgu – hendek arası sürtünme katsayısı ise Eşitlik 2.6'da gösterildiği gibidir.

$$C = \frac{1-e^{-2.K.\mu.\frac{H}{B}}}{2K\mu} \tag{2.5}$$

Burada;

H: Dolgu yüksekliği (m),

B: Hendek genişliği (m),

$$K = \frac{1 - sin\phi}{1 + sin\phi} \tag{2.6}$$

ϕ: İçsel sürtünme açısı.

2.2.2 Hareketli yükler

Hareketli yüklerin hendek derinliği boyunca tespiti Boussinesq yönteminin önerdiği gerilme dağılımlarına göre hesaplanmaktadır. Boussinesq (1885), yüzey üzerindeki noktasal yükün sebebiyet verdiği gerilmelerin zemin kütlesindeki dağılımını çözümlemiştir. Hesaplamalarda zeminin yarı sonsuz homojen, izotrop ve elastik olduğu varsayılmıştır. Bu bakımdan, zemin yukarıda ele alınan özellikleri tam olarak yansıtmasa da ölçümler neticesinde elde edilen değerler ile makul sonuçlara ulaşıldığı gözlemlenmiştir (Bull, 2002).

Hareketli yükler içerisinde trafik yükleri, boru hatları üzerindeki gerilmelerin dağılımı, şiddeti ve deformasyon potansiyeli açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bu konuda, trafik yüklerinin hesaplanması yine Boussinesq eşitliği (Eşitlik 2.7) kullanılarak yapılmaktadır (BS 9295, 2010).

$$P_t = \frac{3.Q_t}{2.\pi.H^2}.D \tag{2.7}$$

Burada;

P_t: Trafik yükü (N/m),

Q_t: Tekerlek yükü (N),

D: Boru dış çapı (m),

H: Dolgu yüksekliği (m).

Hareketli yükler kapsamında trafik sınıflarına göre tekerlek başına gelen toplam yük değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Trafik sınıflarına göre yük değerleri.

Trafik sınıfları	Toplam yük (kN)	Bir tekerleğe gelen maksimum yük (kN)
Ağır trafik	600	100
Orta trafik	450	75
Hafif trafik	120	50
Otomobil	30	10

2.2.3 Boru hattı boyunca etkiyen yükler

İdeal şartlar altında ve deneyimler çerçevesinde elde edilen bilgiler ışığında yalnızca zemin yükü ve hareketli yüklerin etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak, bu yüklerin haricinde net bir şekilde tahkiki yapılamayan değişken, bölgesel ve eksenel eğilme oluşturabilen büyük ölçekli yüklerin de olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Moser, 1990).

2.2.4 Don etkisi sonucunda meydana gelen yükler

Soğuk iklim şartlarının sert ve uzun sürdüğü dönemlerde, doğal zemin yüzeyine yakın bölgelerde biriken su molekülleri, buz kesitleri veya buz kristalleri meydana getirmektedir. Don etkisi, su miktarında azalmaya sebep olduğu için kapiler kuvvetler etkisiyle don derinliği altındaki yeraltı suyu zamanla yükselmektedir. Meydana gelen buz kütleleri hacim artışına sebep olarak boru kesiti daha fazla yüke maruz kalır. Rijit borular üzerinde yapılan ölçümlerde don etkisinin boru üzerine gelen yükü yaklaşık olarak iki kat artırabildiği bilinmektedir. Diğer taraftan esnek borularda kayda değer bir artış oluşmadığı bilinmektedir. Don etkisinin olumsuz yönlerinin tolerasyonu için boruların don derinliğinin 1 m kadar altına yerleştirilmesi önerilmektedir (Moser, 1990).

2.3 Esnek Boruların Göçme Türleri

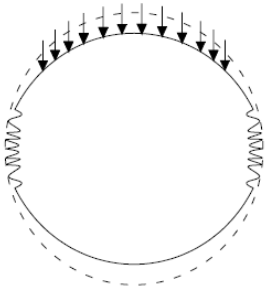
Gömülü boruların, tasarlanma aşamasında hedeflenen ve hizmet kapsamında belirlenen kriter ve görevleri yerine getiremez duruma gelmesi durumunda uğradıkları toplam deformasyonların bütünü "göçme" olarak tanımlanmaktadır. Gömülü borular

farklı biçimlerde göçme davranışı gösterebilmektedirler. Borular gözlemlenen göçme mekanizmaları ve performans limitleri, yük altında deforme olmuş borudaki açısal gerilmeler, şekil değiştirmeler, burulma ve burkulmalara bağlı olarak nitelendirilebilmektedir. Göçme türleri aşağıda detaylandırılarak tanımlanmıştır.

2.3.1 Boru duvarının ezilmesi

Boru yan duvarlarının ezilmesi şeklinde gözlemlenen göçme tipine genellikle yüksek çembersel rijitliğe sahip borularda rastlanılmaktadır. Yerleştirme derinliğinin ve geridolgu sıkılığının artması ile yüksek ve tekrarlı gerilmeler altında bu şekilde bir göçme mekanizması meydana gelme ihtimalini artırmaktadır. Ezilme şeklindeki deformasyonlar boru tacına etkiyen düşey yüklerin boru duvarları ve yan dolgu malzemesi tarafından karşılanamaması halinde oluşmaktadır (Moser, 2001).

Gömülü borularda duvarın ezilmesi ve göçmenin oluşması, esnek borular için lokal akma, rijit borular için ise çatlamaların meydana gelmesi olarak tanımlamaktadır. Boru mukavemeti doğrultusunda sınır performans değeri bu akma veya çatlama limitine ulaşma durumudur. Bu durum Şekil 2.5'teki gibi gösterilebilmektedir.



Şekil 2.5. Esnek boruların ezilme biçimi.

Düşey doğrultudaki zemin basıncı nedeniyle boru duvarlarında meydana gelen gerilmeler Eşitlik 2.8'deki, boru duvarlarındaki eğilme gerilmesi ise Eşitlik 2.9'daki gibidir.

$$\sigma = \frac{P_v.D}{2.A} \tag{2.8}$$

Burada;

P_V: Düşey doğrultudaki zemin basıncı,

D: Boru çapı,

A: Boru kesit alanı,

Burada;

$$\sigma_{eğ} = \frac{M_t/2}{I} \quad (2.9)$$

M: Eğilme momenti (birim uzunluk için),

I: Boru duvarı kesitinin eylemsizlik momenti (birim uzunluk için),

t: Boru et kalınlığı olarak belirtilmiştir (Akınay, 2010).

2.3.2 Boru duvarının burkulması

Elastisite modülü düşük esnek borularda genellikle yüksek iç basıncın da var olduğu durumlarda burkulma türü göçme mekanizmaları meydana gelmektedir. Kritik burkulma basıncının saptanmasında burkulma türü göçmelerin meydana gelmemesi için en küçük boru rijitliği ve kritik burkulma basıncı eşitlikleri geliştirilmiştir (Kienow ve Prevost, 1989). Bu bağlamda hesaplamalarda Eşitlik 2.10'da verilen kritik burkulma yükü formülasyonu kullanılmaktadır.

$$P_{cr} = \frac{E.t^3}{4(1-\upsilon^2)D^3} \quad (2.10)$$

Burada;

P_{cr}: Kritik burkulma yükü;

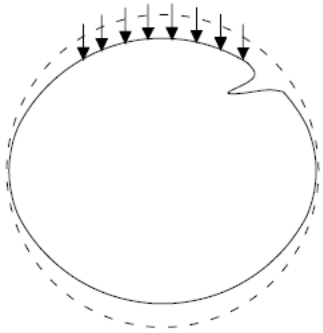
E: Borunun elastisite modülü;

D: Borunun dış çapı;

υ: Borunun Poisson oranı;

t: Boru et kalınlığı olarak belirtilmiştir.

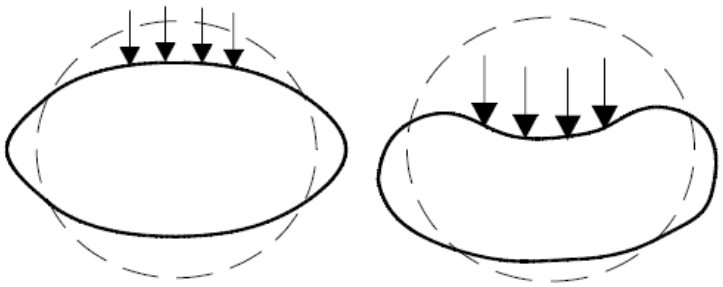
Esnek borular için burkulma gösterimi, Şekil 2.6'da gibi olmaktadır.



Şekil 2.6. Esnek boruların burkulma biçimi.

2.3.3 Kesitte gözlemlenen aşırı şekil değiştirmeler

Termoplastik ve PVC borular üzerinde, yük altında kırılma ve çatlama meydana gelmeden Şekil 2.7'deki gösterime benzer şekilde, büyük çapta deformasyonlar, çember kesitinde aşırı bükülmeler ve burulmalar gözlemlenebilmektedir (McGrath, 2005). ASTM D3034 (2013) standardında esnek borular için belirlenen maksimum deformasyon yüzdesi %7.5 olarak alınmıştır. Şehir şebekeleri için döşenen dağıtım hatlarında ise izin verilebilir maksimum deformasyon yüzdesi %5 olarak kabul edilmiştir (Suleiman, 2002).



Şekil 2.7. Esnek borularda aşırı deformasyon ve ters eğiklik (Suleiman, 2002).

2.3.4 Normal ve kayma şekil değiştirmeleri

Derin hendek ortamlarına konuşlandırılmış ve rijit borularda deformasyonlar, boru stabilitesini etkilemektedir (Moser, 2001). Bu kapsamda boru şekil değiştirmelerinin saptanmasında Eşitlik 2.11, Eşitlik 2.12 ve Eşitlik 2.13 kullanılmaktadır.

$$\varepsilon_b = 6.\frac{t}{D}.\frac{\Delta y}{D} \tag{2.11}$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_v.D}{2.t.E} \tag{2.12}$$

$$\varepsilon_p = \frac{P_i.D}{2.t.E} \tag{2.13}$$

Burada;

Δy: Boru kesitinin düşey doğrultuda oluşan kısalma,

D: Boru dış çapı,

ε_b: Boru çemberindeki deplasmanlardan kaynaklanan eğilme şekil değiştirmeleri,

ε_c: Dış basınç (düşey yükleme) gerilmelerinden kaynaklanan basınç şekil değiştirmeleri,

ε_p: İç basınç (vakum) gerilmelerinde kaynaklanan basınç şekil değiştirmeleri,

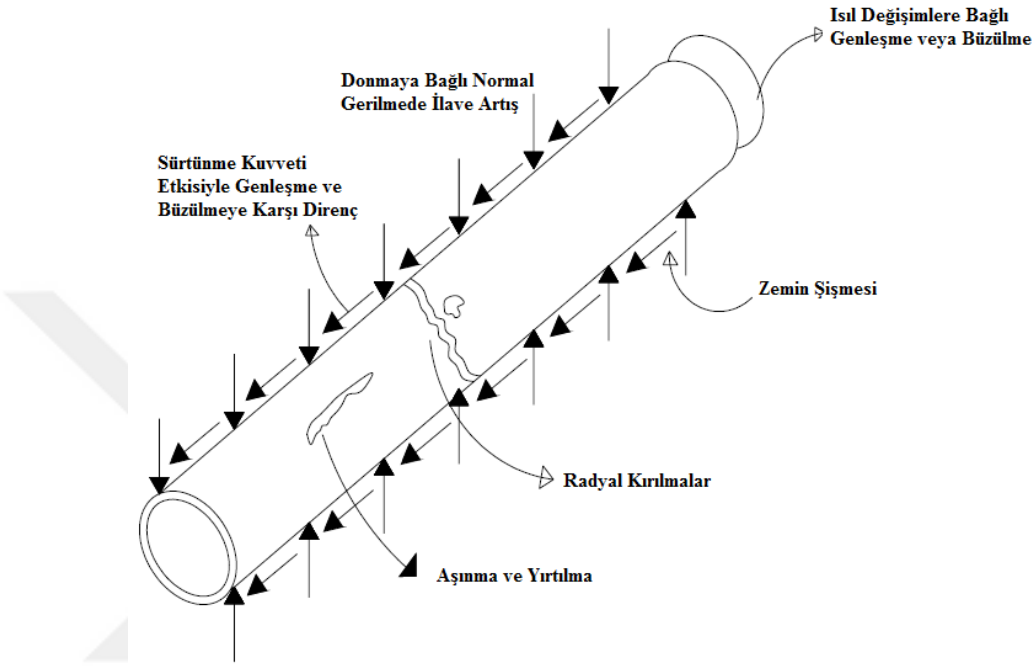
P_v: Düşey basınç,

P_i: İç basınç.

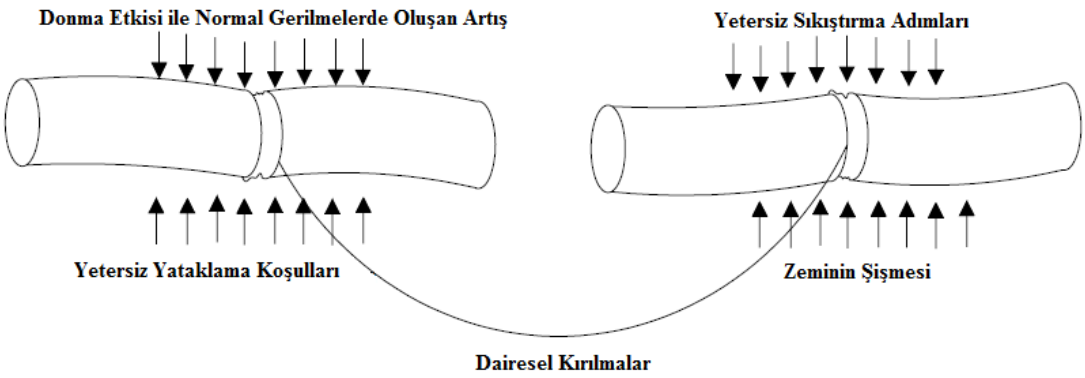
2.3.5 Boru hattı doğrultusundaki gerilmeler

Bu tip göçme mekanizmaları, sıcaklık kaynaklı genleşme ya da büzülme, boyuna doğrultuda eğilme ve iç basınca bağlı Poisson oranı etkisi sebebiyle meydana gelebilmektedir. Örneğin, boruların bağlantı ve birleşim kısımlarında oluşan farklı oturmalar, yataklama tabakasında üniform olmayan oturmalar gözlemlenmesi, yeraltı su seviyesinin değişimi sonucu meydana gelen yer hareketleri, iklim değişikliğine

bağlı kabarma ve çökmeler vb. sebeplerden ötürü boru hattı doğrultusunda oluşan gerilmelerden kaynaklı göçmeler ile karşılaşılabilmektedir. Bu çerçevede, boyuna doğrultudaki deformasyonlar ve sebep olan etmenler Şekil 2.8'de, boyuna doğrultudaki eğilme sonucu meydana gelen deformasyon biçimleri ise Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Boyuna doğrultusundaki kırılma türleri (Rajani ve Kuruoka, 1995).



Şekil 2.9. Boyuna doğrultudaki eğilme sonucu oluşan deformasyon biçimleri (Rajani ve Kuruoka, 1995).

2.3.5.1 Üniform olmayan taban desteği

Temel tabakasının yeterince sıkıştırılmaması veya sıkılığını kaybetmesi, aşırı kazı yapımı sonucu meydana gelen farklı oturmalar, üniform uygulanmayan kompaksiyon işlemleri, sızma veya akıntı sebebiyle boru yatağındaki zeminin erozyonuna bağlı olarak oluşabilmektedir. Esnek boruların deformasyon davranışı bu şekilde meydana gelebilecek basınç yoğunlaşmalarını engelleyebilmektedir. Bu durumda, esnek boru bağlantılarının kullanılması ve borunun standartlara uygun şekilde döşenmesi eksenel eğilmelerin ortadan kaldırılmasını ve boruda oluşması muhtemel zararların oluşma riskini azaltmaktadır (Moser, 1990).

2.3.5.2 Farklı oturmalar

Borunun rijit olarak birleştirildiği veya bağlandığı baca vb. yapılarda ortaya çıkan farklı oturmalar, boru üzerinde yüksek eğilme momentleri ve kayma kuvvetleri meydana getirmektedir. Limitlerin üzerindeki eğilme momentleri ve kayma kuvvetleri yapı ve borunun farklı yönlü hareketleri nedeniyle oluşmakta ve hassas bir şekilde tahkik edilmesi pek mümkün değildir. Bundan dolayı, tasarım ve döşeme esnasında farklı oturmaları engellemek ya da minimize etmek için tedbirler alınmalıdır. Bunun için ise temel tabakası ve yatak malzemesinin lokasyon ve servis şartlarına uygun seçilip kompaksiyon adımlarının nizami uygulanması gerekmektedir (Moser, 1990).

2.3.5.3 Yer hareketleri

Özellikle şişme potansiyeli yüksek killi zeminler ortamda var olan zemin suyundan çok etkilenmektedirler. Bölgedeki iklimsel faaliyetlerin değişimi ile kabarma veya çökme gözlemlenen zeminler boru güzergahı için tercih edilmemelidir. Büyük çapta hasarlara neden olabilecek bu yer hareketlerinin olumsuz etkilerinin azaltılması için rijit borular kısa uzunlukta kullanılmakta olup esnek birleşimler yapılmaktadır. Esnek boruların ise yapısal karakteristikleri gereği yer hareketlere uyum sağlanmasına müsaade edilmelidir. Böylelikle boyuna ve enine doğrultuda bükülebilirliğe bağlı deformasyonların ortaya çıkması önlenmiş veya en aza indirgenmiş olmaktadır.

Diğer bir yandan su sevisinin yükselme ve alçalması haricinde sismik faaliyetler de yer hareketlerine sebep olmaktadır. Sismik faaliyetler, küçük çaplı hasarlardan kalıcı

yer deformasyonlarına kadar problemlere yol açabilmektedir. Kritik kesitlerde deprem vb. sarsıntılar nedeniyle meydana gelen yer hareketleri borular üzerinde deformasyonlara sebep olabilmektedir. Kritik lokasyonlar genellikle yüksek miktardaki farklı oturmaların izlendiği fay zonları, zemin kayma düzlemleri veya boru-yapı birleşim noktaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, sismik faaliyetler neticesinde boşluk suyu basıncının ani olarak yükselmesi sebebiyle meydana gelen taşıma gücü kayıplarında sıvılaşma gerçekleştiği durumlarda da sıkıntılar yaşanabilmektedir. Depremler borularda sızmaya veya kırılmalara neden olabilmekte iken esnek borularda gerilmelerin sönümlenmesi sağlanarak hasar oluşumu engellenebilmektedir. Esnek borular, esnek bağlantı ve birleşimler ile borularda yer hareketleri sebebiyle meydana gelebilecek zararların önlemesi sağlanabilmektedir (Moser, 1990; O'Rouke vd., 1995; Hwang vd., 1998; Ayalp, 2006).

2.3.6 İlave kesme kuvveti yükleri

İlave kesme kuvvetleri hesaplama adımları ve tasarım aşamasında öngörülmeyen sebepler ve etmenlerden dolayı meydana gelmektedir. Oturma farklılıklarının oluşması sebebiyle meydana gelen yatak seviyesi kaybı, yataklama tabakasındaki sızmaya bağlı yer hareketleri vb. gibi standartlarda belirtilen yataklama koşullarını ihlal eden her türlü etmen ilave kesme kuvvetlerini doğurabilmektedir (Moser ve Folkman, 2008).

Kesme kuvvetinin kritik değerlerin üzerine çıkması durumunda boru limitlerinin haricinde deformasyonlara bağlı göçme meydana gelebilmektedir. Bu bakımdan projelendirme aşamasında boru hattının ilave kesme yüklerine maruz kalmayacak şekilde tasarlanması ve güzergah tayininin yapılması gerekmektedir.

2.3.7 Yorulma çatlakları

Trafik yükü ve benzer tekrarlı ve dinamik yüklemelere maruz kalan borularda yorulma türü göçme mekanizmaları oluşabilmektedir. Yorulma neticesinde boru hatları üzerinde hesaplanan tasarım yüklerinden daha düşük yüklerde dahi göçmeler gözlemlenebilmektedir (Moser ve Folkman, 2008). Bunun yanında, boru içerisinde

oluşan basınç değişimlerine bağlı gerçekleşen periyodik yüklemeler de yorulmaya neden olabilmektedir.

2.4 Boru Yerleştirme Yöntemleri

Gömülü boruların yerleştirme biçimleri ele alınırken döşeme şekillerine göre üç farklı sistem bulunmaktadır. Bu yöntemler, dolgu ortamlarına yerleştirilmiş, hendek ortamlarına yerleştirilmiş borular ve kazısız yöntemler olarak sıralanmaktadır.

2.4.1 Dolgu ortamlarına yerleştirilmiş borular

Doğal bir zemin yüzeyi dikkate alındığında dar ve sığ olarak nitelendirilen hendek ortamlarına yerleştirilmiş borular için belirtilen bir yöntemdir. Büyük oranda, karayolları ve demiryolları hatları altına döşenen menfezler ve borular için tercih edilmektedir. Yerleştirme sonrasında üzeri geridolgu ile örtülmüş olup pozitif projeksiyonlu ve negatif projeksiyonlu olmak üzere iki farklı türü bulunmaktadır.

Pozitif projeksiyonlu borular:

Borunun yüzeysel bir biçimde yataklama tabakası üzerine yerleştirilip dolgu ile kaplanması durumudur.

Negatif projeksiyonlu borular:

Sığ bir hendek ortamı içerisinde boru taç bölgesinin zemin yüzeyinden düşük seviyelerde kaldığı durumlarda yerleştirilip dolgu ile örtülmesi durumudur.

Dolgu tipi yerleştirmede bu iki projeksiyon durumunun davranış biçiminden farkları dolgu ve boru üzerinde deformasyonların neden olduğu sürtünme etkilerinin yönü ile ilişkili olarak boruya etkiyen yükün zemin yükünden daha fazla veya daha az değerlerde olmasıdır (Spangler, 1966; Moser, 1990; Anon, 2005).

Eksik hendek metodu:

Özel bir yerleştirme yöntemi olarak bilinen eksik hendek metodu negatif projeksiyona benzemektedir. Boru öncelikle pozitif projeksiyon durumdaki gibi konuşlandırılıp taç

bölgesinin üst kısmı boru genişliğinin 1 ile 1,5 katı arasındaki yüksekliğe kadar doldurulur. Dolgu düzgün ve kontrollü bir şekilde sıkıştırıldıktan sonra oluşturulan bu katman içerisinde boru taç bölgesine kadar hendek kazılır. Daha sonra bu hendek üniform bir yerleştirme biçiminde gevşek dolgu malzemesi ile doldurulur ve silsile halinde standart dolgu işlemleri devam eder.

2.4.2 Hendek ortamlarına yerleştirilmiş borular

Bu tür borular, doğal diğer bir deyişle örselenmemiş bir zeminin kazılarak kendini tutabilir konuma getirildiği ortamlara gömülmektedir ve üzeri geridolgu ile kapatılmaktadır. Genellikle, kanalizasyon, içme ve kullanma suyu, drenaj ve gaz hatlarında tercih edilmektedirler. Bu yöntem aynı zamanda, kırmızı kota yakın döşenmesi planlanan ve küçük çaplı borular için en çok kullanılan metot olarak bilinmektedir. Bu şekilde konuşlandırılmış boru türleri için geridolgunun oluşturduğu yükler, hendek duvarı ile sürtünme etkisinden dolayı toplam zemin yükünden daha az olarak karşımıza çıkmaktadır (Spangler, 1966; Bildik, 2013).

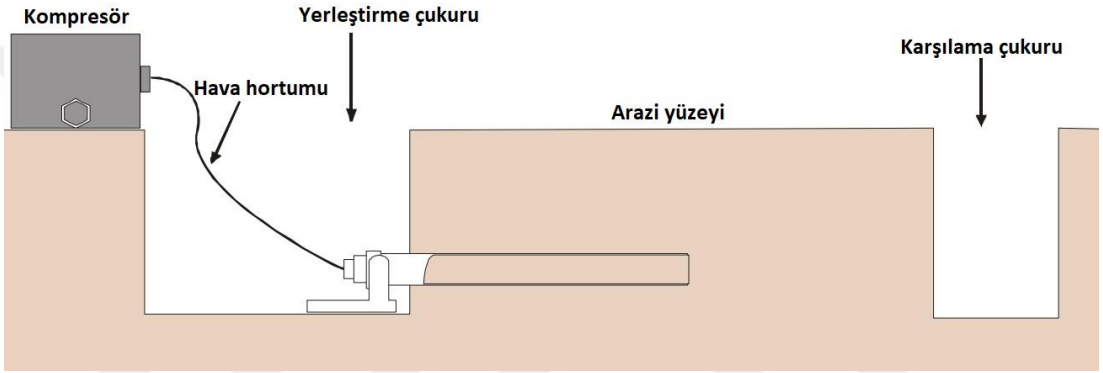
2.4.3 Kazısız metotlar

Hendek kesitinin kazılması boruların yerleştirilmesi esnasında meydana gelebilecek örselenme ve çevre gerilmelerinin boşalması sebebi ile doğal zemine ve varsa yapı temellerine menfi etkiler yapabilir. Derin kazılar yapılırken hendeğin geçici olarak içten desteklenmesi, tabanın kabarmalara karşı korunması, yer altı su seviyesinin düşürülmesi ve geridolgu malzemesinin serilme aşamaları sırasında beklenmedik oturmaların meydana gelebilmesi olasıdır. Bunun yanında kanalizasyon hatları gibi genellikle yol boyunca derin mesafelere yerleştirilen hatlarda hendek açılması, trafiğin kapatılması ve dolayısıyla ticaret ve yaşamın olumsuz bir biçimde etkilenmesine de yol açmaktadır. Servis ömrü tamamlanmış veya onarım ihtiyacı gereken hatlarda da hendeklerin açılması özellikle şehir hayatının olduğu kesimlerde söz konusu işlemleri zora sokmaktadır (Stein, 2003; Jeyapalan ve Balasubramaniam, 1995; Thomson, 1993). Bu kapsamda belirtilen etmenlerin çevreyi ve toplumu rahatsız etmemesi için kazısız metotlar tercih edilmektedir.

Kazısız boru yerleştirme biçimleri, çalışma sahasına girilebilmesi ve hat doğrultusunun kontrol edilebilmesine göre sınıflandırılmaktadır. Kazısız metotlardan bazıları şu şekildedir:

Boru çakma (sürme) yöntemi):

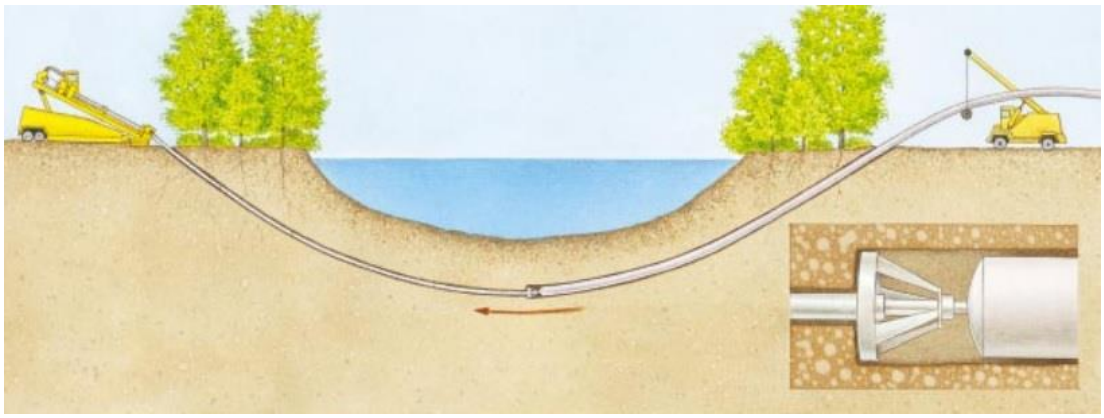
Makinelerin tercihen az kullanıldığı, düşük maliyetli ve pratik bir metottur. Ancak, yapım aşamalarında hat doğrultusunun kontrolü zordur. Boru çakma esnasında karşılaşılan sert kayalar yöntemi zor kılan etmenlerin başında gelmektedir. Temel hatları ile boru sürme metodu Şekil 2.10'da gösterildiği gibi literatürde yer almaktadır.



Şekil 2.10. Boru çakma (sürme) yöntemi (Simisevic ve Sterling, 2001).

Doğrusal delgi yöntemi:

Bu yöntemde, Şekil 2.11'de gösterdiği üzere öncelikle referans tüneli açılmaktadır. Referans tünelinin sonuna gelindiğinde boru yerleştirilir ve elektromanyetik izleme sistemleri yardımı ile hattın doğrultu kontrolü yapılabilir. Tünelin açılması esnasında karşılaşılan kaya ve taşlar yine bu metotta da işlem adımlarını zorlaştırmakta ve hattın oluşturulmasında engel teşkil edebilmektedir.

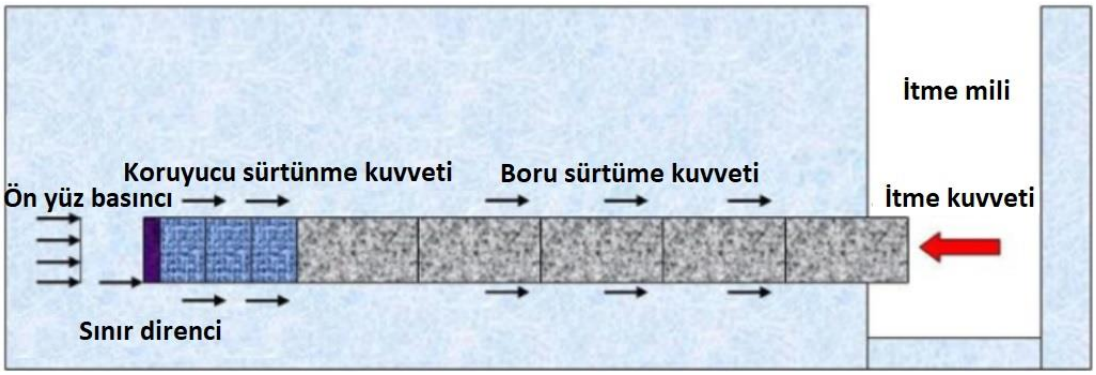


Şekil 2.11. Doğrusal delgi yöntemi (Cooper, 1994).

Boru yereşleştirme yöntemleri arasında yer alan uygulamalardan bazıları da Şekil 2.12'de gösterilen boru itme ve Şekil 2.13'te gösterilen mikrotünel metotlarıdır.

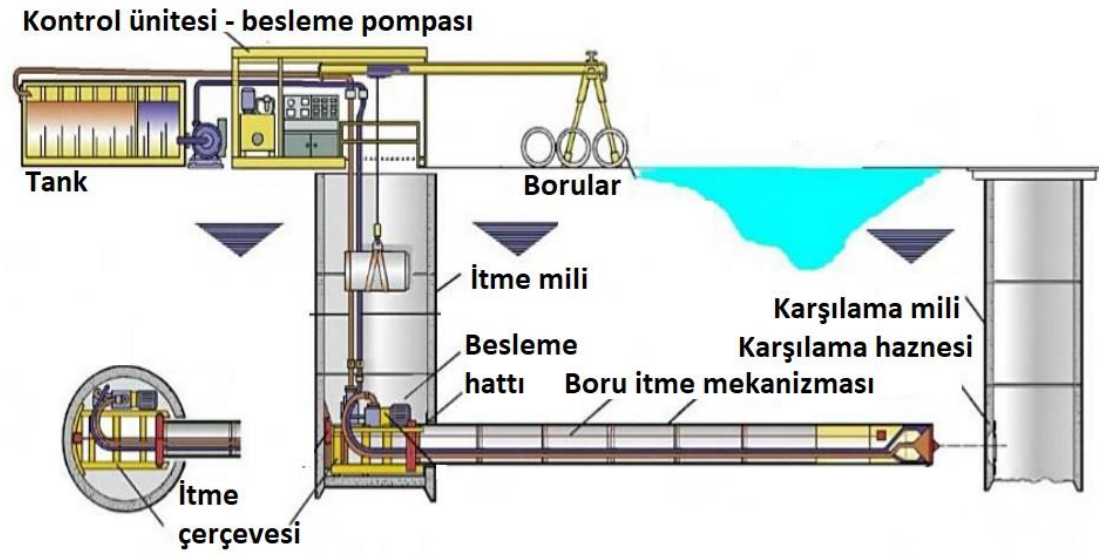
Boru itme ve mikrotünel yöntemleri:

Boru itme, tünel açma uygulamaları ile beraber aynı zamanda borunun itilerek tünel içerisine yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Hat üzerinde çalışan ekibin kazıyı kontrol edebilmesine müsaade edilebilecek boru çapı seçilerek işlemler yürütülmektedir.



Şekil 2.12. Boru itme (Ji vd., 2019).

Mikrotünel yöntemi ise hat üzerinde döşeme ekibinin çalışamayacağı genişlikteki tünellerde uygulanmaktadır. Bu uygulamada, tünel açma, kazının tahliyesi ve kalkanın kontrolü esnasında tüm işlemler dışarıdan kumanda edilebilmektedir.



Şekil 2.13. Mikrotünel uygulaması (Kurbanshoeva, 2019).

Boru itme ve mikrotünel yöntemlerinin en önemli üstünlükleri sert kayalar, siltli ve kumlu zeminler gibi pek çok zemin türünde uygulanabilir olmasıdır. Aynı zamanda, yeraltı su seviyesi veya boru döşeme derinliğinin yüksek olduğu koşularda da uygulanması mümkündür. Diğer bir yandan, aşırı konsolide olmuş ve şişme potansiyeli yüksek killerde yüksek sürtünme kuvvetleri borunun itilmesinde zorluklar meydana getirebilmektedir. Mikrotünel metodunda ise zemin karakteristiklerinin değişken olduğu profillerde uygulanması güçtür.

Boru itme ve mikrotünel yöntemleri, yer hareketleri ile bu hareketlere bağlı oluşabilecek hasarların önemli ölçüde engellenmesini sağlamaktadır (Thomson, 1993; Jeyapalan ve Balasubramaniam (1995).

Boru patlatma yöntemi:

Servis ömrünü tamamlamış veya yenilenip onarımı mümkün olmayan boru hatlarında kullanılmaktadır. Bu şekilde eski hat kırılıp kaldırılarak onun yerine yeni hat döşenmektedir (Demiralp, 2017).

2.5 Güzergah Seçimi

Güzergah seçiminde, öncelikle boru hattı ve hattı ilgilendiren ilgili yapıların bulunduğu bölgenin zemin profilini ayrıntılı bir biçimde gösteren topoğrafik haritanın

hazırlanması gerekmektedir (Vaslestad, 1991). Güzergahın topoğrafyası ve jeolojik özelliği sadece hattın servis kalitesi ve emniyeti için değil aynı zamanda performans ve maliyeti ile de ilişkilidir. Engebeli araziler, zorlu sanat yapıları, elverişsiz jeolojik ve iklim koşulları, alanın özel mülkiyet olması gibi etmenler kazı, dolgu ve inşaat işlerini zora sokmaktadır. Bu ve bu gibi sebeplerden dolayı boru hattı güzergahının kesinleştirilip belirlenmesindeki başlıca hususlar aşağıdaki gibi maddelendirilmiştir:

- Arazilerin olabildiğince az engebeli bölgeleri tercih edilmelidir,
- Sanat yapıları en aza indirgenmelidir,
- Boru hattı uzunluğunun ihtiyaçları karşılayacak ölçüde minimum tutulması gerekmektedir,
- Jeolojik açıdan uygulamaların yürütülmesine engel teşkil edebilecek arazilerden ve özel mülkiyet içeren sahalardan kaçınılmalıdır,
- Güzergahın bitki örtüsünün yoğun bulunduğu kısımlardan geçmemesine özen gösterilmelidir,
- İnşaat ve sonrasında işletme, bakım ve onarım aşamaları için gerekli tüm durumların düşünülerek imkanlar dikkate alınmalıdır,
- Alternatif güzergahlar değerlendirilerek maliyet analizleri yapılmalı ve servis ömrü ile kapasitesi göz önünde bulundurularak emniyetli bir kesin hat belirlenmelidir (Anon, 1976; Balkaya, 2002).

2.6 Boru Hattının İnşaat Aşamaları

Gömülü boruların araziye yerleştirme safhaları maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- İnşaat öncesinde planlama ve tasarım,
- Arazinin hazırlanması,
- Malzemelerin temini ve hat bölgesine ulaştırılması,
- Kazı ve hafriyat işleri,
- Temel ve yatak tabakasının hazırlanması,
- Boruların konuşlandırılması,
- Geri dolgunun serilip sıkıştırılması,

- Boru hattının test edilmesi.

Hattın kesin projesi tamamlandıktan sonra güzergah aplikasyonu yapılmakta ve hendekler hazırlanmaktadır. Hendek kenarlarına dizilen borular, standartlara ve projeye uygun biçimde hazırlandıktan sonra bağlantı ve birleşim adımları gerçekleştirilir. Birleşim, sızdırmazlık ve gerekli tüm kontroller yapıldıktan sonra eksiklikler varsa giderilip dolgu serim ve sıkıştırma işlemlerinden sonra boru hattı tamamlanır (Anon, 1976).

Boru hatlarının zemin profilini izleyecek şekilde olabildiğince üniform eğimde döşenmesi gerekmektedir. Ayrıca, hattın lokasyonu maliyeti ve iç basıncı azaltmaya yönelik olmalıdır. Boru hattı, hidrolik eğim çizgisine yakın oldukça su basıncı azalmaktadır ve hattın hidrolik eğim çizgisinin üzerine çıkması sifon uygulaması gerektirip boru içerisinde negatif basınç oluşturacağından bu durumdan uzak durulmalıdır (Valestad, 1991).

2.7 Yataklama

Boru türü seçimi, tasarımı ve yerleştirilmesinde üç temel esas; hendek, temel, yataklama ve geridolgu özelliklerine dikkat edilmesidir (Howard, 1996; Spangler, 1966).

Yataklama, yüke maruz kalan borunun desteklenmesi amacı ile yapılan bir işlemdir. Boru tabanının ve kenarlarının uygun malzemeler ile doldurulması ile yapılmaktadır. Dış yüklerin karşılanması durumunda boru ve çevredeki dolgu malzemeleri ile birlikte çalışarak toplam yükün taşınmasında rol almaktadırlar. Boru-zemin etkileşiminin efektif ve yük paylaşımı yapabilir bir biçimde çalışması için uygun yataklama yapılmalıdır (Watkins vd., 1966; Moser, 1990; Howard, 1996). Boru, hendek tabanından yeterli ölçüde temel desteği ile aşırı ve farklı oturmalara izin vermeden hizmete sunulmalıdır. Boruların hendek tabanına tek bir noktadan veya bir çizgi boyunca oturacak biçimde yerleştirilmemesine özen gösterilmelidir. Aynı zamanda, borunun hendek tabanına oturduğu kısmın yataklanmış olması ve projesine uygun yataklama açısının düzenlenmesine dikkat edilmelidir (Howard, 1996; TS2170, 1989). Boru yüzeyinin eşit formda desteklenmesi için hendek tabanına döşenecek

malzemenin uygun olması oldukça önemlidir. Üniform destekleme, boruyu hem hat ekseni boyunca destekler hem de yükün boru tabanına düzgün bir biçimde yayılması bakımından fayda sağlamaktadır.

Yataklama yapılırken bütün haldeki iri taşların yatak bölgesinden kaldırılmasına ve hendek içerisinde sert kayaların olmamasına özen gösterilmelidir (TS7397, 1989). Boru yükü hesaplandıktan sonra yerleştirme şekli için yataklama faktörünün tespit edilmesi gerekmektedir. Yataklama faktörü, gömülü borunun destek mukavemeti ile borunun üç mesnetli dayanma deneyindeki mukavemeti arasındaki oranı olarak tanımlanmaktadır (Balkaya, 2002). Yataklama faktörünü etkileyen maddeler ise şu şekildedir:

- Yataklama alanını genişliği,
- Boru ve yataklama malzemesi arasındaki temas kalitesi,
- Boruya etkiyen destekleyici yanal basıncın büyüklüğü,
- Yanal basıncın etkidiği alan vb. şartlar (Selig ve Packard, 1987).

2.8 Sıkıştırma İşlemleri

Boru üzerindeki geridolgu malzemesinin ve yataklama tabakasının standartlara uygun ve ideal sıkılıklarda sıkıştırılması boru-zemin davranışı ve servis kapasitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Sıkıştırma, basınç, darbe, yoğurma ve titreşim etkisiyle uygulanabilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde genellikle basınç, darbe ve yoğurma etkili olurken kohezyonsuz zeminlerde titreşimli metotlar daha uygundur. Sıkıştırma yöntemi, dolgu malzemelerinin türüne göre seçilmekte olup kontrollü bir biçimde sürdürülmelidir (Howard, 1996). Kompaksiyon için ihtiyaç duyulan basınç genellikle düz silindirler ve lastik tekerlekli silindirler ile sağlanırken darbe etkisi mekanik tokmaklarla, yoğurma etkisi keçi ayaklı silindirlerle, titreşim etkisi ise vibrasyonlu düz silindirler, vibrasyonlu keçi ayaklı silindirler veya yüzeysel vibratörler ile sağlanmaktadır. Hendek ortamı içerisinde ise küçük vibratörler ve el tokmakları kullanılmaktadır (Spangler, 1966; Ahlvin ve Smoots, 1988).

Drenaja müsait zemin ortamlarında ise su jeti, püskürtme ve suya doyurma metotları kullanılarak kompaksiyon işlemi yürütülebilmektedir. Su jeti yöntemi, büyük çaplı

boruların çevresindeki dolgunun sıkıştırılmasında kullanılır. Borunun belirlenen seviyesine kadar serilen malzeme içerisine sokulan su jeti vasıtasıyla kompaksiyon gerçekleştirilir. Püskürtme yönteminde de basınçlı su ile eğimli bir bölgeden aşağı doğru boru etrafına su püskürtülmektedir. Suya doyurma yönteminde ise, zemine ilave edilen suyun drenajı sonrası meydana gelen sızma gerilmeleriyle uygulanan sıkıştırılma işlemidir (Howard, 1996; Ahlvin ve Smoots, 1988).

%5'ten az ince dane bulunduran iyi derecelendirilmiş çakıl (GW), kötü derecelendirilmiş çakıl (GP), iyi derecelendirilmiş kum (SW), kötü derecelendirilmiş kum (SP), iyi ve kötü derecelenmiş çakıl karışımı (GW-GP), iyi ve kötü derecelenmiş kum karışımı (SW-SP) gibi iri daneli zemin ortamlarında maksimum yoğunluk suya doyurma ve vibrasyon yöntemleriyle sağlanmaktadır. %12'den fazla ince dane içeren siltli çakıl (GM), killi çakıl (GC), siltli kum (SM), killi kum (SC) zeminler ve siltli kum - çakıl karışımları (GM-SM), yüksek plastisiteli siltler (MH), yüksek plastisiteli killer (CH), düşük plastisiteli siltler (ML), düşük plastisiteli killer (CL), killi kum - düşük plastisiteli killi zemin karışımları (SC-CL), siltli kum - düşük plastisiteli siltli zemin karışımları (SM-ML) ve düşük plastisiteli silt - düşük plastisiteli killi zemin karışımları (ML-CL) gibi ince daneli zeminlerin 100 ile 150 mm kalınlıkta yerleştirilerek elle, mekanik kompaktörlerle ya da mekanik tokmaklarla sıkıştırılması önerilmektedir. %5-12 arası ince daneli zemin içeren ortamlarda ise kohezyonlu ya da kohezyonsuz davranış gözlemlenebilmektedir. Bu durumda, zemin danelerinin derecelenmesi ve ince danelerin plastisite özelliklerinin tespit edilmesi ile bu şekildeki zemin ortamlarının kompaksiyonu için en uygun metot saptanır (Moser, 1990; Howard, 1996, Ayalp, 2006).

2.9 Bağlama ve Birleştirme Teknikleri

Boru hattının oluşturulması sadece döşenme, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri ile sınırlı değildir. Nakliye ve maliyet açısından da önemli bir yere sahip olan bağlama ve birleştirme metotları projeye uygun olarak belirlenmektedir. Polietilen boruların bağlama türleri:

- Contalı,
- Contalı ve manşonlu,

- Ekstrüzyon (köşe) kaynaklı,
- Alın kaynaklı,
- Elektrofüzyon kaynaklı,
- Soket füzyon kaynaklı,
- Kaplin adaptörlü birleştirme olarak bilinmektedir.

Contalı birleşim:

Borunun ek parçalar ile birleştirilmesi contaların yuvalara oturtularak sabitlenmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Contalı ve manşonlu birleşim:

Sızdırma sorunun görülmesi muhtemel bölgelerde contaların yanı sıra birbiri içerisine pinler ve kelepçeler yardımıyla oturan parçalar vasıtasıyla yapılan birleşim türüdür.

Alın kaynaklı birleştirme:

Bu birleştirme işlemi türü projenin özelliğine göre belirli çap ve et kalınlığı aralıklarında yapılabilmektedir. Teknik kısıtlamalardan dolayı bu aralıklar 50-1600 mm çap ve 5-100 m et kalınlığı arasında belirlenmiştir. Alın kaynaklı birleştirme yönteminde genellikle DVS 2207-1 (2005) standardı kullanılmaktadır.

Ekstrüzyon (köşe) kaynaklı birleştirme yöntemi:

Bu yöntem büyük çoğunlukla dirsek ve çatal gibi ek parçaların üretiminde menhol, tank vb. özel tekniklerle yapılan uygulamalarda kullanılmaktadır. Köşe kaynaklı birleştirme metodu yüksek basınçlı boru hatlarında ise kullanılmamaktadır. Düşük basınçlı cazibeli hatlarda tercih edilmektedir.

Elektrofüzyon kaynaklı birleştirme yöntemi:

Elektrofüzyon kaynak, manşonun bulunduğu bölgede ısıtıcı rezistanslar vasıtasıyla yapılmaktadır. Borular, manşon içerisine yerleştirilmektedir ve daha sonra kaynak makinesinin uçları ile manşonun rezistans uçları bağlanarak akım yardımıyla ısıtılmaktadır. Rezistansların ısınma işleminin bitmesinin ardından manşon et

kalınlığının boru et kalınlığından fazla olması sebebiyle boru cidar ısısı manşon cidarı ısısından fazla olmaktadır. Böylelikle, boru üzerindeki ve boru içerisindeki basınç farklılıkları kaynak işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu birleştirme yönteminde de genellikle DVS 2207-1 (2005) standardı kullanılmaktadır.

Soket füzyon kaynaklı birleşim:

Alüminyum kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen bu yöntemde, boru dış yüzeyi ve aynı hammaddeden üretilmiş ek parça eş zamanlı olarak ısıtılmaktadır. Yüzeylerin erimesinin ardından ısıtıcı kalıplar sökülerek boru ve ek parça birbiri içerisine yerleştirilmektedir. Bu metot ile büyük oranda küçük çaplı borular ve ek parçaları birleştirildiği için genellikle tesisat borularında tercih edilmektedir.

Kaplin adaptörlü birleştirme yöntemi:

Boru uçlarının konikleştirilerek iki elemanın birbirlerine geçirilmesi ile yapılmaktadır. Somunların sıkıştırılması ile bütünlük sağlanarak birleşim tamamlanmaktadır. 20 atm basınca dayanıklı bu borular, çapı maksimum 110 mm olan borular için tercih edilmektedir (URL-1; URL-2).

3. TASARIM VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

3.1 Marston Yük Teorisi

Marston Yük Teorisi, gömülü borular hakkında yürütülen ilk çalışmaların sonucunda ortaya konan ve literatüre geçen ilk bilimsel çalışmadır. Gömülü boruların yük-deformasyon ilişkileri 1913 yılında Iowa State Üniversitesi'nde Anson Marston tarafından kapsamlı bir biçimde Terzaghi göçme hipotezleri kullanılarak araştırılmıştır. Marston, yaptığı çalışmalarda hendek ortamlarına konuşlandırılmış ve düşey yönlü yüklemelere maruz kalan çember kesitli rijit boruların dayanım limitlerini tespit etmiştir (Marston ve Anderson, 1913). Ayrıca, Terzaghi göçme hipotezlerinden faydalanılarak geliştirilip ileri sürülen bu yük teorisinde, geridolgu ile doğal zemin yüzeyleri arasındaki oturma değerlerinde farklılıklar gözlemlendiği ve arayüzeylerde meydana gelen oturma farklılıklarının boru taç bölgesindeki yükleri tespit etmede en önemli veri olduğu vurgulanmıştır. Bu teorem, hendek ortamı içerisine yerleştirilmiş gömülü boruya gelen yüklerin zemin prizması tarafından aktarıldığı öne sürülerek geliştirilmiştir ve yapılan hesaplamalarda zemin birim hacim ağırlığı ile sürtünme karakteristikleri sabit olarak kabul edilmiştir (Spangler, 1966).

Hesaplamaların ve formülasyonların oluşturduğu yaklaşımın ispatı için ise hendek kesiti üzerinden ince bir dilim tabakası (dh) alınarak söz konusu bu ince tabakanın üst, alt ve yan kısımlarında meydana gelen kuvvetlerin limit denge prensibi doğrultusunda eşitlenmesi üzerine metot oluşturulmuştur. Bu bağlamda, hendek kesiti Şekil 3.1'de gösterilmiştir. [Bd(V+dV)+2Fs] ifadesi düşey yükleri temsil ederken Bd.V hendek yan duvarlarındaki sürtünme kuvvetleri toplamını ifade etmektedir.

Burada;

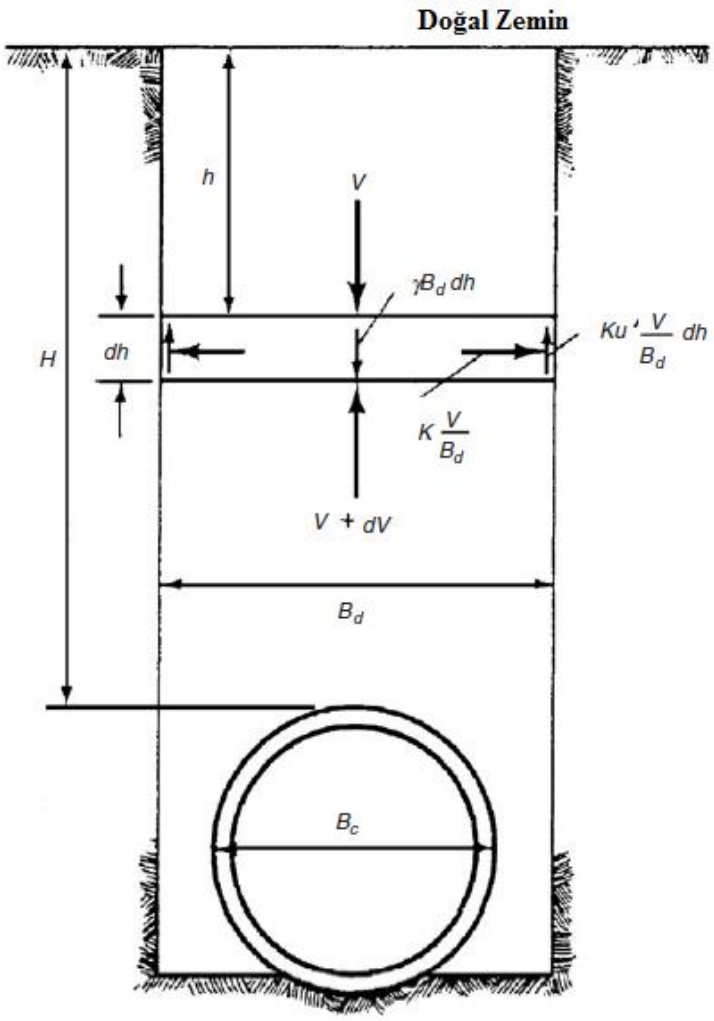
Bc: Gömülü boru çapı,

Bd: Hendek genişliği,

V: dh kalınlıklı tabakanın üstündeki düşey yönlü basınç

V+dV: dh kalınlıklı tabakanın altındaki düşey yönlü basınç

γ.Bd.dh: dh kalınlıklı tabakanın ağırlığı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.1. Marston hendek kesiti (Moser, 2001).

$\Sigma F_v=0$ eşitliğinden ve denge denklemlerinden yola çıkılarak düşey kuvvetlerin dengesi göz önünde bulundurulduğunda tespit edilen yüklerin ne kadarlık bir bölümünün boruya etkidiği borunun ve zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır. Örneğin, boru rijit ise ve kenar dolgu sıkışabilir durumda iken yükün tamamı boruya etkimektedir. Esnek borularda, boru geridolgu ortamına göre daha esnek ve sıkışabilir olduğu için arayüzeylerde ortaya çıkan kayma kuvvetlerinin yukarı yönlü olmasından dolayı yükün daha az bir miktarı boruya etkimektedir. Hesaplamalar dahilinde zemin türlerine göre alınan birim hacim ağırlık, Rankine ve sürtünme katsayıları Çizelge 3.1'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Bazı zemin türleri için ɣ, K ve μ' değerleri (Moser, 2008).

Zemin Türü	B.H.A. (ɣ) (kN/m^3)	Rankine Kats. (K)	Sürtünme Kats. (μ')
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 Spangler Yük Teorisi ve Iowa Eşitliği

Marston yük teorisi bütünüyle rijit bir davranış gösteren boruların göçme sınırlarını saptamak için geliştirilmiştir. Diğer bir yandan Marston yük teorisi ile deformasyon değerlerinin belirlenememesi, bu yöntemi esnek borularının davranışlarını ve dayanımlarını yansıtamaması sebebiyle yetersiz kılmaktadır. Bunun üzerine, Merlin Grant Spangler 1941 yılında hendek ortamına konuşlandırılan esnek boruların davranışlarını, borunun yanal deformasyon oranını ve borunun rijitlik özelliklerini saptayan formulasyonu Iowa eşitliğindeki aşağıda verilen maddeleri kabul ederek öne sürmüştür:

• Düşey yükler Marston yük teorisi baz alınarak hesaplanmakta ve boru duvarının kesitinde eşdeğer olarak yayıldığı kabul edilmektedir.

• Borunun taban bölgesindeki tepki, borunun üzerindeki yük değerine eşit olmak ile birlikte yataklama düzlemi, boru tabanında meydana gelen düşey yük ile eşdeğerdir.

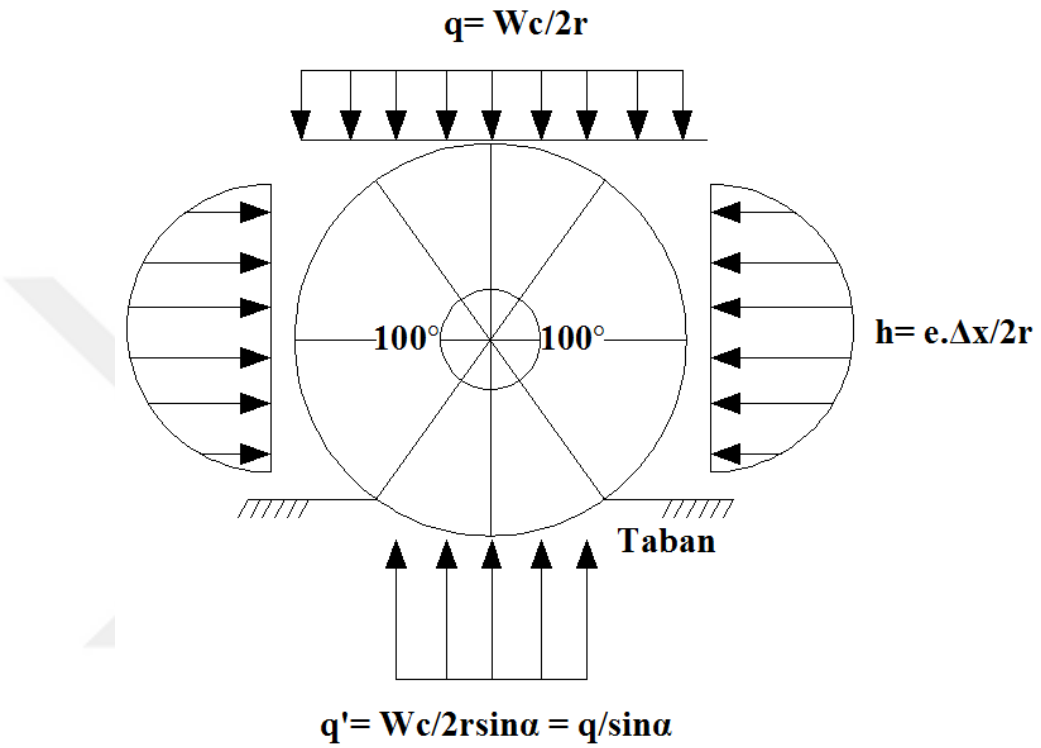
• Zemin tarafından boruya uygulanan pasif itki dağılımı, 100°'lik bir açı ile oluşmaktadır.

• Geridolgu malzemesinin yerleştirme şartları ve metotları dikkate alınmamıştır.

• Küçük yer değiştirmeler için düşey ve yanal yer değiştirmeler eşit olarak alınmıştır.

• Borunun eksenel rijitliği göz önünde bulundurulmamıştır (Terzi, 2007).

Boruya etkiyen gerilme dağılımı ise Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2. Spangler gerilme dağılışı (Terzi, 2007).

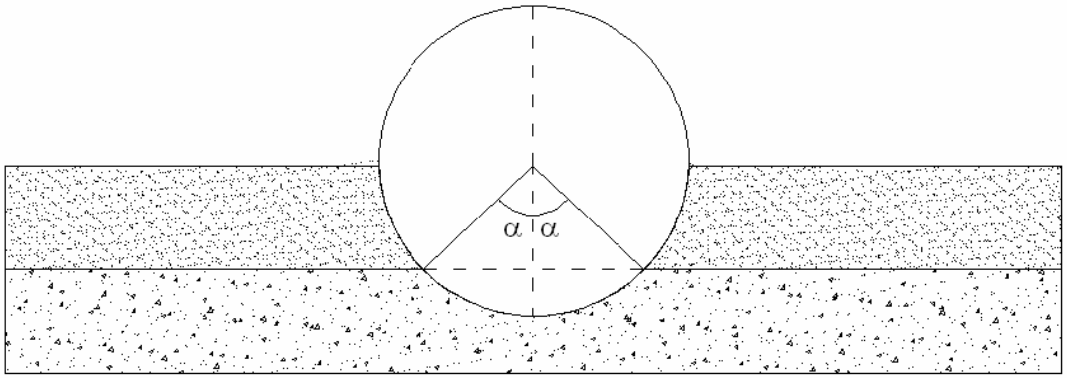
Burada;

Wc=Marston yükü (Pc=ɣ.h.2r),

e: Geridolgu malzemesinin boru duvarına uyguladığı pasif itki,

Δx= Boru yatay deformasyonu.

Gömülü boruların yataklama gösterimi Şekil 3.3'te, yataklama açısına bağlı olarak değerlendirilen yataklama katsayısı değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Gömülü borunun yataklanması (Moser, 2001).

Çizelge 3.2. Yataklama açısına göre yataklama katsayısı değerleri (Moser, 2001).

Yataklama açısı (°)	Yataklama 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 ve Watkins Hesaplama Yöntemi

Spangler'in öne sürmüş olduğu eşitlikte yer alan terimler arasında bulunan W_c düşey yük, EI boru rijitliği ve er^4 zemin pasif itki değerlerine bağlıdır. Bu veriler dahilinde boru duvarlarına etkiyen pasif itki değeri saptanamadığından dolayı ve boru hattınca zemin profili sürekli olarak değiştiği için birtakım deneylerin yürütülmesine kanaat getirilmiştir.

Bunun üzerine Reynold Watkins 1958 yılında pasif zemin direnci "er^4" değerini saptamak için laboratuvar ortamında seri deneyler yürütmüştür. Araştırmaların neticesinde geridolgu malzemesinin boru duvarına uygulamış olduğu pasif etkiye karşılık gelen ve Reaksiyon Modülü "E'" adı verilen değişken formüle entegre edilmiştir (Eşitlik 3.1).

$$E' = e.r \tag{3.1}$$

Watkins, zemin reaksiyon katsayısının haricinde yükleme süresinin geridolgu malzemesinin davranışını etkilediğini de ortaya koymuştur. Ayrıca, esnek boruların zamana bağlı sünme davranışları ve zemin türüne bağlı yükleme süresini uzatan konsolidasyon vb. olayların göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir. Bu maksatla, gecikme faktörü ($D_{L)}$ değeri hesaplamaya dahil edilmiştir. Bu değerlere istinaden boru çemberinin yanal şekil değiştirmesi (m):

$$\Delta x = \frac{D_L * K * W_c * r^3}{EI + 0{,}061 * E' * r^3} \tag{3.2}$$

olarak verilmiştir.

Eşitlik 3.2'de verilen geliştirilmiş Iowa eşitliği, gömülü boruların dayanımını ve şekil değiştirme değerlerini saptamada oldukça önemli bir yöntemdir. Bu eşitliğin beraberinde getirmiş olduğu üstünlükler ve sakıncalar aşağıdaki gibidir:

Sektörde boru hatları tasarımında kullanılmak üzere Watkins'in önermiş olduğu E' değerleri için Howard 1977 yılında Howard zemin reaksiyon çizelgesini sunmuştur. Zemin cinsi sıkılığı baz alınarak hazırlanan Howard zemin reaksiyon tablosu Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Howard zemin reaksiyon çizelgesi (Howard, 1977).

Zemin Türü	Zemin Sıkılığı (%) - Proktor Sıkışma Yüzdesi			
	Gevşek	**<%85**	**%85-%95**	**>95**
İnce daneli zeminler (LL>50) Orta ve yüksek plastisiteli CH, MH	Kullanılması önerilmemektedir. (E'=0) (kPa)			
İnce Daneli Zeminler (LL< 50) Orta veya çok düşük plastisite CL, ML ve %25'den az kaba daneli malzeme	350	1400	2800	7000
İnce Daneli Zeminler (LL< 50) Orta veya çok düşük plastisite CL, ML, Kaba Daneli Malzeme GM,GC,SM, SC ve %12'den fazla ince dane içeriği	700	2800	7000	14000
Kaba daneli malzeme (İnce Daneli oranı çok az veya yok) GW,GP,SW,SP	1400	7000	14000	21000
Kırmataş	7000	21000	21000	21000

Watkins'in 1958 yılında ele aldığı Geliştirilmiş Iowa Eşitliği'nin olumlu yönleri ve sakıncalı tarafları Masada'nın 1996 ve 2000 yıllarında yaptığı çalışmalarda ele almıştır ve söz konusu durumlar aşağıda verilmiştir.

Üstünlükler:

- Yük etkisindeki şekil değiştirmeleri saptamak için kullanılan en yaygın metottur.
- Uygulanması basit ve hızlıdır.
- Yataklama şartları ve yük uygulama zamanı faktörü hesaba katılmaktadır.
- Boru rijitliği ve zeminde meydana gelen değişimler dikkate alınmaktadır.
- Zemin – boru ilişkisinin non-linear davranışı modellenebilir.
- Aynı zamanda kıvrımlı borular için de kullanılabilmektedir.

Sakıncalar:

- Sadece yatay yöndeki değişimler hesaplanabilmektedir.
- Eşitlikte mevcut bulunan değişken değerlerin belirlenmesi zordur.

- Küçük şekil değiştirmelerde çember kesitinin elips şeklinde olduğu varsayılır.
- Düşey ve yatay yer değiştirmeler birbirine eşit kabul edilmektedir.
- Zemin reaksiyon değeri eşdeğer olmayan zemin koşullarında gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır.
- Yüzeye yakın konuşlandırılan borularda hassas sonuçlar vermemektedir.

3.4 Masada Derivasyonu

Masada 1998 yılında Watkins Geliştirilmiş Iowa eşitliği üzerinde bir değişiklik yapmadan sadece denklem üzerinde yaklaşımlar yaparak değerlendirmiştir. Sonuç olarak düşey yer değiştirme için Eşitlik 3.3'teki bağıntıları öne sürmüştür.

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{P}{M_s}\left[\frac{K*M_s}{(\frac{EI}{r^3})}\right]\left[\frac{0{,}0595*M_s}{(\frac{EI}{r^3})+0{,}061*M_s} - 1\right] \tag{3.3}$$

Burada;

$\Delta y =$ Düşey yer değiştirme (m),

$r =$ Boru yarıçapı (m),

$P =$ Düşey yük (kPa),

$K =$ Yataklama katsayısı,

$M_s =$ Geridolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü (kPa),

$\frac{EI}{r^3} =$ Boru rijitliği,

Masada 2000 yılında ise sayısal yaklaşımlarda bulunarak düşey ve yatay eksende ortaya çıkan boru esneme değerleri arasında Eşitlik 3.4'teki bağıntıyı elde etmiştir.

$$\left[\frac{\Delta x}{\Delta y}\right] \sim 1 + \frac{0{,}0094*E\prime}{EI/r^3} \tag{3.4}$$

Burada;

$E' =$ Zemin reaksiyon modülü,

$\Delta y =$ Düşey yer değiştirme (m),

$\Delta x =$ Yatay yer değiştirme (m),

$\frac{EI}{r^3} =$ Boru rijitliği.

Eşitlik 3.5'te belirtilen düşey deformasyon değeri Δy için Masada Derivasyonu'nda:

$$\Delta y = \frac{0{,}119.h.r^4}{E.I} + \frac{J.Wc.r^3}{E.I} \quad (3.5)$$

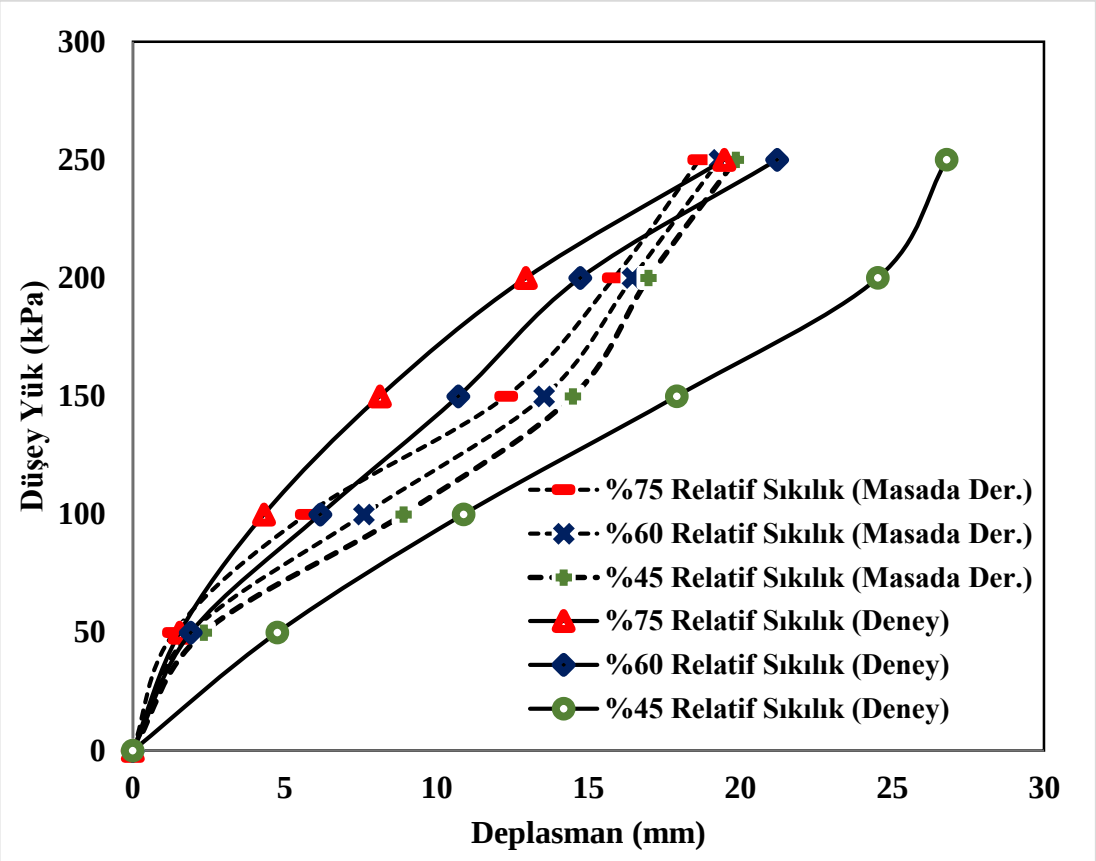
eşitliği kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarda yer alan J ve K yatak katsayıları için kullanılması gereken değerler Çizelge 3.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. J ve K yatak katsayıları.

Yataklama açısı	K katsayısı	J Katsayısı	J/K
60	0,0120	-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

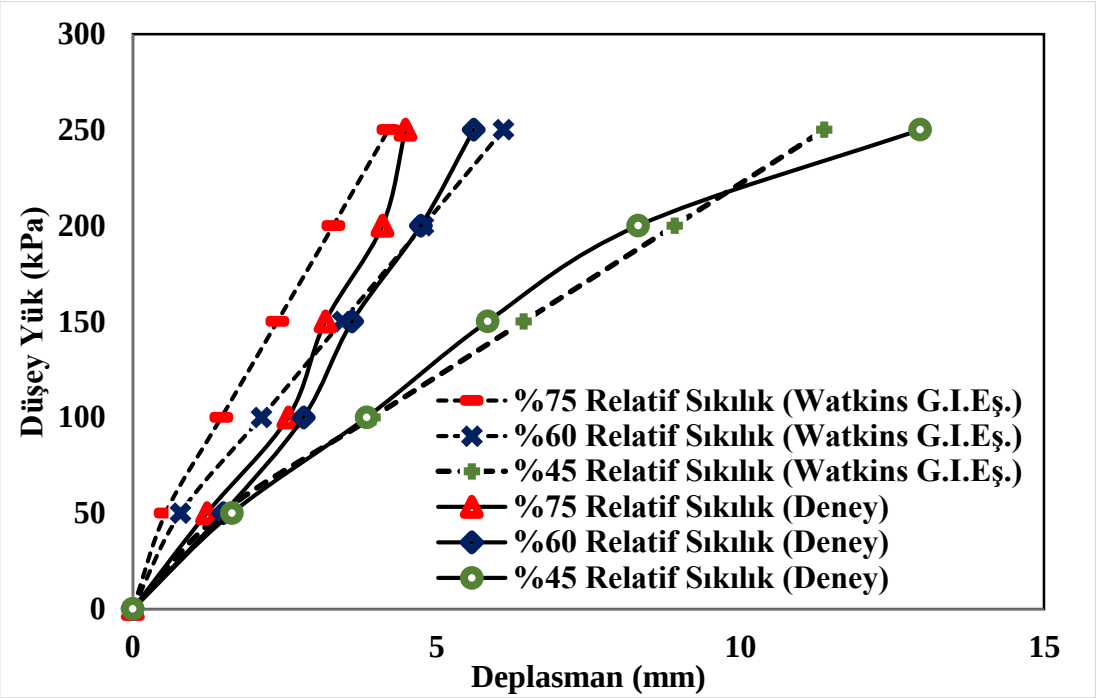
Güçlendirme elemanı olarak herhangi bir materyalin kullanılmadığı deneylerden elde edilen veriler, söz konusu sistem içerisinde en yakın sonuçları veren hesaplama yöntemleri arasından taç bölgesi deplasman değerleri kapsamında Masada Derivasyonu (1996) ile elde edilmiştir. Bel bölgesi deplasman değerleri açısından ise Watkins'in Geliştirilmiş Iowa Eşitliği (1966) en yakın sonuçları vererek elde edilen

değerler her iki deplasman türünden karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımlar kapsamında elde edilen grafikler tüm sıkılık koşulları altında Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Relatif sıkılık değişimine göre boru taç deplasman değerlendirilmesinde deney verileri ile Masada Derivasyonu'nun karşılaştırılması.

Relatif sıkılık değerlerine göre belirlenen zemin mühendislik özellikleri ve deney sisteminde oluşturulan geridolgu ortam koşulları doğrultusunda saptanan parametreler, formül içerisinde değerlendirilerek taç bölgesi için Masada Derivasyonu ile, bel bölgesi için ise Geliştirilmiş Iowa Eşitliği ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak relatif sıkılık değeri arttıkça her iki metot için de laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere daha yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Relatif sıkılık değişimine göre boru bel deplasman değerlendirilmesinde deney verileri ile Watkins Geliştirilmiş Iowa Eşitliği'nin karşılaştırılması.

3.5 Diğer Metotlar ve Eşitlikler

Esnek borular yataklama tabakası üzerine konuşlandırıldıktan sonra deformasyonlar gözlemlenmeye başlamaktadır. Bunun üzerinde geridolgu üzerine serilen her katmanda şekil değiştirmeler devam etmektedir. Bilhassa, küçük çembersel rijitlikli boruların yan duvarlarında geridolgunun sıkıştırılması esnasında düşey yönlü uzama davranışları izlenmektedir. Ayrıca, geridolgu malzemesi ile doğal zemin arasındaki etkileşimin dikkate alınması gerekmektedir. 1990 yılında ileri sürülen Greenwood-Lang Geliştirilmiş Iowa Eşitliği'nde, Spangler ve Watkins'in göz önünde bulundurmadığı bu önemli kriterler dikkate alınmıştır. Greenwood ve Lang (1990), Leonhardt'ın 1979 yılında öne sürdüğü yaklaşımından faydalanarak Eşitlik 3.6'daki bağıntıyı sunmuşlardır.

$$\Delta x = \frac{K.\gamma.H}{E.\frac{I}{r^3}+0{,}061.\text{ç}.c_1.E'} - \delta_w \qquad (3.6)$$

Burada;

Δx: Yatay deformasyon (m),

K: Yataklama katsayısı,

ɣ: Geridolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (kN/m^3),

H: Boru üzerindeki geridolgu malzemesinin yüksekliği,

I: Borunun atalet momenti (m^4/m),

R: Borunun ortalama yarıçapı (m),

ç: Leonhardt eşitliği,

C_1: Greenwood-Lang zemin-boru etkileşim katsayısı.

Greenwood ve Lang'ın yataklama katsayıları üzerine kullanılmasını önerdikleri değerler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Greenwood ve Lang yatak katsayıları (Terzi, 2007).

Zemin Türü	**İnce Malzeme Oranı (%)**	**Zeminin Proktor 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 Kil-Silt	>50	0,103	0,103	0,096	0,083

Düşey yüklemelere maruz kalan gömülü borular iki farklı şekilde davranış göstermekte olup şekil değiştirmektedirler. Bu iki şekil değiştirme çeşidinden ilki, ovalleşerek düşey eksende kısalma ve yatay eksende uzamadır. İkinci ise, dairesel

büzülerek küçülmesidir. Bu bakımdan, McGrath 1998 yılında, dairesel deformasyonların eksenel deformasyonlara oranla çok daha az miktarlarda da olsa hesaplamalara katılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu sebepten dolayı, çembersel ve eğilme rijitliklerinin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. McGrath'ın öne sürdüğü eşitlikte bu iki durum göz önüne alınarak hesaplama kriterleri değerlendirilmiştir. Diğer bir yandan, McGrath düşey ve yatay deformasyonların birbirlerine eşit olduğu kabul etmiştir. Eşitlik 3.7'de verilen formülde eşitliğin ilk kısmı Burns-Richard (1964) elastik metotu kullanılarak türetilirken ikinci kısımda zeminin bir boyutlu sıkışma modülünün dikkate alındığı Geliştirilmiş Iowa Eşitliği kullanılmıştır.

$$\frac{\Delta v}{D} = \left[\left(\frac{DKE.P_c}{\frac{E.A}{r}+0{,}57.M_s}\right) + \left(\frac{D_L.K.P_c}{\frac{E.I}{r^3}+0{,}061.M_s}\right)\right] \tag{3.7}$$

Burada;

Δv: Düşey yönde deformasyon (m),

DKE: Düşey kemerlenme etkisi (%),

P_c: Düşey yük (kPa),

E: Borunun Young modülü (kPa),

r: Boru yarıçapı (m),

M_S: Geridolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü (kPa),

K: Yataklama katsayısı,

D_L: Deformasyon gecikme faktörü.

Iowa eşitliğinin geliştirilmesi, sadece sayısal iterasyonlar, laboratuvar çalışmaları ve arazi deneyleri sonucunda saptanan veriler değerlendirilerek ortaya konmuştur. Bu sebepten ötürü Spangler'in öne sürdüğü formülasyon yarı ampirik bir bağıntıdır. 1964 yılında Burns ve Richard, elastik kabuk teoreminden faydalanarak tamamı ile sayısal

eşitliklere dayanan kuramsal bir yaklaşım olarak literatürde yerini almaktadır. Burns ve Richard, hendek ortamını tam elastik olarak kabul ederek tatbik edilen düşey yükleri Poisson oranı ile yanal yüklere çevirmiştir. Bu yaklaşımda, boru ile zemin arayüzeyini bütünüyle tutulu veya serbest bir şekilde kabul edilmektedir. Fakat, saha çalışmalarında yapılan uygulamalardan alınan geri dönüşler neticesinde Richard-Burns elastik yönteminin küçük çaplı ve kalın duvarlı borularda doğru sonuçlar vermediği belirtilmiştir. Burns ve Richard'ın elastik kabuk teorisini esas alarak türettiği yaklaşım üzerinde birtakım değişiklikler uygulayarak yeni bir elastik çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Burns ve Richard metodunda zemin tam elastik olarak varsayılmış ve K yanal itki katsayısı Poisson oranı kullanılarak saptanmıştır. Hoeg elastik çözüm yönteminde ise K katsayısının Poisson oranı ile herhangi bir bağıntısı yoktur. Ayrıca, zemin-boru arayüzey ilişkisi için belirtilen iki farklı sınır şartı üzerinden değil eşdeğer bir kabul üzerinden tek bir kabule dayanarak değerlendirme yapılmıştır. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar sonucunda Hoeg yönteminde de küçük çapa sahip borularda sonuçlar kesin olmamak ile beraber büyük et kalınlıklı ve sığ derinliğe konuşlandırılmış (D/8'den küçük) borularda doğru sonuçlar gözlemlenmemiştir (Hoeg, 1966).

Hoeg diğer bir yandan boru çevresindeki geridolgu malzemesinin aşırı gevşek olduğu koşullarda boru ve zeminin kompozit bir malzeme gibi davranış gösterebileceğini ve bundan dolayı sıkışabilirlik katsayısında düzeltmeler yapılması ihtiyacı olduğunu belirtmiştir.

Literatürde yer alan elastik çözüm yöntemleri arasında en çok tanınan Richard-Burns ve Hoeg yöntemleri aynı kabuk teoremi baz alınarak geliştirilmiştir. Bu kapsamda elastik metotların avantajları şu şekilde ortaya konulmaktadır:

• Duvar kesitinde meydana gelen gerilme dağılışları, eğilme momentleri ve deformasyon değerleri ayrıntılı bir biçimde hesaplanabilmektedir.

• Herhangi bir basınç dağılımı kabulüne ihtiyaç duymadan hesaplamalar yapılabilmektedir.

• Zemin-boru arayüzeyinde ortaya çıkan etkileşimler hesaplamalarda dikkate alınabilmektedir.

• Elastik yöntemde kullanılan malzeme değişkenleri kolay saptanan ve hesaplanabilen parametrelerdir.

• Boru hattı çevresinde bulunabilecek gevşek zeminlerin davranışa yansıtacağı etkiler yorumlanabilir.

Elastik yöntemlerin olumsuz yönleri arasında ise;

• Zeminlerin doğru bir yaklaşım olmayan lineer elastik olarak modellenmesi,

• Yataklama koşullarının stabiliteye olan etkilerinin dikkate alınmaması,

• Yerleştirme esnasında değişebilen koşulların göz önünde bulundurulmaması,

• Boru-zemin arayüzeyinde kayma olduğu veya olmadığı iki sınır şartında yapılan değerlendirmelerde bu sınır şartları arasındaki arageçiş ortamının hesaplanmaması,

• Hendek ortamında oluşan gerilme dağılışının eşdeğer bir biçimde yayıldığının varsayılması,

• Sığ hendek derinliklerinde ve yüksek rijitliğe sahip borularda uygun olmayan sonuçların elde edilmesi yer almaktadır.

Iowa Eşitliği, Geliştirilmiş Iowa Eşitliği, Masada Derivasyonu, McGrath Iowa Eşitliği, Greenwood-Lang Geliştirilmiş Iowa Eşitliği, Richard-Burns Elastik Yöntemi ve Hoeg Elastik Çözüm Yöntemi ve eşitliklerinde formülasyonlar içinde yer alan değişkenler yorumlandığında gömülü boru davranışını etkileyen parametreler maddeler halinde şu şekilde özetlenebilir:

• Borunun rijitliği,

• Geridolgu malzemesinin rijitliği,

• Zemin ve borunun poisson oranları,

• Yükleme seviyesi,

• Hendek boyutları,

• Yataklama özellikleri,

• Yerleştirme biçimi,

• Zaman,

• Hat boyunca meydana gelebilen boru ve zemin değişimleri.

Yukarıda belirtilen değişkenler arasında, termoplastik özellik gösteren politilen türündeki bir gömülü borunun uzun vadeli performansını etkileyen başlıca parametre "zaman" etkisidir. Bu açıdan, gömülü boruların servis ömrü boyunca stabilitesinin tespit edilmesi ve zaman içerisindeki davranışlarının belirlenebilmesi büyük önem taşımaktadır. Watkins Geliştirilmiş Iowa eşitliğinde zaman faktörü hesaplamalara yansıtılırken D_L gecikme faktörü dikkate alınsa da Chua ve Lytton 1989 senesinde yayınladığı çalışmada bu işlemi yetersiz görüp Hoeg Elastik Çözüm Yöntemi'ne Laplace dönüşümlerini uygulayarak viskoelastik bir metot geliştirmiştir.

3.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

Arazideki zemin ve malzeme özelliklerinin teorik hesaplamalarda tam olarak temsil edilememesinden dolayı birçok metot ve eşitlikteki sonuçlar gerçek değerlerden epey farklı çıkabilmektedir. Her metot ve eşitlik pek çok sınırlandırma içerisinde etkili neticeler verebilmektedir. Ancak, arazi ortamında anizotrop ve değişken zemin koşullarında bu sınırlandırmaların dışına çıkılmaktadır ve hesaplama yöntemleri her zaman efektif bir biçimde kullanılamamaktadır. Bu olumsuzluklar üzerine zemin bünyesinde sürekli değişen mekanizmaları, güncel koşulların ve sınırlamaların etkilerini yansıtarak hesaplayabilecek sonlu elemanlar metotları geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, daha hassas sonuçları daha kısa sürede ve daha az iş gücüyle elde etmek için geliştirilmiş nümerik bir yaklaşımdır. Aynı zamanda, karmaşık mühendislik problemlerini çok küçük elemanlara indirgenmesiyle ve her bir elemanın birbiri içerisinde şekil fonksiyonları yardımı ile ortaya konan bir çözüm yöntemidir. Bu

bakımdan, hesaplamalar bütüncül diferansiyel denklemlerden ziyade parçalı algoritmik eşitliklerin birbiri içerisinde kullanılarak elde edilmektedir. Bu kapsamda pek çok mühendislik firması teorik çalışmalar ve literatür ışığında yazılımlar geliştirerek sonlu elemanlar yöntemi esaslı programlar üretmiştir. Problem tipine göre farklı modüllerin veya farklı program arayüzlerinin piyasaya sürüldüğü günümüzde program içeriği doğrultusunda gerçek arazi koşullarının yansıtılabileceği yazılımlar tercih edilmelidir.

Sonlu elemanlar yöntemi, gömülü borular üzerinde de pek çok alanda kullanılmıştır. Farklı zemin ortamı koşullarında, çeşitli türdeki ve boyutlardaki borular için yataklama, geridolgu yüksekliği, güçlendirme vb. değişkenlerin nasıl bir etkiye neden olacağı nümerik olarak çözümlenmiştir. Zemin-boru etkileşimi problemleri, farklı sınır koşullar ve farklı yükleme durumlarındaki boru servis kapasitesini ve davranışını nümerik olarak belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminin gömülü boru davranışı üzerine üstünlükleri olduğu gibi birtakım olumsuz yönleri de mevcuttur. Bu olumlu ve olumsuz yönleri maddeler halinde sıralamak gerekirse:

Olumlu yönler:

• Boru-zemin sürekli ortamının tamamının modellenmesi ile çözümleme yapılmaktadır.

• Radyal ve eksenel deformasyonlar, çember kesitinde meydana gelen açısal gerilmeler, eğilme momentleri, normal ve kesme kuvvetleri ayrıntılı bir biçimde değerlendirilerek çözümler grafiklere dökülebilmektedir.

• Aşırı yüklemelere maruz kalan boruların göçme ve deformasyon biçimlerinin (burulma, burkulma, kırılma, şekil değiştirme) nasıl gerçekleştiği araştırılabilmektedir. Buna bağlı olarak, borunun servis kabiliyetinde sınır koşulları görsel bir şekilde yorumlanabilmektedir.

• Farklı geometri ve boyutlara sahip boruların farklı yerleştirme koşullarındaki davranışı incelenebilmektedir.

• Geridolgu malzemesinin yerleştirilmesi esnasında ve hat inşası sırasında meydana gelebilecek deformasyonlar tespit edilerek servis öncesinde ve hizmet aşamasındaki deformasyonlar hassas bir biçimde değerlendirilebilmektedir.

• Statik ve dinamik yüklerin boru üzerine etkitildiği durumlar hesaplanabilmektedir.

• Yükleme koşulları farklı şekillerde (eşdeğer, eşdeğer olmayan, yayılı, yanal, asimetrik ve karmaşık) uygulanabilmektedir.

• Zemin çeşitli bünye modelleri (Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Cam-Clay vb.) kullanılarak çözümlenebilmektedir.

• Zemin-boru arayüzeyinde meydana gelen kayma düzlemi dikkate alınabilmektedir.

Olumsuz yönler:

• Farklı zemin profillerinden geçen boru hatlarının her bir farklı kesit için farklı modellenmiş sonlu eleman analizlerine tabi tutulması gerekmektedir.

• Üç boyutlu (3D) analizler özellikle büyük modeller ve uzun boylamsal modeller için çok zaman alıcı olabilmektedir.

• Termoplastik kökenli boruların viskoelastik özellikleri ve davranışları zemin ortamı içerisinde bütünüyle modellenememektedir (Terzi, 2007).

Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemleri kullanarak hesaplamalar ve tasarım yapan paket programlar arasında PIPE5, CANDE, SPIDA gibi programlar sektörde tanınmaktadır. Ayrıca, boruların davranışlarını ve göçme mekanizmalarını belirleyip aynı zamanda bu verilerin gösterilirken tüm ortam koşullarının ayrıntılı olarak tasarlanmasına da imkan sağlayan ABAQUS, ANSYS, FEMAP, PLAXIS, ADINA, DIANA, LUSAS ve SIGMA gibi programlar da mevcuttur.

Bu doktora tez çalışmasında, teorik hesap yöntemleri ve kapsamlı laboratuvar deneyleri haricinde tüm deney serisi ANSYS programı ile analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanarak bütüncül halde oldukça zor, karmaşık ve uzun süren problemleri kullanıcı bakış açısı ile çok sayıda elemanlara bölerek analizleri

gerçekleştirmektedir. Çalışmada yer alan programın ayrıntılı açıklamaları, gerçekleştirilen analizlerin adımları ve analiz sonuçları ile değerlendirmeler Bölüm 6'da verilmiştir.

3.7 Standartlar, Sınır Koşulları ve Boyutlandırma

Arazi şartlarının laboratuvar ortamında olduğu gibi temsil edilebilmesi, literatürde yer alan çalışmalarda belirtilen metotların ve geliştirilen eşitliklerin sağlanması ve model üzerinden hassas veriler okuyabilmek için laboratuvar çalışmalarında hacimce büyük bir deney kutusu tercih edilmelidir. Gerçek arazi koşullarının, diğer bir deyişle sonsuz zemin ortamının laboratuvar çalışmalarına yansıtılabilmesi için ASTM D2321 ve AASHTO Sec30 standartlarında boru çapına göre yataklama seviyesi, gömme derinliği, boru ile kutu duvarları arasındaki mesafe gibi sınır şartları belirtilmiştir. Bu sınır şartlarının doğru belirlenmesi sistemin hassaslığı ve gerçek şartlarla örtüşmesi için büyük önem taşımaktadır. Bunun için sıkılık kontrollü deneylerin haricinde sınır koşullarının önemini vurgulayan deney setlerinin oluşturulması gerekmektedir. Sınır koşullarını doğru bir şekilde barındıran ve ihlal eden kutu boyutlarının belirlenmesinde kullanılan standartların gösterdiği minimum sınırlar Çizelge 3.6’daki gibi verilmiştir.

Çizelge 3.6. Standartlara göre belirlenen zemin ortamı genişlikleri.

Minimum Genişlik			
İç Çap (mm)	**Dış Çap (mm)**	**AASHTO Sec 30 (mm)**	**ASTM D2321 (mm)**
100	120	480	530
150	177	570	580
200	233	650	640
250	287	742	690
300	356	840	760
375	450	980	870
450	536	1110	970
525	622	1240	1080
600	699	1350	1180
750	866	1600	1390
900	1041	1870	1610
1050	1219	2130	1830
1200	1372	2360	2020
1350	1577	2670	2276
1500	1707	2870	2440
1800	2032	3350	2840

Ayrıca, zemin – gömülü boru ilişkisinin incelendiği bir çalışmada (Laidlaw, 1999), elde edilen tecrübeler ve araştırmalara dayanarak deney kutusu derinliğinin boru çapının 1.5 katı kadar olması gerektiği öne sürülmüştür. Diğer bir yandan başka bir standartta, geridolgu malzemesinin yüklemelerden kaynaklanan gerilmelerin uniform olarak dağılması için boru çapının 2 katı kadar bir dolgu yüksekliğine ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir (Aashto, 1996). Sonuç olarak, sınır koşullarının önemi hem literatür verilerine hem de deneysel verilere dayanarak vurgulanmıştır. Bu sebepten dolayı, standartlara ve geçmişten günümüze yapılan araştırmaların ışığında bu çalışmada kutu boyutları 400 mm çaplı boruya göre 1500 mm en ve genişliğinde, 1250 mm yüksekliğinde tasarlanmıştır. Çalışmada, yaklaşık 1000-1100 mm en ve genişliğin yeterli olacağı koşullarda dahi güvenli tarafta kalmak için pay bırakılmıştır. Rijit deney

kutusunun K_0 koşullarında uygunluk kriterlerini sağlayabilmesi için 10 mm et kalınlığında kuşaklar ile her bir kenarda 4 adet olmak üzere sargılanmıştır. Kutu kenar birleşim bölgeleri ve kuşaklar boydan boya kaynaklanarak güçlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar, ön deneyler ve nümerik analizler sonucunda geridolgu üzerine tatbik edilen yükün kutu duvarlarına ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, rijit deney kutusunun ve yerleştirildiği deney çerçevesindeki okumalardan alınan veriler doğrultusunda sistemin deforme olmadığı belirlenerek sistemin stabil olduğu kanıtlanmıştır.

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde yapılan kapsamlı laboratuvar deneylerinin hazırlık aşamaları, deney sistemin kurulumu, çalışmada kullanılan materyallerin mühendislik özellikleri ve çalışma prensipleri yer almaktadır.

4.1 Malzeme Özellikleri

4.1.1 Geridolgu ortamı ve silis kumu

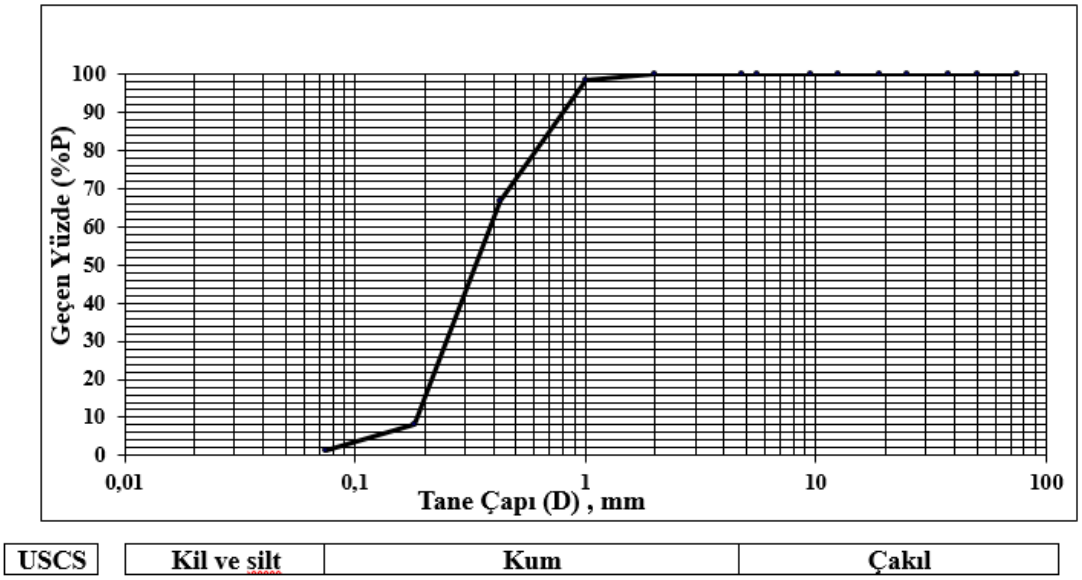
Saf silis içerikli ve üniform dağılımlı silis kumu İstanbul Şile sahili bölgesinde yer alan Kızılcaköy mevkiinden temin edilmiştir. Silis kumu üretiminde, yıkama, zenginleştirme, sınıflandırma ve kurutma safhaları gerçekleştirilmektedir. Üretim akışında maksimum ‰0,5 AFS (American Foundarymen Society, 2015) kili, maksimum ‰7 rutubeti olan ürünler, homojenlik derecesi ‰70 ve üzerinde el değmeden üretilmektedir (URL-3).

4.1.1.1 Elek analizi ve endeks özellikleri

Laboratuvar deneyleri kapsamında yataklama malzemesi ve geridolgu olarak kullanılan silis kumunun dane dağılımı gösterimi Şekil 4.1'de, granülometri eğrisi Şekil 4.2'de ve dane derecelenme kriterleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Silis kumu elek analizi.



Şekil 4.2. Silis kumu granülometri eğrisi.

Çizelge 4.1. Silis kumunun efektif çap, üniformluk katsayısı ve eğrilik katsayısı.

Efektif çap (D_{10}) mm	**Üniformluk katsayısı (C_u) $C_u=D_{60}/D_{10}$**	**Eğrilik katsayısı (C_c) $C_c=D_{30}^2/(D_{10}.D_{60})$**
0,198	2,11	0,32

Elek analizi yapılan numunede %0,078 kil ve silt, %99,922 kum ve %0,0 çakıl bulunmaktadır. 2000 gr etüvde kurutulmuş zemin numunesi üzerinde yapılan elek analizi sonuçları yukarıda Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre deneye tabi tutulan zeminin sınıfı MIT (Massachusetts Institute of Technology) ve USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) zemin sınıflandırma yöntemlerine göre kötü derecelenmiş kum (SP) (C_c<1 ve C_u<6) olarak tespit edilmiştir (ASTM D2487-93, 1995).

Geridolgu malzemesi için kullanılan silis kum numunelerinin maksimum sıkışma yüzdesine karşılık gelen minimum boşluk oranı değeri standart proktor deneyi ile belirlenmiştir. Etüvde kurutulan numuneler standartlara uygun bir biçimde sıkıştırılarak minimum boşluk oranı ve numune huni vasıtasıyla düşük bir yükseklikten dökülerek maksimum boşluk oranı tayin edilmiştir (ASTM D698, 2012). Kumun özgül ağırlığı ise TS 706 (2009) ve TS 1114 (1986) standartlarına göre

bulunmuştur. Belirlenen maksimum ve minimum boşluk oranı, gevşek ve sıkı haldeki birim hacim ağırlıkları ile özgül ağırlık değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Silis kumunun maksimum ve minimum boşluk oranı ile özgül ağırlığı.

Maksimum boşluk oranı (e_{max})	0,87
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0,52
Gevşek haldeki birim hacim ağırlık (γ_{min})	14,49 kN/m^3
Sıkı haldeki birim hacim ağırlık (γ_{max})	16,09 kN/m^3
Özgül yoğunluk (G_S)	2,65

4.1.1.2 Relatif sıkılık ilişkisi

Laboratuvar deneyleri kapsamında yürütülen çalışmalar geridolgu malzemesinin sıkılık kondisyonları üzerinden sürdürülmüştür. Öncelikle ilk üç referans deneyi ve daha sonra takviye elemanların boru hattı üzerindeki etkinliklerinin araştırıldığı deneylerde, değişken olarak üç farklı durum incelenmiştir. Zemin ortamının sıkıştırılması, 10 kg ağırlığındaki 0.25 m^2'lik bir levhanın sabit 50 cm mesafeden 5 ve 10 kez serbest düşü ile bırakılarak sağlanmıştır. Bu koşullar altında değişkenler;

- gevşek halde (0 düşü - %45±%2 relatif sıkılık)

- orta sıkı halde (5 düşü - %60±%2 relatif sıkılık)

- sıkı halde (10 düşü - % 75±%2 relatif sıkılık)

olarak belirlenmiştir. Söz konusu sıkılıklara bağlı olarak zemin ortamının sahip olduğu mühendislik parametreleri ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.

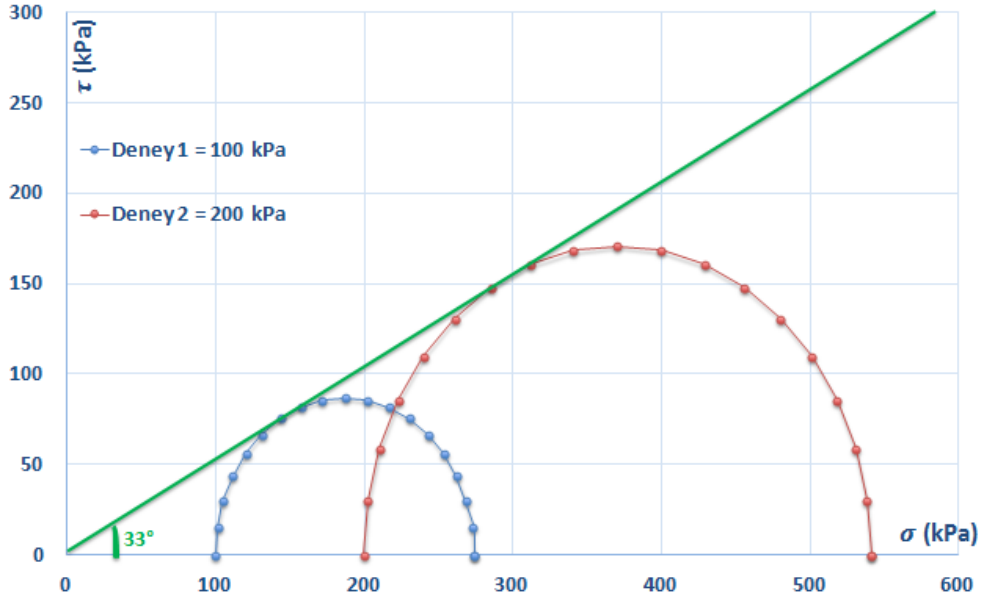
Çizelge 4.3. Relatif sıkılık – mühendislik özellikleri ilişkisi.

Düşü (N) defa	**Relatif Sıkılık (D_r) %**	**Birim Hacim Ağırlık (γ) kN/m3**	**Boşluk Oranı (e)**	**İçsel Sürtünme Açısı ($\phi°$)**	**Elastisite Modülü (E) MPa**	**Açıklama**
0	45	14,49	0,793	33	30	Gevşek
5	60	15,10	0,722	36	50	Orta Sıkı
10	75	16,09	0,616	39	65	Sıkı

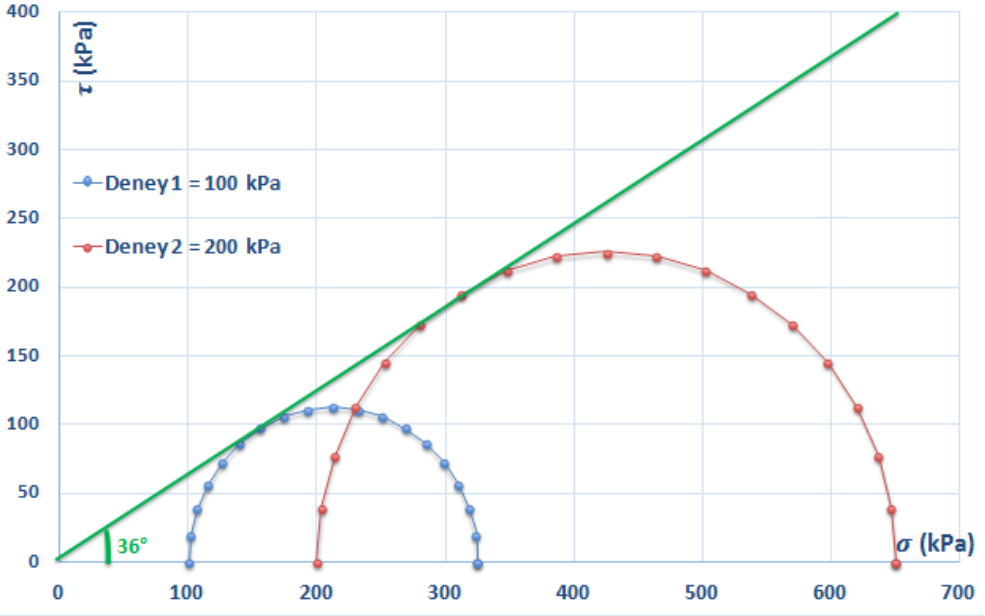
Daha fazla düşü değerlerinde ekstra sıkışma gözlemlenmediğinden dolayı üst limit 10 düşü olarak belirlenmiştir. Değerler, deney kutusu içerisinde ve laboratuvar ortamındaki yığının farklı bölgeleri üzerinden alınan üçer adet numunenin ortalaması göz önünde bulundurularak saptanmıştır.

4.1.1.3 Üç eksenli basınç deneyleri

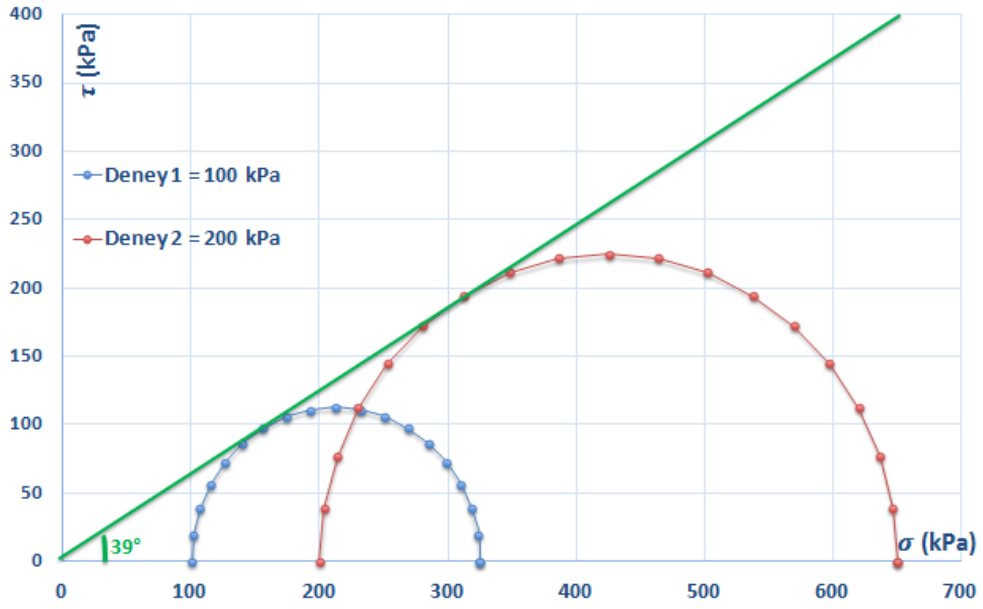
Üç eksenli basınç deneyleri ile kumlu zeminin kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Numunelerin değişken sıkılık değerlerinde hazırlanması için sıkılık – boşluk oranı ve sıkılık – birim hacim ağırlık kontrolleri yapılmıştır. Her sıkılık değeri için üçer adet numune test edilmiş olup iki kontrol metodunun ortalama değerleri esas alınmıştır. Üç eksenli basınç deneyleri, 50 mm çapında ve 107-124 mm yükseklik aralığındaki hazırlanan numuneler üzerinde 100 kPa ve 200 kPa hücre basıncı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Mohr daireleri Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te ve gerilme – şekil değiştirme (σ-ε) grafikleri Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.



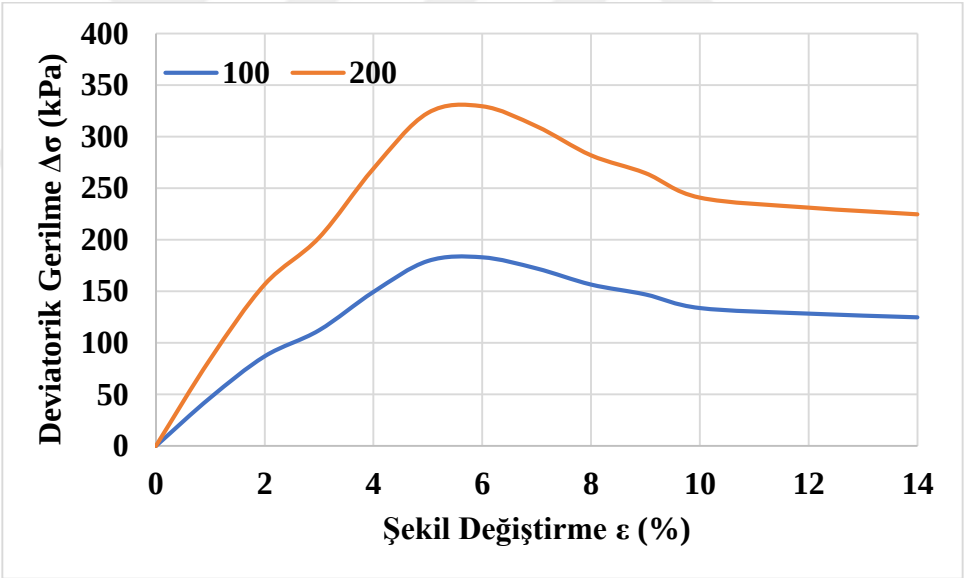
Şekil 4.3. %45 relatif sıkılık değerleri için üç eksenli basınç deneyi sonuçları.



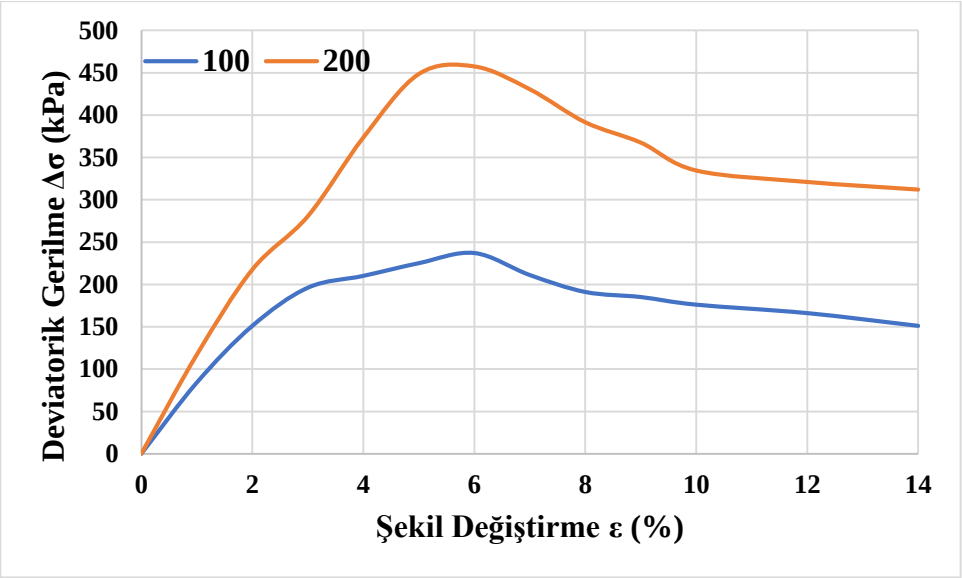
Şekil 4.4. %60 relatif sıkılık değerleri için üç eksenli basınç deneyi sonuçları.



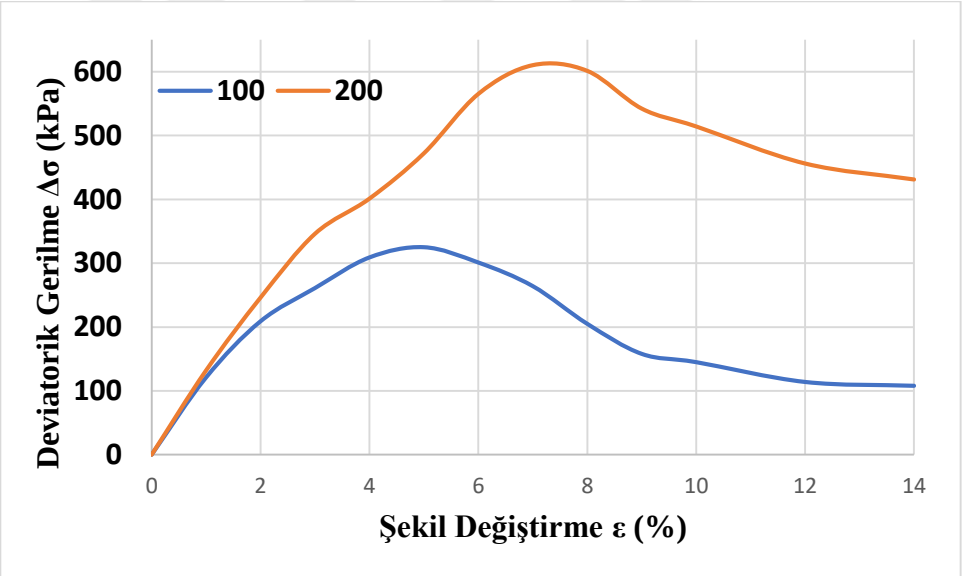
Şekil 4.5. %75 relatif sıkılık değerleri için üç eksenli basınç deneyi sonuçları.



Şekil 4.6. %45 relatif sıkılık değerleri için gerilme-şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4.7. %60 relatif sıkılık değerleri için gerilme-şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4.8. %75 relatif sıkılık değerleri için gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlendiği üç eksenli basınç testleri Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9. Kayma mukavemeti parametrelerinin tayini için üç eksenli basınç deneyi.

4.1.2 HDPE borular ve özellikleri

Teknolojik gelişmeler, plastik boru üretimi için gerekli hammadde üretiminde de önemli gelişmeleri beraberinde getirmiştir. 1950'li yıllarda geliştirilen PE 32 sınıf düşük yoğunluklu polietilen plastik borular ilk kez içme suyu hatlarında kullanılırken daha sonra PE 63 hammaddesi geliştirilerek yüksek basınç gerektirmeyen sistemlerde kullanılmıştır. Ancak, PE 63, malzemenin teknik özelliklerinden dolayı 4 bara kadar basınç gerektiren hatlarda kullanılmıştır. Hammadde gelişmelerinin sonraki dönemlerde de devam etmesi ile beraber 2. jenerasyon olarak PE 80 hammaddesi piyasaya sürülmüştür. Dolayısıyla, PE 80 hammaddesi de içme suyu ve doğalgaz şebekelerinde yüksek performansta kullanılmaya başlanmıştır. 1990'lı yılların başlarında ise geliştirilen 3. jenerasyon PE 100 boru hammaddesi ise içme, kullanma suyu ve doğal gaz şebekelerindeki kullanım alanına hem yüksek performans, hem de ekonomik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

1. Jenerasyon hammaddeler : PE 32 (LDPE), PE 40 (LDPE), PE 63 (HDPE)

2. Jenerasyon hammaddeler : PE 80 (MDPE), PE 80 (HDPE)

3. Jenerasyon hammaddeler : PE 100 (HDPE)

PE 100 Polietilen Boruların Avantajları:

Polietilen borular yüksek esneme kabiliyetine sahip olmaları nedeni ile kurulum ve montaj aşamalarında kolaylık sağlamaktadırlar. Kopma uzaması değeri üretici firmalar tarafından en az %350 olarak belirlenmektedir,

- Diğer boru türlerine göre yer hareketlerinden daha az etkilenmektedirler ve kırılma özellikleri bulunmamaktadır,
- Darbe dayanımı ve çatlak yayılma dirençleri yüksektir,
- HDPE 100 boruların iç yüzey pürüzlülükleri düşük olduğundan dolayı tasarım ve projelendirme safhalarında çap tercih edilirken önemli avantajlar sağlamaktadırlar,
- Denizaltı uygulamalarında döşenmeye uygundurlar ve deniz hareketlerinden etkilenmemektedirler,
- Birleşim tekniklerinden ötürü montaj firesi olmamaktadır,
- Minimum 50 yıl süre nominal işletme basıncı altında sorun yaratmamaktadır,
- Ultraviyole (UV) ışınlarına karşı dayanıklıdır,
- Zemin bünyesinde bulunan ve aşındırıcı etkiye sahip zararlı madde ve bileşimlerden etkilenmemektedirler. Bu sebepten dolayı katodik koruma ihtiyacı bulunmamaktadır,
- Kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır,
- Polietilen 100 boru, suda koku ve tat bırakmamaktadır. Bu bakımdan, sağlığı tehdit etmemektedir,
- Bitki ve ağaç kökleri gibi organik maddelerin polietilen borular içerisine girme imkanı yoktur (URL-2).

Dış çapı 400 mm ve et kalınlığı 9.8 mm olan borular 1,5 m boylarında kesilerek deney kutusu içerisine sığacak biçimde boyutlandırılmıştır. Boru iç ve dış çeperleri temizlenerek deneye hazır hale getirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde, boru dış çapı 400 mm olan yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boruların düşey yükleme altındaki davranışı araştırılmıştır. Boru taç bölgesinin düşey deformasyon ile bel bölgesinin yatay deformasyonu potansiyometrik cetveller vasıtası ile ölçülmüştür. Ayrıca, taç, bel ve taban bölgelerinde oluşan eğilme momenti değerleri birim

deformasyon ölçerler yardımı ile okunan değerlerden hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan boruların mühendislik parametreleri ve hammadde verileri, boruların temin edildiği firmanın araştırma – geliştirme laboratuvarlarında yapılan deneyler yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Deney setlerinde kullanılan borular üretici firma tarafından boyut, yoğunluk, kütlesel erime akış hızı, çekme, iç basınç direnci, pigment dağılımı, karbon siyahı dağılımı, oksidasyon-indüksiyon süresi, boyutsal kararlılık, dış darbeye mukavemet, etüv, çember rijitliği ve halka esnekliği, hızlı çatlak ilerlemesi, uçucu madde muhtevası deneyi gibi pek çok nokta dikkate alınarak üretilmektedir ve standartlar ile şartnameler doğrultusunda test edilmektedir. Bu kapsamda referans alınan standartlarından bazıları TS EN 12201-2+A1, EN 12201-3, EN 12201-4: 2011, CEN/TS 12201-7, EN ISO 178: 2003, ISO 4065: 1996, ISO/TR 10358: 1993, ISO 11922-1: 1997, ISO 21004: 2006'dır. Bu tez çalışmasında kullanılan borular PN16 anma basıncında HDPE 100 borulardan seçilmiştir. Anma basıncı, borunun kullanılacağı tesisat veya hat içerisindeki işletme basıncına göre belirlenmektedir. PN16, hat içerisinde kullanılan elemanın 16 bar basınca karşı direnç gösterebileceğini ifade etmektedir. HDPE 100 ifadesi ise polietilen yoğunluğunun yüksek olması ile ilgilidir. Polietilen boru ve ek parça üretiminde kullanılan hammaddeler gerekli asgari dayanım (MRS) ile sınıflandırılır. MRS, malzemenin 20°C da 50 yıl süre ile iç basınca gösterdiği mukavemet değeridir ve PE borularda bu değer 10 MPa olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, MRS cinsinden polietilen boruların sınıflandırılma şekli Çizelge 4.4'te, tez çalışmasında kullanılan boruların temin edildiği firmanın yaptığı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Polietilen boruların sınıflandırılması (URL-2).

Hammadde Sınıfı	**PE 32**	**PE 40**	**PE 63**	**PE 80**	**PE 100**
MRS Değeri (MPa)	3,2	4,0	6,3	8,0	10,0

Çizelge 4.5. Polietilen hammaddesinin kimyasal özellikleri (URL-2).

Materyal / Özellik	Yüksek Yoğunluklu PE	Orta Yoğunluklu PE	Düşük Yoğunluklu PE
Yoğunluk (g/cm3)	0,945 – 0,965	0,926 – 0,925	0,910 – 0,925
Üretim Basıncı (atm)	700	1000 – 1500	1000 – 2000
Üretim Sıcaklığı (°C)	<100	100 – 150	150 – 200
Dallı Molekül Zinciri Miktarı(adet / 1000)	4 – 5	35 – 50	80
Kristal Yapı Oranı (%)	90	70	60
Şeffaflık Oranı (%)	90 – 95	85 – 90	50 – 85
Erime Noktası (°C)	135	120	95 - 105
MFI 5 Kg/ 190 °C (g/10 dk)	0,22 – 0,60	0,85	>0,85
23°' de Kopma Gerilimi (MPa)	>21	>15	>23
23°' de Elastisite Modülü	>600	>700	>1000

4.1.2.1 Sabit hızda çekme testi ve malzeme parametrelerinin tayini

Hesaplamalarda ve ANSYS programına girilen verilerde laboratuvar deneylerinden elde edilen mühendislik parametreleri kullanılmıştır. HDPE boru numunesi üzerinde sabit hızda çekme testi raporuna istinaden ilk boyu bilinen numuneler sabit 50 mm/dk hızında çekme testine tabi tutularak şekil değiştirme parametreleri elde edilmiştir. Çekme özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan standartlar ise "ISO 6259-1: Termoplastik borular - Çekme özelliklerinin tayini - Bölüm 1: Genel deney yöntemleri" ve "ISO 6259-3: Termoplastik borular - Çekme özelliklerinin tayini - Bölüm 3: Poliolefin Borular" olarak esas alınmıştır. Şekil 4.10'da deneylerde kullanılan HDPE100 boru üzerinden alınan numunelere uygulanan sabit hızda çekme testi ve numune üzerinden alınan verilerin işlenerek veri toplama ünitesi için kalibrasyon datalarının oluşturulması gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Sabit hızda çekme testi ve şekil değiştirme ölçümü için kalibrasyon.

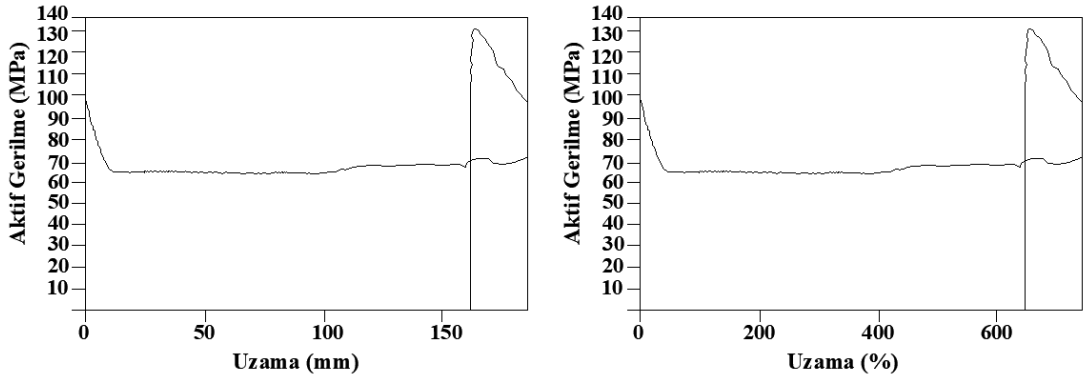
Laboratuvar deneylerinin sonuçları ile literatürde yer alan değerlerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Boru malzemesine ait elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. HDPE borunun elastisite modülü ve Poisson oranı.

HDPE 100 Boru Mühendislik Parametreleri	D400* - t9,81**
E (Elastisite modülü)	900 MPa
ν (Poisson oranı)	0,42

*çap (mm), **et kalınlığı (mm) boru üzerinden alınan numune için

HDPE 100 sınıfı borudan çıkarılan ve ölçüleri alınan numune üzerinde TSE EN 6259 (2015) standardına uygun olarak boruların üretildiği firmanın AR-GE laboratuvarında gerçekleştirilen 50 mm/dk sabit hızda çekme testinden elde edilen gerilme-uzama grafikleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Sabit hızda çekme testine göre HDPE 100 borunun gerilme-uzama grafiği.

4.1.2.2 Kalite kontrol ve uygunluk kriterleri

Temin edilen HDPE boruların tamamı kalite ve uygunluk kriterleri kapsamında firmanın ARGE laboratuvarı tarafından araştırmacıların katılımı ile testlere tabi tutulmuştur. Bunlar:

Boyutların tayini:

Boru ve bağlantı elemanlarının boyutlarının belirlenmesi için yapılmaktadır. Boru ve bağlantı elemanlarının, çap, uzunluk, et kalınlığı, diklik durumu ve geometrik sınırları saptanmaktadır ve (23 ± 2) °C sıcaklıkta muhafaza edilen boru numuneleri "TS EN ISO 3126: Plastik Boru Sistemleri - Plastik Elemanlar - Boyutların Tayini" standardı doğrultusunda belirlenen aralıklar dahilinde değerlendirilmektedir.

Yoğunluk tayini:

Söz konusu bu deney, malzemenin birim hacmindeki ağırlığının tayini ve yoğunluğunun tespiti amacı ile yapılmaktadır. Deney numunesinin, belirli bir sıcaklıkta havadaki kütlesinin (m), hacmine (V) oranı ile (kg/m^3; kg/dm^3; g/cm^3), (kg/L) veya (g/mL) birimlerinde sonuca varılmaktadır. Numuneler, daldırma kabına

uygun bir boyutta kesilerek en az üç tane olmak üzere hazırlanmaktadır. Numuneler olabildiğince 1 gramdan küçük olmayacak şekilde hazırlanırken numunelerin yapılan tüm işlemler sırasında karakteristik özelliğini kaybetmemesine dikkat edilmelidir. Deney numunelerinde hava kabarcığı oluşmasına neden olabilecek çukurların bulunmaması gerekmektedir (TS EN ISO 1183-1, 2006).

Kütlesel erime akış hızının tayini:

Deney amacı, belirli bir sıcaklıkta ve yükleme koşullarındaki erimiş termoplastik malzemenin kütlesel akış hızını (MFR) belirlemektir. TS EN ISO 1133-1: "Plastikler - erimiş termoplastiklerin kütlesel akış hızının (MFR) ve hacimsel akış hızının (MVR) tayini – Bölüm 1: Standart yöntem" standardına göre numune değerlendirilerek akış hızı tayin edilir.

İç basınca direncin tayini:

Bu deney, sıvıların aktarılmasına yönelik termoplastik boruların ve ek parçalarının belirli bir sıcaklıkta iç hidrostatik basınca karşı direncinin tayin edilmesini kapsamaktadır. Deney elemanlarına bir süre boyunca hasar oluşuncaya kadar öngörülmüş sabit bir iç hidrostatik basıncı uygulanır ve gerekli basınç kademeli ya da kesintisiz olarak tatbik edilir. Hasar oluştuğu anda "TS EN ISO 1167-1: Termoplastik borular, ekleme parçaları ve takımlar - sıvıların taşınmasında kullanılan - iç basınca direncin tayini - Bölüm 1:Genel yöntem" ve TSEN ISO 1167-2: Termoplastik borular, ekleme parçaları ve takımlar- sıvıların taşınmasında kullanılan - iç basınca direncin tayini - boru deney parçalarının hazırlanması" standartlarına göre hesaplamalar yapılmaktadır.

Oksidasyon indüksiyon süresinin tayini:

Boruların ve ekleme parçalarının üretiminde kullanılan ve bu elemanlardan alınan poliolefin malzemelerin oksijen içinde belirlenen sıcaklıkta oksidasyon indüksiyon süresinin (OIT) saptanmasına yönelik bir deneydir. "TS EN 728: Plastik boru ve kanal sistemleri - poliolefin borular ve ekleme parçaları - oksidasyon indüksiyon süresinin tayini" ve "TS EN ISO 11357-6: plastikler - diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)-

Bölüm 6: Oksidasyon indüksiyon süresi ve sıcaklığının hesaplanması" standartlarına göre gerçekleştirilmektedir.

Boyutsal kararlılık:

Termoplastik boruların boyca eski haline gelebilme karakteristiğinin belirlenmesi için uygulanmaktadır. Et kalınlığı (t) 16 mm'den büyük borularda eski halini alabilme oranının ölçülmesi uygun görülmemektedir. Uzunluğu belli bir boru parçası hava ısıtmalı etüv içerisine konuşlandırılmakta ve standarda uygun olarak belirli bir süre ve sıcaklıkta tutulmaktadır. Akabinde, boru parçasının işaretlenmiş bölümün uzunluğu, ısıtma işleminden önce ve sonra olmak üzere ölçülmektedir. Sonuç olarak, eski halini alabilme karakteristiği, uzunlukta izlenen değişimin ilk uzunluğa oranıdır (TS EN ISO 2505, 2010).

Çevre boyunca dış darbeye mukavemet deneyi:

Yuvarlak kesitli termoplastik boruların çevresince dış darbelere karşı mukavemetin belirlenmesi için uygulanmaktadır. Borulardan kesilen deney elemanlarının dış çevresi boyunca belirlenen bölgelerine standartların uygun gördüğü mesafelerden bir kütle düşürülmesi ile yapılmaktadır (TS EN 744, 1997).

Çember rijitliğinin tayini:

Daire kesitli termoplastik boruların çember rijitliğinin standartlara uygun olup olmadığının kontrolü için gerçekleştirilen bir deney olarak bilinmektedir. Çember rijitliği, sabit hızda üzerinde deformasyon görülen bir boruya uygulanan kuvvet ve oluşan deformasyonun ölçülmesi ile saptanmaktadır (TS EN ISO 9969, 1998).

Halka esnekliğinin tayini:

Daire kesitli termoplastik boruların halka esnekliğinin belirlenmesini kapsamaktadır. Belirli bir hızda dış çapın %30 oranında sıkıştırılması sonucunda borudaki deformasyona bağlı davranışın yorumlandığı deneydir. Sonuç olarak %30 deformasyonda "TS EN ISO 13968: plastik boru ve kanal sistemleri - termoplastik borular - halka esnekliğinin tayini" standardında belirtilen kuvvet kaybı, kırılma,

çatlama vb. görülmemesi gerekmektedir. Halka rijitliğinin hesabı için ise Eşitlik 4.1'deki formül kullanılmaktadır.

$$S_R = \frac{E.I}{r_m^3} \tag{4.1}$$

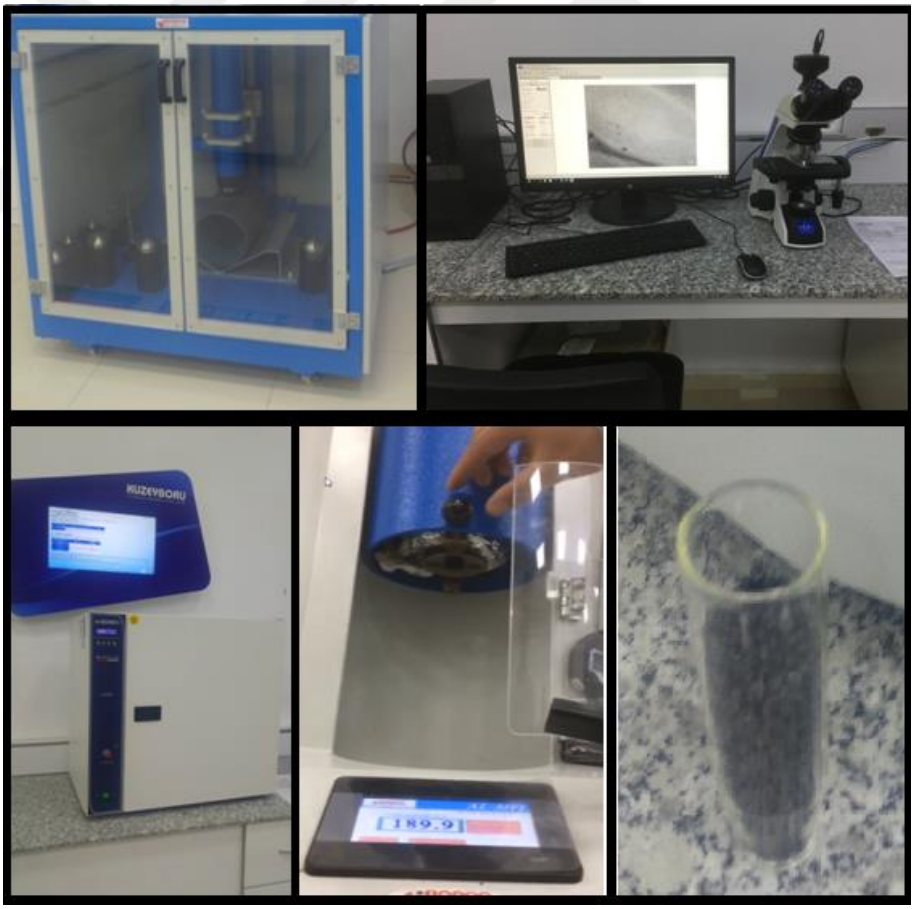
Burada;

E: Boru elastisite modülü (N/mm^2),

I: Boru kesitinin atalet momenti (m^4/m),

r_m: Boru ortalama yarıçapı (m),

S_R: Halka rijitliği (M/m^2).



Şekil 4.12. HDPE borular üzerinde yapılan kalite – uygunluk deneyleri.

Bu doktora tezinde kullanılan HDPE boruların tüm kalite ve uygunluk denetlemeleri boruların temin edildiği firmanın AR-GE laboratuvarlarında görev alan uzman ekip tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu kontrollerin bazıları Şekil 4.11'deki gibi gösterilmiştir.

4.1.3 Yarım kesitli atık araç lastikleri

Laboratuvar deneylerinde kullanılan atık lastiklerin mühendislik parametreleri literatürde yer alan verilerden yararlanılarak tanımlanmıştır. Araç lastiklerini ANSYS program ile modelleyen Giurgiu vd., (2012) hem statik hem de dinamik analiz kondisyonları için modellemenin nasıl yapılacağına dair bilgileri çalışmalarında paylaşmışlardır. Beklenildiği üzere lastik içerisinde yer alan bileşenler kauçuk kökenli hammadde ile birlikte daha yüksek elastisite modülüne sahip kompozit bir materyalden oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında literatürde yapılan araştırmalardan yola çıkılarak modellemeler gerçekleştirilmiş ve malzeme özellikleri bu doğrultuda Çizelge 4.7'de verildiği gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 4.7. Atık lastiklerin mühendislik parametreleri.

Yoğunluk	12,75 kN/m³
Elastisite modülü	40 MPa
Poisson Oranı	0,45
Malzeme sabiti MU1	10000 Pa
Malzeme sabiti A1	1,3
Malzeme sabiti MU2	1180 Pa
Malzeme sabiti A2	5
Malzeme sabiti MU3	-9810 Pa
Malzeme sabiti A3	-2
Sıkıştırılamazlık parametresi D1	4,825E-09 1/Pa

Kauçuk esaslı malzemelerin modelleri ise literatürde genellikle (Automotive Design Vol. 1x, 2015; Başar ve Itskov, 1998; Conradie vd., 2016; Giurgiu vd., 2012; Oktay ve Gürses, 2013; Vahapoğlu, 2010) hiperelastik modellerden Neo-Hookean, Yeoh

veya genellikle Ogden malzeme modeli ile tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, ANSYS programında atık lastikler için elastik malzeme özellikleri atandıktan sonra hiperelastik malzeme modeli sekmesinde Ogden malzeme modeli için yer alan parametreler tanımlanmıştır. Tez kapsamında, takviye olarak kullanılan yarım kesitli atık araç lastikleri, boru hattı ortasında 60 cm'lik bir bölgede ve boru hattının tamamında olmak üzere boru bel ve taç bölgesini saracak şekilde Şekil 4.12'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Yarım kesitli atık araç lastiklerinin boru üzerinde yerleşimi.

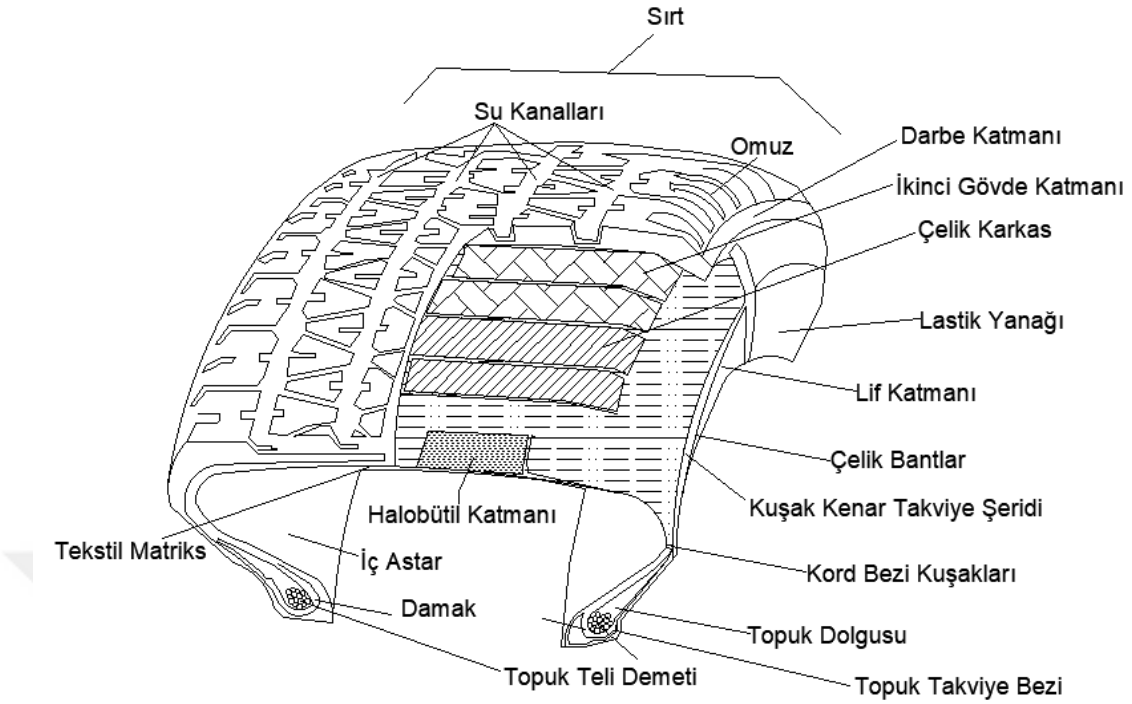
Atık lastik depolama tesislerinden alınan lastikler mekanik parçalayıcı bir makine yardımıyla işaretlenen kısımlardan ikiye bölünerek Şekil 4.13'te gösterildiği gibi yarım kesit haline getirilmiştir.



Şekil 4.14. Yarım kesitli atık araç lastiklerinin parçalama işlemleri.

Lastik, basınçlı havayı içerisinde hapsedebilecek bir biçimde dizayn edilmiş, aracın zemin ile temas yüzeyini oluşturan üniform görünümlü fakat kauçuk, kord bezi, çelik teller ve birçok kimyasalı bünyesinde barındıran kompozit yapılı bir materyaldir. Söz konusu bileşenlerin ayrıntılı olarak gösterildiği lastik kesit ve katmanları Şekil 4.14'te verilmiştir.

Araç lastikleri, emniyet, konfor ve yakıt tasarrufu açılarından en avantajlı sürüş dinamiklerini ortaya koyacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu bakımdan araç lastiği, darbeye ve tekrarlı yüklere karşı maksimum mukavemet gösteren ve sönümleyici özelliği bulunan bir malzemedir. İçerisinde, dayanımı artıran çelik katmanlar, bütüncül ve radyal yapıyı muhafaza eden bantlar, şeritler, kuşaklar, demetler ve takviyeler, suyu drene eden kanallar vb. pek çok bileşen bulunmaktadır.

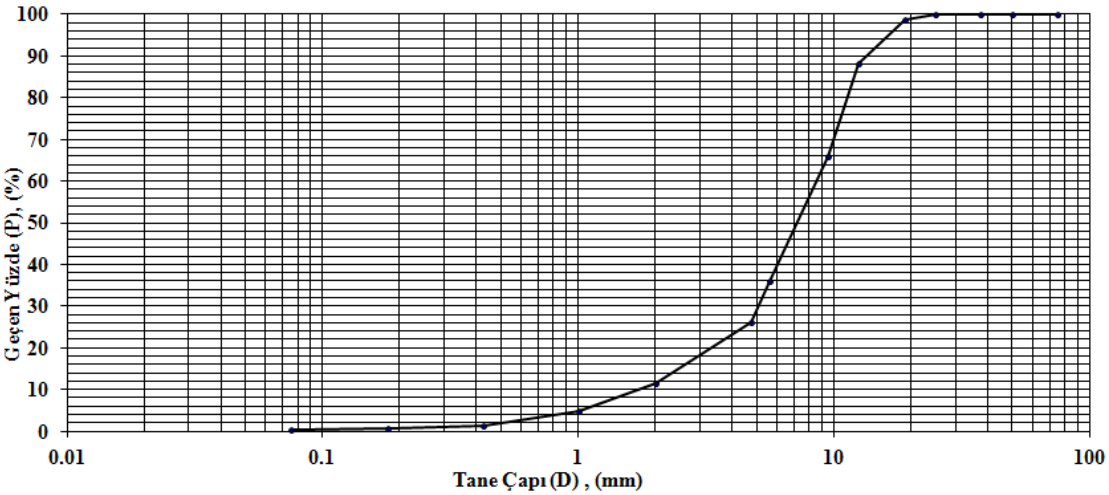


Şekil 4.15. Araç lastik kesit ve katmanları.

4.1.4 Geri kazanılmış atık araç lastik parçaları ve kauçuk granüller

Atıl halde bulunan kamyon, tır, otobüs, lastik tekerlekli iş makineleri ve binek araç araçların lastikleri, geri kazanım tesislerinde mekanik bıçaklı kırıcılar tarafından parçalanarak tekstil adı verilen kord bezi ve çelikten ayrılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan atıl lastikler geri kazanım tesislerinden ve lastik bayilerinden temin edilmiş olup mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için lastik üretim fabrikaları ile iletişime geçilmiştir. Granülometre eğrisi Şekil 4.15'teki gibi belirtilen malzeme için daha önce literatürde kullanılan veriler, laboratuvar deneyleri ve fabrika geribildirimlerine dayanan bilgiler doğrultusunda malzeme özellikleri belirlenmiştir (Bekhiti vd, 2014; Sofi, 2018; Edeskar, 2004; Pusca vd., 2010; Moo-Young vd., 2003; Yang vd., 2002; Drescher vd., 1999). Daha sonra geri kazanılmış atık araç lastik parçaları ve granülleri rijit bir kutu içerisinde plaka yükleme testine tabi tutularak mühendislik parametreleri kontrol edilmiştir. Yataklama tabakasında ve üstdolguda kullanılacak olan kauçuk granüller, atık araç lastik parçalarının geri kazanım tesislerinde parçalanması ile elde

edilmiş ve Şekil 4.16'da görüldüğü üzere yerleştirilmiştir. Sonuç olarak, sıkıştırılmış haldeki malzeme için edinilen bilgiler dahilinde malzeme özellikleri Çizelge 4.8'deki gibidir ve malzeme bileşenleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Parçalanarak geri kazanılmış atık lastik parçalarının ve granüllerin elek analizi.



Şekil 4.17. Parçalanarak geri kazanılmış atık lastik parçaları ve granüllerin üstdolgu ve yatak malzemesi olarak kullanımı.

Çizelge 4.8. Atık araç lastik parçalarının mühendislik parametreleri.

Mühendislik Parametreleri	Değer
Minimum yoğunluk; γ_{min} (kN/m^3)	4,91
Maksimum yoğunluk; γ_{max} (kN/m^3)	5,67
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0,43
Maksimum boşluk oranı (e_{max})	0,66
Boyut; (mm)	0,063 - 19
İçerdiği metal oranı; (%)	0
Uzama oranı; (%)	420
Özgül yoğunluk; Gs	1,06
Kohezyon; c (kPa)	0
İçsel sürtünme açısı (sıkı); ϕ (°)	32
İçsel sürtünme açısı (yığın); ϕ (°)	22
Su emme (%)	7,05

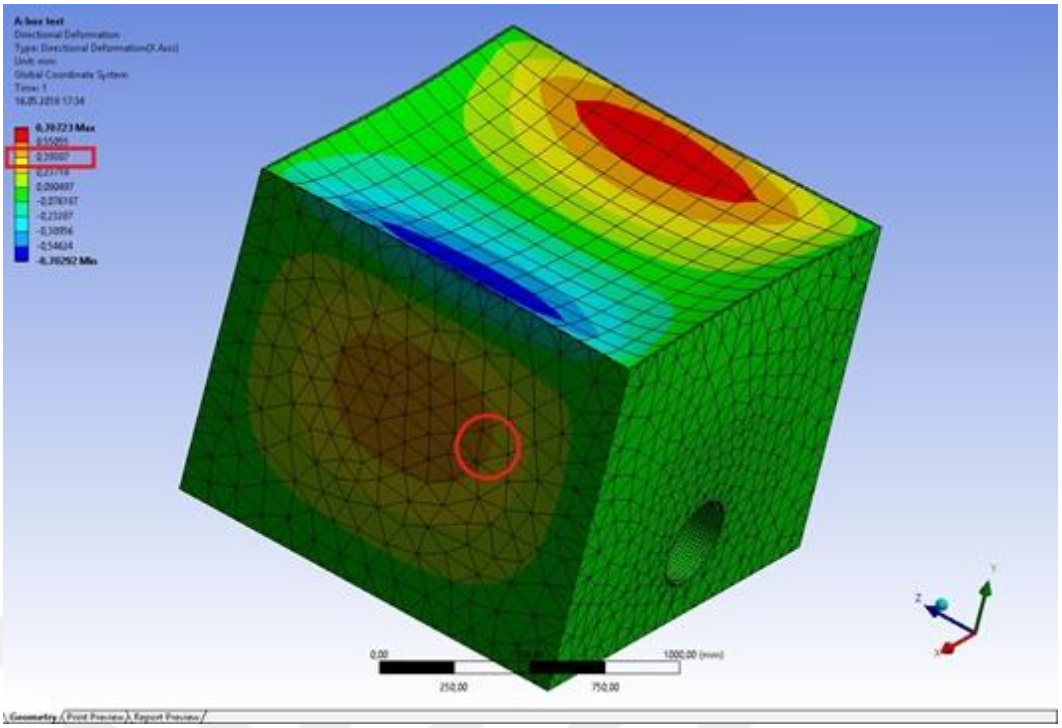
Çizelge 4.9. Kullanılan atık araç lastik parçalarının bileşen içeriği.

Bileşen	Oran (%)
Kauçuk	56,0
Karbon siyahı	28,0
Lif	1,6
Oksitlenmiş çinko	1,2
Sülfür	1,2
Katkı ve diğer materyaller	12,0

4.2 Deney Kutusu ve Çerçeve Sistemi

Borularda, çembersel ve teğetsel deformasyonlar oluşurken ortaya çıkan boylamsal rijitliğinin etkilerini minimize etmek için deney kutusu derinliğinin belirlenmesi literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında saptanmıştır. Bu

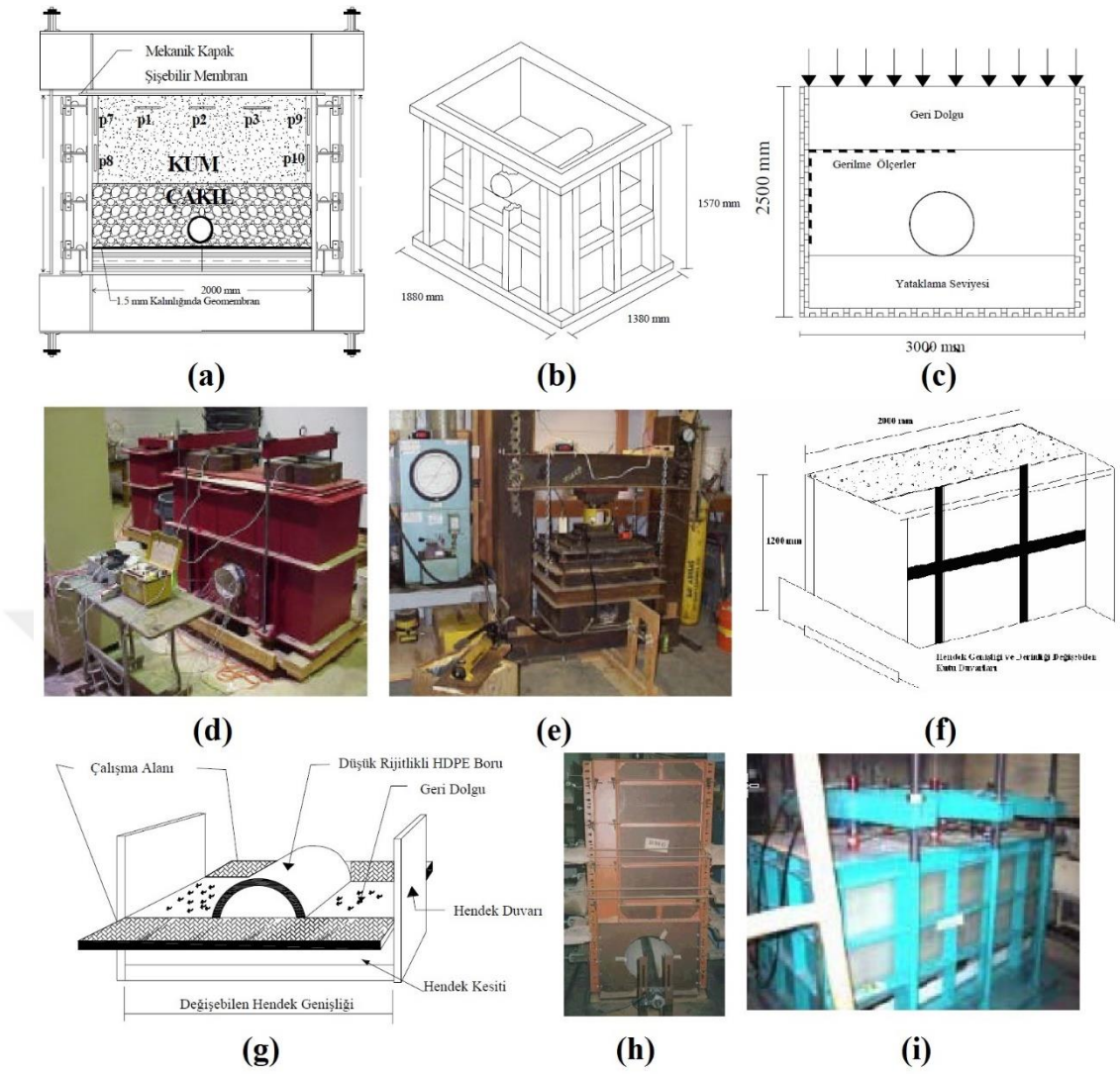
çerçevede, boru çapının 1,5 katı uzunlukta bir kutu derinliğinin, boru çapının iki katı kadar bir dolgu yüksekliğinin yeterli görüleceği vurgulanmıştır (Laidlaw, 1999; Terzi, 2007). Ayrıca minimum dolgu yüksekliğinin 300 mm olması gerektiğini belirten Aashto (1996) standardı baz alınarak laboratuvar deneylerinde kullanılan rijit deney kutusu tasarlanmıştır. Deney sisteminde, kutu içerisindeki zemin üzerine yük hücresi vasıtasıyla aktarılacak olan yüklemenin gerçekleştiği esnada düşey yöndeki kuvvetler K_0 (sükunetteki toprak basıncı) koşulları doğrultusunda yanal olarak kutu duvarlarına etkilemektedir. Bu kapsamda, kutu kenarlarının birbirine sağlam bir biçimde kenetlenmesi sağlanarak çelik levhalarda oluşması muhtemel sınır deplasman değerlerinin aşılmaması gerekmektedir. Bundan dolayı, kalınlığı 10 mm olan ve lazer kesimle elde edilmiş kutu kenarları birbirlerine çift taraflı ve yüksek voltajlı olarak kaynatılmıştır. Ek olarak, sisteme uygulanacak 2000 kN yük altında dahi her bir çelik levhanın dörder adet kuşak yardımıyla yanal deplasman yapması engellenmiştir. Kuşakların rijitliği artırmaya katkısı, kutuya hem kaynaklanarak hem de kuşaklar arasında birbirlerine sabitlenerek sağlanmıştır. Deney kutusunun deformasyonuna yönelik analizler ANSYS programlarında yapılmıştır. ANSYS programı ile yapılan analizler sonucu kutunun yanal deformasyon değeri laboratuvar deneylerinde etkitilecek olan maksimum yük altında Şekil 4.17'de gösterildiği gibi en kritik noktalarda maksimum 0,39387 mm kadar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. Yükleme sonucunda kutunun yanal deformasyon değerleri.

Rijit deney kutusunun yerleştirileceği çerçeve sistem ise NPU80 profillerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. TS EN 10163-3 standardına uygun ve C (1) sınıfı yüzey durumuna sahip profiller birbirlerine kaynaklanarak Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geoteknik Laboratuvarı'nda birleştirilmiştir. Daha sonra yükleme esnasında gözlemlenmesi muhtemel sehimlerin önüne geçilmesi için çerçevenin üzerine ek profiller kaynatılmıştır. Ayrıca, çerçevenin enine ve boyuna elemanlarının birleşim bölgelerine üçgen (bayrak) takviyeler kaynatılarak sistem rijitliği sağlanmıştır.

Literatür taramasında araştırılan deney kutuları, tasarım ve standartlara uygunluk kriterleri açısından değerlendirilerek bu doktora tezinde kullanılan deney kutusu dizayn edilmiştir. Gömülü boruların mühendislik özelliklerinin incelendiği önceki çalışmalarda kullanılan bazı deney kutuları Şekil 4.18'deki gibi literatürde yerini almıştır ((a) Brachman, 1999; (b) Rogers, 1988; (c) Gaube ve Mueller, 1981; (d) Cho, 2003; (e) Smith, 2004; (f) Choollun vd., 2009; (g) Zolad vd., 1996; (h) Cameron, 2005; (i) Kawabata vd., 2002).



Şekil 4.19. Literatürde yer alan bazı deney kutuları.

4.3 Yükleme Düzeneği

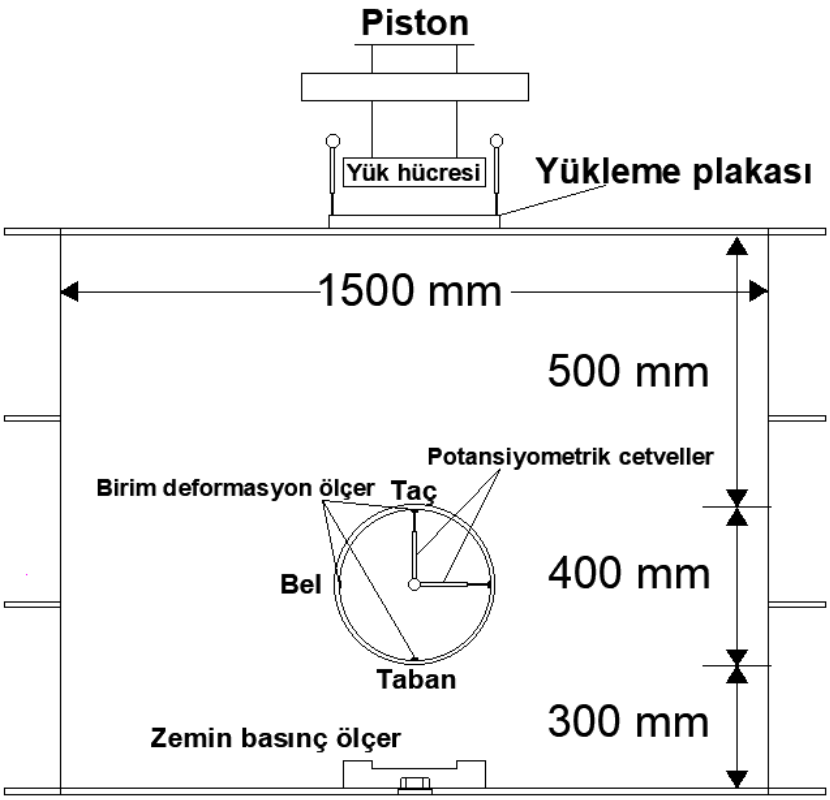
Rijit deney kutusunun üzerinde bulunduğu çerçeve sistemin üzerine, 50 ton kapasiteli bir piston, kaynak uygulamaları ve somunlu birleşimler ile sabitlenmiştir. Piston üzerindeki rekorlar ve manşonlar sızdırmayı önlemek için bir araya getirilerek deney düzeneği ile uyumlu bir biçimde yükleme düzeneğine montelenmiştir. Sisteme plakalar, civatalar ve somunlar yardımıyla sabitlenen düşey yönlü baskıyı sağlayacak pres sistemi NPU80 çerçeve profillerine bağlanarak yük aktarımına hazır hale getirilmiştir. Yük, hidrolik kriko vasıtasıyla pistona aktarılmakta ve piston kolu, kriko kolunun hızı ile orantılı bir biçimde itilmektedir. Piston ucuna sabitlenmiş yük hücresi

ise yeterli seviyeye ulaştıktan sonra yükleme plakasına temas etmekte ve yük değeri yük hücresi vasıtasıyla veri toplama ünitesine gönderilmektedir. Hidrolik silindir, hidrolik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren ve doğrusal hareket elde etmek amacı ile kullanılan devre elemanları olarak tanımlanmaktadırlar. Hidrolik pompa tarafından üretilen hidrolik enerjiyi silindir yardımı ile doğrusal ya da açısal harekete dönüştürebilirler. Silindir çapı, silindir kuvvetini belirleyen en önemli faktördür.

Yüklemeler, veri toplama ünitesinde görülen veri ekranından kontrol edilerek 90 saniyede bir 10 kN yük artırılacak şekilde tatbik edilmiştir. Yük etkisinde her bir yükleme adımı için, deformasyon, birim deformasyon artışı, zemin basıncı ve oturma değerleri 10 ile 32 saniye arasında son bulmuştur. Yükün sabit tutulduğu bu 90 saniyenin ardından bir sonraki yükleme adımında yine 10 kN yük artırımı yapılarak tüm deneylerde 100 kN nihai yüke kadar çıkılmıştır. Eni ve genişliği 650 mm, et kalınlığı 20 mm olan yükleme plakasına etkiyen bu kuvvet 236,69 kN/m^2'lik bir nihai basınç oluşturmaktadır.

4.4 Ölçüm Sistemi

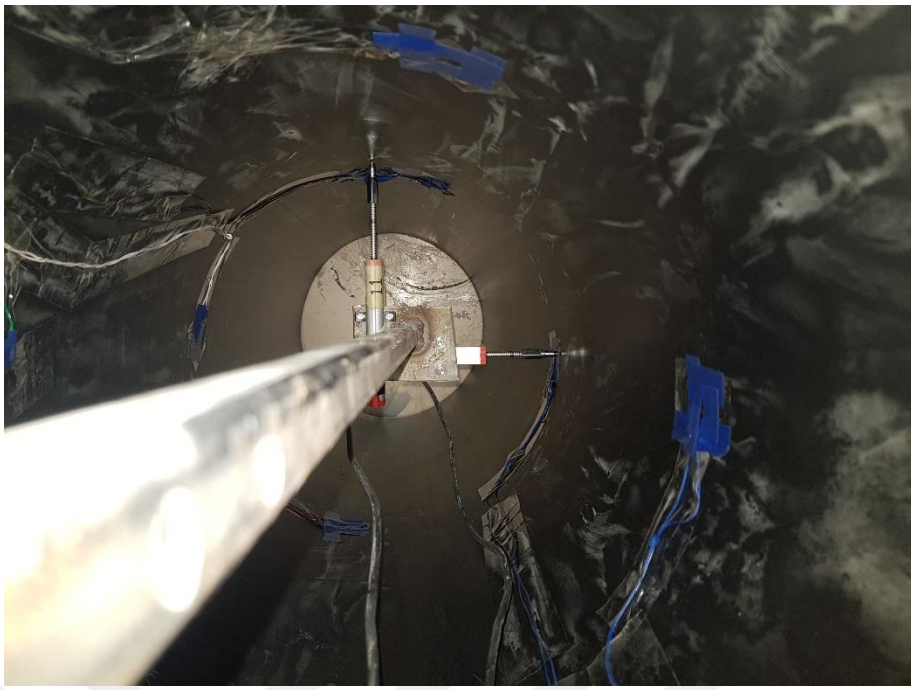
Ölçüm sistemi, boru taç ve bel bölgelerindeki deformasyonun tespiti ve şekil değiştirme miktarının kaydedilmesini sağlayan potansiyometrik cetvellerden, boru üzerinde meydana gelen gerilmelere bağlı eğilme momentinin hesaplanmasında kullanılan birim deformasyon ölçerlerden, zemine aktarılan kontrollü yük değerinin ölçülmesine yarayan yük hücresinden, rijit deney kutusu tabanındaki gerilmelerin belirlenmesinde kullanılan zemin basınç ölçerden ve bu verilerin aktarılıp kaydedilmesine yardımcı olan veri toplama ünitesi ve mikrokontrolcüden oluşmaktadır. Ölçüm sisteminin deney kutusu üzerindeki yerleşimi Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Deney kutusu ve ölçüm sisteminin yerleşimi.

4.4.1 Potansiyometrik cetveller

Potansiyometrik cetveller, direkt olarak mekanik deplasmanların değişimini ölçmek üzere dizayn edilmişlerdir. Bünyesinde yer alan yaylı kontrol mekanizması ile deplasmanı ölçülen cismin kavranması sağlanmaktadır. Potansiyometrik cetveller, geridolgu içerisindeki gömülü borunun orta noktasının taç ve bel bölgesi deformasyonları (Şekil 4.20) ile terazideki yükleme plakasının iki farklı noktasından (Şekil 4.21) oturma değerlerini ölçüp veri toplama ünitesine aktarmaktadırlar.



Şekil 4.21. Boru içerisine yerleştirilmiş potansiyometrik cetvel ve birim deformasyon ölçer formasyonu.



Şekil 4.22. Potansiyometrik cetveller ile yükleme plakası üzerinden oturma ölçümü.

4.4.2 Birim deformasyon ölçerler

Cisimler herhangi bir kuvvete maruz bırakıldıklarında şekil değiştirmeler ortaya çıkmaktadır. Bu şekil değişikliğinin ölçümüne dair uzama oranının belirlenmesi, cismin dayanım ve ömrü hakkında bilgiler vermektedir. Bundan dolayı, kuvvet etkiyen cismin uzamaya bağlı olarak üzerindeki gerilmenin ölçümü önem taşımaktadır ve söz konusu gerilmenin ölçümü için kullanılan metotlardan bir tanesi de birim deformasyon

ölçer yardımıyla olandır. Ölçme sistemlerinin temeli olan Wheatstone köprü devreleri üzerine kurulmuş olan bu sistem, cisimler üzerindeki minimal değişimleri dahi minivoltlar ölçüsünde veri ünitesine yansıtarak küçük değişimleri aktarabilmektedir.

Öncelikle, HDPE boru üzerine yerleştirilecek olan 120Ω'luk 10 mm birim deformasyon ölçerlerin sağlamlığı test edilmiştir. Multimetre yardımıyla her bir birim deformasyon ölçerin 120Ω (±1) olup olmadığına bakılarak hassas okuma alınmayan birim deformasyon ölçerler yenileri ile değiştirilmiştir. Borunun, taç, yan duvarları ve taban kısımlarına radyal doğrultuda yerleştirilen birim deformasyon ölçerler, veri toplama ünitelerine bağlanmıştır. Kalibrasyon dosyası, üretici firmadan elde edilmiş olup üzerinde revizyonlar yapılarak daha hassas hale getirilmiştir ve sıfır okumaları alınarak deneye hazır kılınmıştır.

Kumlu zemin ortamında gerçekleştirilen deneylerde borunun taç, bel ve taban kısımlarında meydana gelen eğilme moment dağılımları da dikkate alınmıştır. Eğilme moment değerleri boru kesitine yapıştırılan birim deformasyon ölçerler kullanılarak hesaplanmıştır. Birim uzunluk için gerilme değerlerinin hesaplanması Eşitlik 4.2'de gösterilmiştir. Boru kesitindeki eğilme momentinin de buradan türetilerek hesaplamasında Eşitlik 4.3 kullanılmaktadır (Terzi, 2007).

$$\sigma_z = \frac{M_x}{I_x}.y = \frac{M.\frac{t}{2}}{I} = E.\varepsilon \tag{4.2}$$

$$\mathrm{M_b} = \varepsilon * \frac{\mathrm{E*I}}{\mathrm{r}} \tag{4.3}$$

Burada;

σ= Gerilme,

ε= Birim şekil değiştirme,

M= Moment,

t= Kalınlık,

M_b= Eğilme momenti,

E= Borunun elastisite modülü,

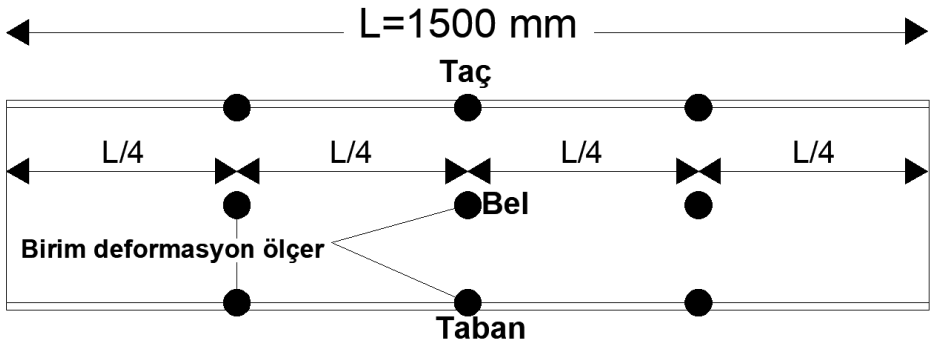
I= Borunun atalet momenti,

r= Borunun dış yarıçapı,

ε= Şekil değişimidir.

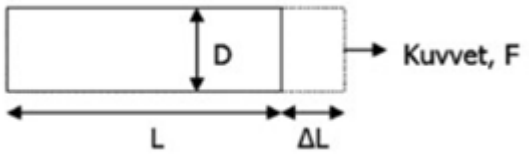
Yürütülen bütün deneylerde HDPE borunun orta noktasında (L/2) ve orta noktası ile ucu arasında (L/4) olmak üzere birim deformasyon ölçerler boruya uygun yapıştırıcı ile yekpare bir davranış gösterecek şekilde yapıştırılmıştır.

L, boru uzunluğu şeklinde tanımlanmış olup hat boyunca birim deformasyon ölçerlerin yerleşim bölgeleri Şekil 4.22'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.23. Birim deformasyon ölçerlerin yerleşimi.

Birim deformasyon, belirli bir kalınlıktaki L uzunluğundaki kütlenin ΔL kadar uzamasının boyuna olan oranı biçiminde tanımlanmaktadır (Şekil 4.23 ve Eşitlik 4.4). Cisim üzerindeki birim deformasyonu ve buna bağlı diğer deformasyon türlerini belirleyebilmek için ise birim deformasyon ölçerler kullanılmaktadır. Birim deformasyon ölçer, elastik bir taşıyıcı üzerine yerleştirilmiş ince tellerden oluşmakta olan ve lineer bölgede yükle doğru orantılı olarak uzayan bir bileşendir. Birim deformasyon ölçer üzerindeki tellerin uzaması veya kısalması ile birlikte direnç de orantılı olarak değişerek birim deformasyonlardaki farklılıklar hakkında veri ünitesine data aktarımı yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan birim deformasyon ölçerler 120Ω direncindedir ve kazanç katsayısı (GF) =2' dir (Eşitlik 4.5).

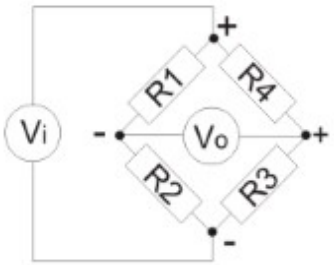


Şekil 4.24. Birim şekil değiştirme (URL-4).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{4.4}$$

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \tag{4.5}$$

Direnç değişimlerinin ölçülebilmesi için Şekil 4.24'te gösterildiği üzere Wheatstone köprüsü adı verilen bir devre sistemi üzerinden hesaplamalar yapılarak çeyrek köprü bağlantılı bir sistem oluşturulmuştur. Köprünün dengede olduğu koşul V_0 geriliminin 0 olduğu nokta olur ve bu bağlamda çeyrek köprü bağlantılı tanımlanmış birim deformasyon ölçerin çıkışta oluşturacağı birim deformasyon farkı Eşitlik 4.6'daki gibi olmaktadır.



Şekil 4.25. Wheatstone köprüsü (URL-4).

$$V_0 = \left[\frac{R3}{R3+R4} - \frac{R2}{R1+R2}\right] * V_i \tag{4.6}$$

Köprü bağlantı tipleri, çeyrek köprü, bending yarım köprü, poisson yarım köprü, bending tam köprü, bending – Poisson tam köprü, Poisson tam köprü vb. şeklinde farklı biçimlerde bulunabilmektedir. Çalışmada kullanılan çeyrek köprü bağlantılar doğrultusunda hesaplanan V_r ve ε değerleri Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8'deki hesaplanmaktadır (URL-4). Tüm eşitliklerin dengede olduğu koşullar altında yapılan çıkarımlar sonucunda:

$$\varepsilon = -\frac{4*V_r}{GF} * (1 + 2 * V_r) \tag{4.7}$$

$$V_r = \left(\frac{V_0}{V_i}\right) y\ddot{u}kl\ddot{u} - \left(\frac{V_0}{V_i}\right) y\ddot{u}ks\ddot{u}z \tag{4.8}$$

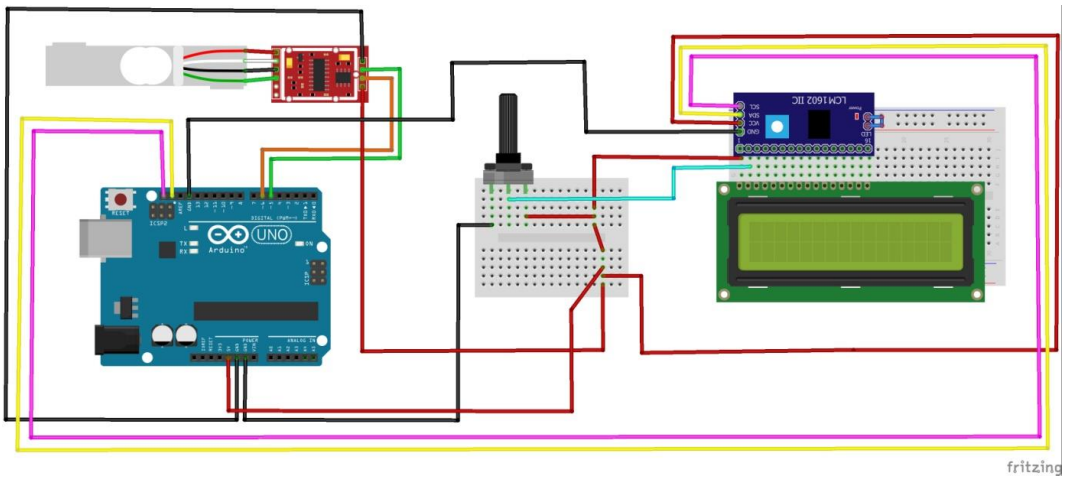
bulunmuştur. Buradan elde edilen birim şekil değiştirme oranından yararlanarak deformasyon hesaplamaları yapılmış ve hem deney sonuçları hem de analiz sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlamalarda bulunulmuştur. Ölçülmesi hedeflenen sinyal değeri mV cinsinden farklı çözünürlüklerde alınabilmektedir. Bu çalışmada, x150 kattan x890 kata kadar yükseltme seçenekleri arasından x494 kanal kazancı tercih edilirken ikaz gerilimi 10V olarak seçilmiştir (URL-4). Tüm kalibrasyonlar neticesinde veri toplama ünitesi üzerinde tüm veri girişlerinin doğruluğu tespit edildikten sonra deneyler yürütülmüştür. Birim deformasyon ölçerlerin HDPE boru içerisine yerleştirilmiş hali Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Boru hattı L/2 ve L/4 kesitlerinde birim deformasyon ölçer yerleşimi.

4.4.3 Zemin basınç ölçer

Düşey yüklemeye maruz kalan kumlu zemin ortamı içerisine gömülü HDPE esnek boruya aktarılan yük ile sisteme uygulanan gerçek yük arasındaki fark, sıkılık ve sistem içerisine tatbik edilen uygulamalara göre değişmektedir. Uygulanan düşey yükün bir kısmı boşlukların azalması ile birlikte sönümlenirken bir kısmı da yanal toprak basıncı etkisiyle yatay olarak aktarılmaktadır. Bu bakımdan boruya ve sistem tabanına etkiyen gerilmeler bu çalışmanın ilk üç deneyi olan sıkılık değişkenleri durumlarına göre farklılık göstermektedirler. Tez çalışmasında, sistem tabanına yerleştirilmiş mikrokontrolcüye entegre yük hücresi ve plakası, birim alana gelen yükü hesaplayarak tüm deneyler boyunca verileri bilgisayar ortamına aktarmıştır. 144 cm^2'lik bir plaka 25 kN kapasiteli bir yük hücresine entegre edilerek veri toplama ünitesine paralel bir mikrokontrolcü ile eş zamanlı çalışarak veriler kaydedilmiştir. Mikrokontrolcünün ve elemanların devre şeması Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.27. Zemin basınç ölçer mikrokontrolcüsünün devre şeması.

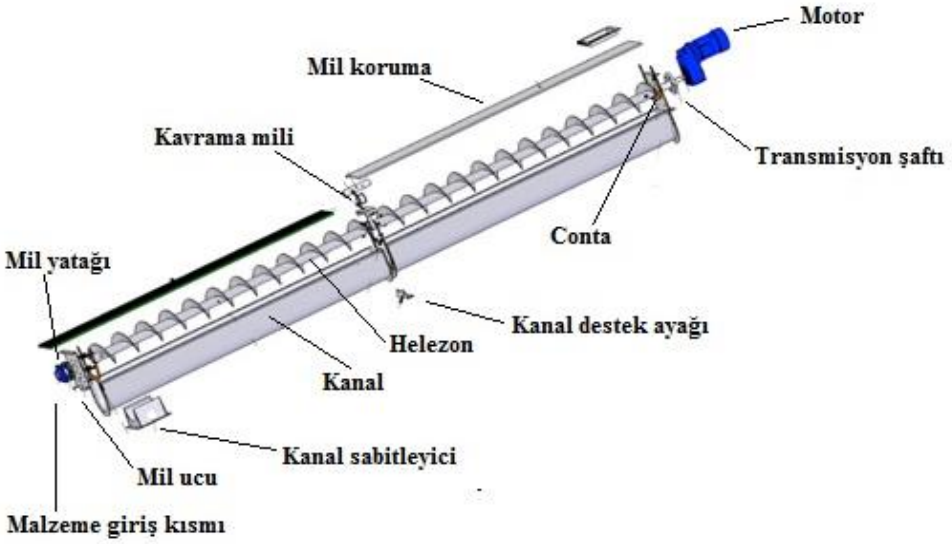
4.4.4 Yük hücresi

Yük hücresi, rijit kutunun yerleştirildiği çerçeve üzerine sabitlenen piston ile birleşik olarak sisteme dahil edilmiştir. Yüksek kuvvet ve yorgunluğa karşı dirençli yassı tip yük hücresi hava ve su geçirmez özelliktedir. Labortatuvar deneylerinde maksimum 500 kN yük taşıma ve ölçme kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Hidrolik krikodan aktarılan yük piston kolunu itmektedir ve yük hücresi yükleme plakasına temas ettiği anda veri okumaya başlamaktadır. Bilgisayar kontrollü olarak krikodan aktarılan yük, yük hücresinin veri toplama ünitesine gönderdiği bilgi akışı ile kontrol edilerek belirlenen aralıklarda yük uygulanmaktadır.

4.5 Kum Aktarma Helezonu

Yaklaşık 5 ton kum alma kapasiteli rijit deney kutusunun doldurulması yorucu ve uzun zaman almaktadır. Diğer bir yandan solunumun olumsuz etkilenmemesi ve laboratuvar ortamı ile cihazların toz olmaması açısından deney kutusunun kısa sürede doldurulması ihtiyacı olmuştur. Bu sebepten dolayı, kutu üzerinden dolum yapılan bölge haricindeki alanlar kapatılarak seri ve tozsuz bir çalışma ortamı yaratılmıştır. Bu bakımdan, laboratuvar ve deney sistemine uygun bir biçimde tasarlanan kum aktarma helezonu deney sistemine dahil edilmiştir. Çelik borunun içerisindeki helezon, makine üzerindeki motordan alınan güç vasıtasıyla dönmekte ve yığın halinde bulunan kumlu zemin ortamını kutu içerisine transfer etmektedir. Diğer bir deyişle, burgulu konveyör

adı da verilen sistemde kapalı bir oluk içerisinde çalışan helezon, konveyörün boşaltma noktasındaki bir elektrik motoru tarafından tahrik edilen bir burgu vasıtasıyla aktarımı gerçekleştirmektedir. Katı ve daneli malzemeler giriş ağzından sisteme dahil olmakta ve malzemeler burgu döndükçe giriş ağzından çıkışa kadar taşınmaktadır.



Şekil 4.28. Kum aktarma helezonunun kısımları.

Yukarıda Şekil 4.27'de gösterildiği üzere kum aktarma helezonu, kanal içerisinde bulunan bir spiralin motor gücüyle çevrilerek alt seviyede bulunan granüler malzemenin yukarı taşınmasında kullanılmaktadır. Bu düzenek, deney sistemi içerisinde Şekil 4.28'de verildiği gibi yer almaktadır.



Şekil 4.29. Kum aktarma helezonunun deney sistemi içerisindeki yeri.

4.6 Cihaz Kalibrasyonları ve Testleri

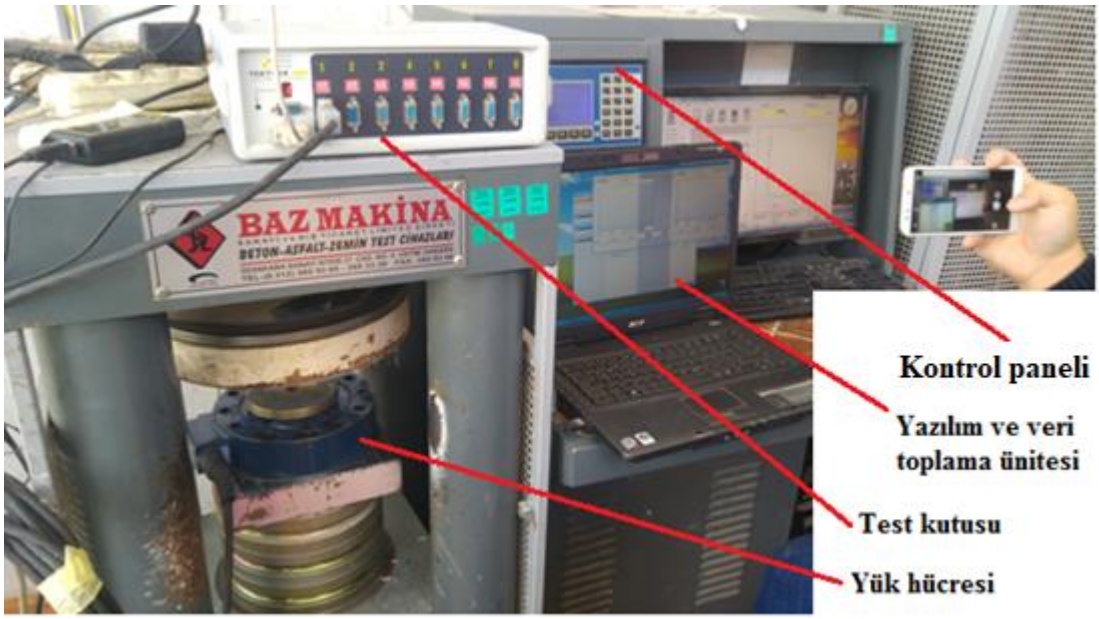
Yapıların güvenliği ve deformasyonlarının detaylı olarak araştırılması oldukça önem taşımaktadır. Bu bakımdan, cihazların gerçek okuma yapabilmeleri diğer bir deyişle hassas ve eylemle eş zamanlı veri toplaması ölçülebilirliğin temel ilkesidir. Bu doktora tezinde yapılan çalışmalarda da kesin değerlerin toplanması için potansiyometrik cetveller, birim deformasyon ölçerler, yük hücresi ve zemin basıncı ölçer kontrol edilmişlerdir. 100 mm ölçüm kapasiteli potansiyometrik cetveller, veri toplama yazılımının içerisinde bulunan modül aracılığı ile cetvel üzerinden kontrol edilerek kalibre edilmişlerdir.

Tüm elemanların üzerlerine etkiyen yükler karşısında uğradıkları şekil değiştirmeler birtakım algılayıcılar vasıtasıyla takip edilmektedir. Bazı durumlarda çok hassas ölçümlere ihtiyaç duyulan sistemlerde ise en ufak değişimleri dahi izleyecek cihazlar kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, birim deformasyon ölçerler sözü edilen amaçlar içerisinde önemli bir şekilde yer almaktadır.

Çalışmada kullanılan 120Ω'luk birim deformasyon ölçerler, boru içerisinden veri aktaracak kablolara lehimlendikten sonra her iki ucundan ölçülerek ±1Ω hassasiyetinde olanlardan seçilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerin temin edildiği firmadan alınan kalibrasyon dosyasına veri toplama ünitesi yazılımından müdahale edilerek çelik ve HDPE boru numuneleri üzerinde yapılan çekme testlerinden edinilmiş uzama ve akma kriterleri doğrultusunda düzeltmeler yapılmıştır.

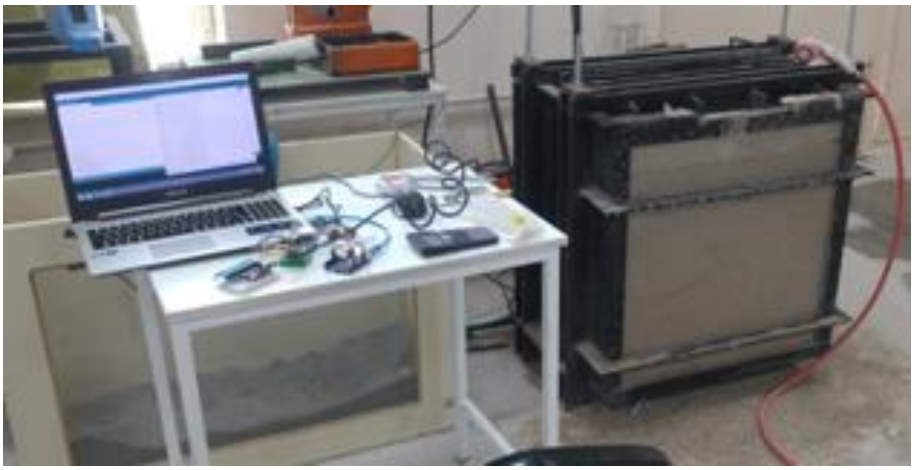
Birim deformasyon ölçer, yüzeyin uzama miktarını ölçerek üzerine bağlandığı materyalin genleşmesi ile ilişkilendirilerek sonuçları almaktadır. Ölçüm işlemi, birim deformasyon ölçerin yapısında oluşan direnç değişimine bağlı olarak hesaplanır, materyalin uzama katsayısına göre hesap edilir. Bu hesap üzerinden de birim deformasyon ölçerler üzerindeki milivolt değişimleri gözlenerek istenilen uzamaya göre veriler elde edilmektedir. Hassas ve doğru ölçüm için birim deformasyon ölçer algılayıcısı bağlanacağı materyale düzgün ve tam yapışık bir biçimde sabitlenmelidir. Bu sabitleme işlemindeki esas, birim deformasyon ölçer ile materyalin yekpare bir malzeme olarak çalışmasıdır. Yapıştırma işlemi öncesinde ise yüzey iyice temizlenmeli ve montaj sonrasında birim deformasyon ölçer kabloları birbirine değmeyecek şekilde kendilerine ait olan kanallara bağlanmalıdır. Sonuç olarak, hassas ve doğru bir ölçüm için cihazlar, prosedüre uygun bir şekilde kalibre edilerek cihazlar arası haberleşme sağlanmalıdır.

500 kN kapasiteli baskı tipi yük hücresinin kalibrasyon işlemleri, Şekil 4.29'da gösterildiği şekilde test edilmek üzere akredite ve altı ayda bir kontrolleri yapılan bir laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Cihaz üzerinde, 500 kN yüke kadar sürekli olarak minimum hızda yükleme yapılarak ve hem veri ünitesindeki voltaj değeri hem de laboratuvardaki sistem üzerinden yük değeri okunmuştur. Daha sonra hassas bir biçimde okunan değerler veri ünitesi sisteminde tek tek kalibrasyon dosyasına girilerek cihaz kullanıma hazır hale getirilmiştir. Daha sonra kontrolleri yapılan yük hücresi deney düzeneğindeki pistona monte edilerek sistem tamamlanmıştır.

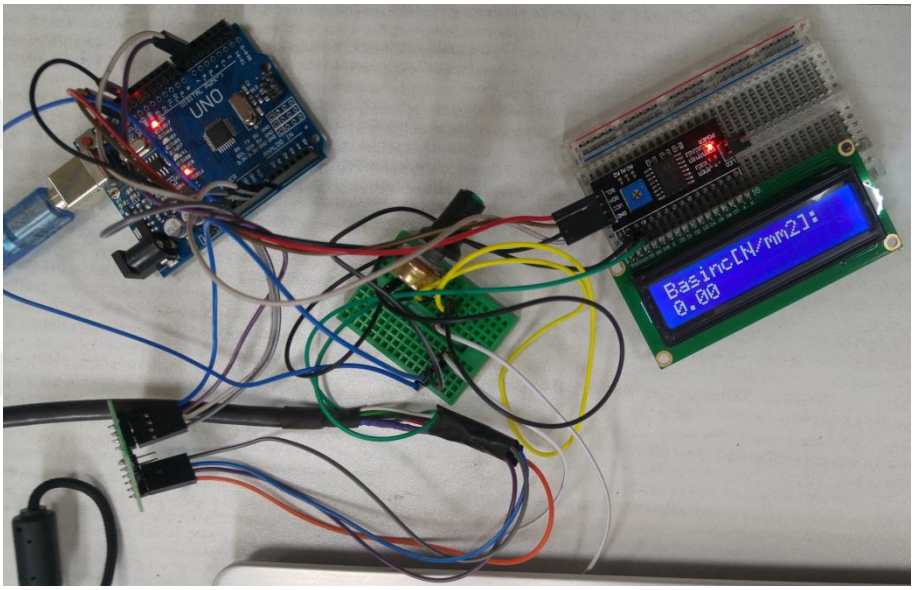


Şekil 4.30. Yük hücresi kalibrasyonu.

Arduino tabanlı basınç ve gerilme ölçme sisteminin sağlıklı ve hassas bir şekilde çalışması için 700 mm genişlik ve yüksekliğinde, 500 mm derinliğinde rijit bir deney kutusu içerisinde laboratuvar deneylerinde kullanılan silis kumu ve Kırşehir Kızılırmak kumu yerleştirilerek mikrokontrolcü Şekil 4.30'daki gibi teste tabi tutulmuştur. Devre düzeneği Şekil 4.31'de gösterilen mikrokontrolücü, kutu tabanına yerleştirilerek geridolgu malzemesi üzerine serilmiştir. Daha sonra sisteme üzerine yük tatbik edilmiştir ve kademeli olarak yük saatindeki değer ile arduino serial portundaki ekranda yer alan okuma değerleri kaydedilmiştir. Uygulanan basınç ile okunan değer arasındaki ilişki ve zemin gerilmeleri üzerinde yapılan hesaplamalarda kalibrasyon faktörü belirlenerek sistemin doğru ölçüm yaptığı kod oluşturulmuştur. Sistem 25 kN'luk yük hücresi kullanılarak oluşturulmuş olup hassasiyet ±0,02 kN olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.31. Zemin basınç ölçer kalibrasyonu.



Şekil 4.32. Mikrokontrolcü devresi ve LCD gösterge.

4.7 Veri Toplama ve Aktarma

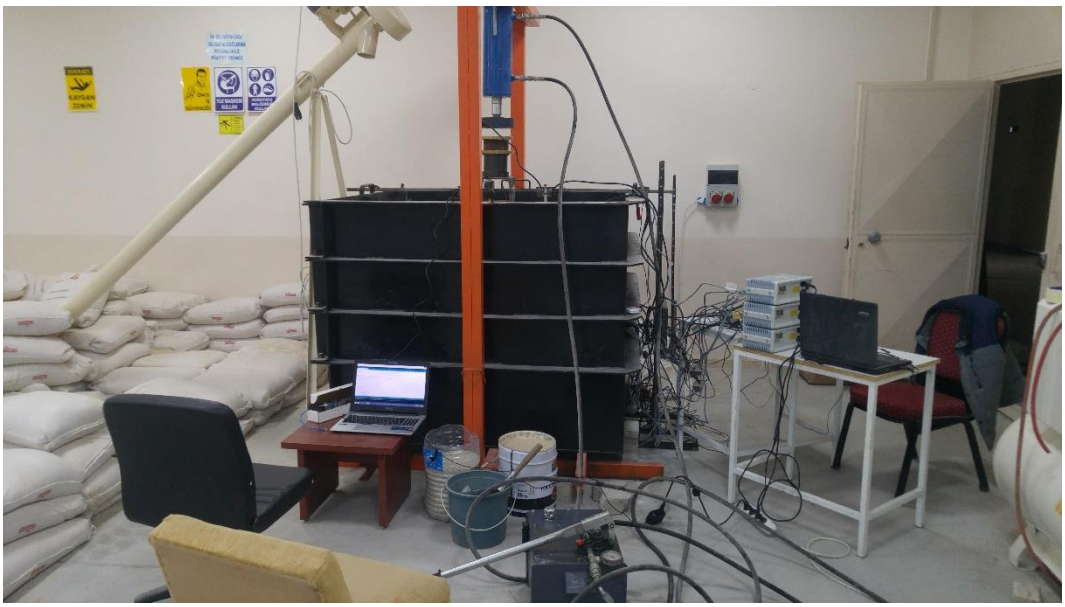
Potansiyometrik cetveller, birim deformasyon ölçerler ve yük hücresinden okunan veriler kablolar yardımıyla veri toplama ünitesine aktarılmaktadır. Deneyler boyunca sekiz kanallı üç istasyonun haberleştiği yazılım, kalibre edilen ölçüm cihazlarının aktardığı verileri saniyede dört veri alacak şekilde kaydetmiştir. Test kutuları ve ünitenin yer aldığı veri toplama sistemi Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Veri toplama ünitesi.

4.8 Nihai Deney Düzeneği

Deneylerin gerçekleştirilme aşamasında, yükleme, deplasman ve birim deformasyon ölçümü bir veri toplama ünitesinden alınırken zemin basınç ölçer verileri başka bir kontrol biriminden alınmıştır. Standartlara uygun ve literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olarak tasarlanan deney sistemi Şekil 4.33'teki gibi gösterilmiştir.



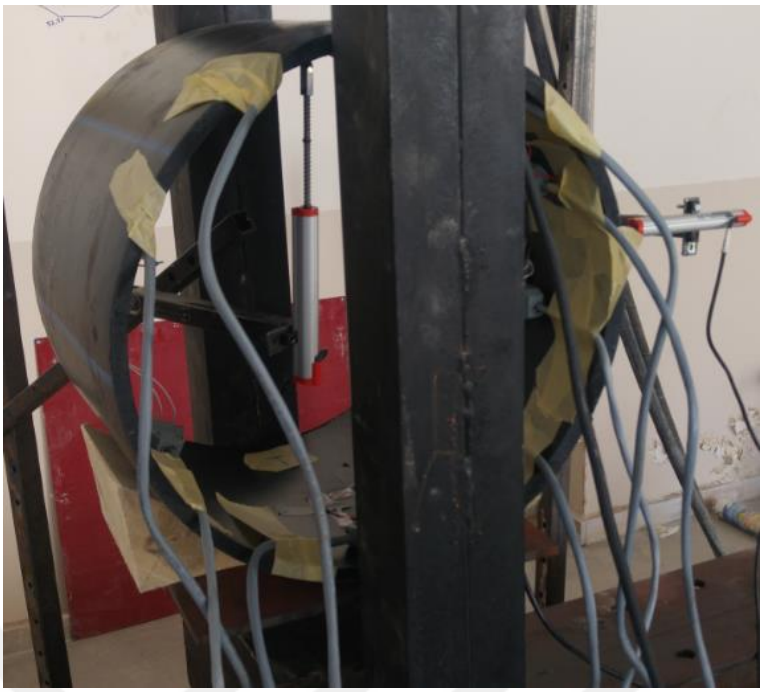
Şekil 4.34. Nihai deney sistemi.

5. LABORATUVAR DENEYLERİ

Bu doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen direkt yükleme deneyleri ve geridolgu ortamında yürütülen laboratuvar deneyleri Aksaray Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı ve Yapı-Malzeme Laboratuvarı'nda sürdürülmüştür. Bu bölümde laboratuvar deneylerinden elde edilmiş sonuçlar tablolandırılarak gösterilmiştir.

5.1 HDPE Boruların Direkt Yükleme Altında ve Geridolgu Ortamlarında Gerçekleştirilen Laboratuvar Deneyleri

Kumlu geridolgu ortamlarına gömülü boru deneylerinden önce potansiyometrik cetveller ve birim deformasyon ölçerlerden alınan okumaların anlamlı bir biçimde değerlendirilebilmesi için ön çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, doğrudan boru üzerine etkitilen yüke karşılık gelen deformasyonlar ve eğilme momentleri üzerinden değerlendirmeler yapılarak yürütülmüş olup aynı zamanda ölçüm sisteminin hassasiyeti ve değerlerin yorumlanması açısından bir kılavuz alınarak sürdürülmüştür. Bölüm 3'te yer alan "Tasarım ve Hesaplama Yöntemleri" ve Bölüm 4.4'te konu alınan "Ölçüm sistemi" kısımlarında literatürün vurguladığı ve cihazların temin edildiği firmaların sunduğu kılavuzların belirttiği sınırlar içerisinde elde edilen sonuçlar, HDPE boru üzerine Şekil 5.1'de gösterilen direkt yükleme deney sonuçları ile eşleşmiş olup ANSYS verileri ile de yakın değerler göstermiştir.



Şekil 5.1. HDPE boru numunesine direkt yükleme deneyi.

Beklenildiği üzere, esnek HDPE boru numunesi geridolgu ortamlarına gömülü olarak bulunmadığı için deformasyon karakteristikleri direkt yükleme deneyleri geridolgu ortamlarındaki deformasyon davranışlarını doğru olarak yansıtmayan sonuçlar gözlemlenmektedir. Farklı çaplara ve et kalınlıklarına sahip HDPE100 boru numunelerinin doğrudan yük altında test edildiği bu deney setinde amaç, potansiyometrik cetvellerin ve birim deformasyon ölçerler için hassas ölçüm yapılabilirliğinin testi, veri ünitesine kayıt ve anlamlı sonuç çıktısı elde edebilme aşamalarının sağlanabilmesidir.

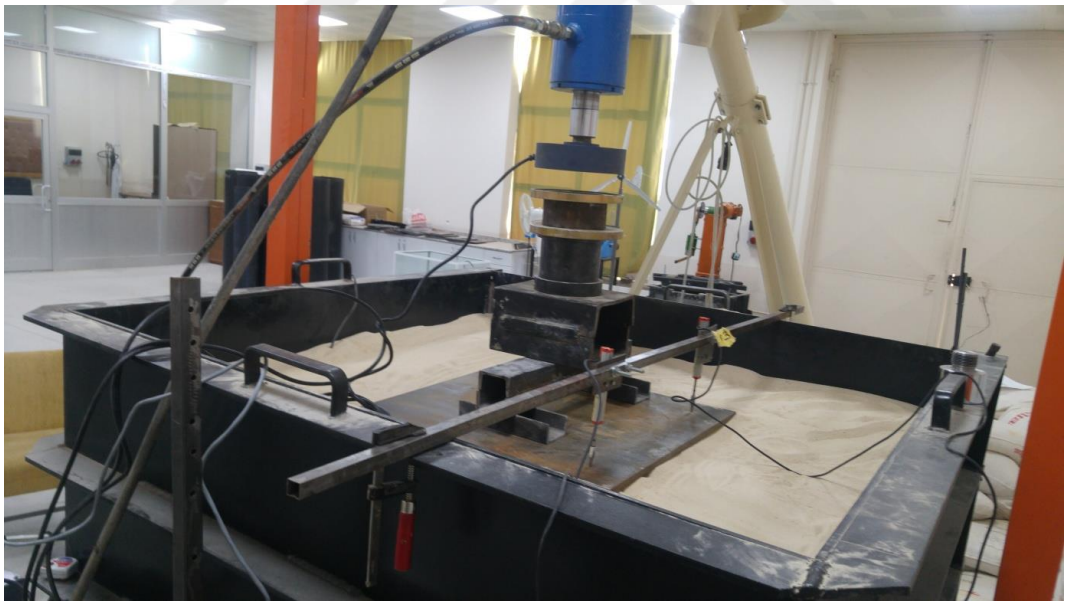
Direkt yükleme altında teste tabi tutulan sonuçlar neticesinde elde edilen veriler, hesaplama yöntemleri ve ANSYS program çıktıları ile karşılaştırılarak doğru modelin oluşturulmasında referans olmuştur. Ayrıca, kullanılan kablo türü, uzunluğu ve sıcaklık değişimlerinin deformasyon davranışına bir etkisi olmadığı ve oluşan farklılıkların çok minimal seviyelerde (0,0003) kaldığından dolayı ihmal edilmiştir. Sonuç olarak, deney sistemi kurulumu ve test prosedürü direkt yükleme deneyleri ile ayarlanarak ilk kalibrasyon işlemleri tamamlanmıştır. Diğer bir yandan, boru taç bölgesinin %5 deformasyonu için gerekli yükün tahkiki yapılarak geridolgu ortamının yüksekliği, boru çap ve et kalınlığı seçilmiştir.

5.2 Kumlu Geridolgu Ortamlarına Gömülü HDPE Boru Deneyleri

Bu kısımda, relatif sıkılık koşullarının, yarım kesitli atık araç lastik takviyesinin ve yerleşim formasyonunun, parçalara ayrılmış atık kauçuk malzemeli yataklamanın ve parçalara ayrılmış kauçuk üstdolgunun gömülü HDPE boru davranışına etkileri ele alınarak deney sistemi anlatılmıştır.

5.2.1 %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamlarına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışlarının incelenmesi

İlk üç seri laboratuvar deneyinde, %45, %60 ve %75 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Diğer koşulların sabit ve sıkılığın değişkenliğinin dikkate alındığı bu deneylerde yataklama tabakası kademeli kesitler ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra, kullanılacak geri dolgu ortamı aynı aşamalar altında 10'ar cm tabakalar halinde serilerek Bölüm 4 "Materyal ve Metot'ta" belirtildiği gibi standartlara ve şartnamelere uygun olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 5.2. Relatif sıkılık koşullarının HDPE gömülü boru deformasyonlarına etkisinin araştırıldığı laboratuvar deneyleri.

Relatif sıkılık etkisinin incelendiği ilk üç testte, kademeli düşey yüke karşılık gelen taç ve bel bölgesi deplasman değerleri, borunun orta kesiti (L/2=750 mm) ve çeyrek mesafedeki kesiti (L/4=375 mm) üzerinde meydana gelen eğilme momentleri

güçlendirmesiz deneylerde %75 relatif sıkılıkta Çizelge 5.1'de, %60 relatif sıkılık için Çizelge 5.2'de ve %45 relatif sıkılık için Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.1. %75 sıkılıkta boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,54	0,011044	0,000336
100	4,32	0,027451	0,000782
150	8,13	0,042874	0,001238
200	12,94	0,056704	0,001666
250	19,47	0,073193	0,002190
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,22	0,008651	0,000247
100	2,56	0,014470	0,000494
150	3,17	0,020206	0,000722
200	4,11	0,025982	0,000866
250	4,49	0,034662	0,001088

TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,000340	0,000013
100	0,000784	0,000032
150	0,002013	0,000081
200	0,003507	0,000143
250	0,004840	0,000188

Çizelge 5.2. %60 sıkılıkta boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,91	0,021673	0,000643
100	6,17	0,031023	0,001175
150	10,72	0,053200	0,001999
200	14,73	0,077730	0,002724
250	21,21	0,091134	0,003458
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,49	0,012643	0,000340
100	2,81	0,033762	0,000855
150	3,61	0,053504	0,001360
200	4,74	0,071453	0,001804
250	5,61	0,087229	0,002773

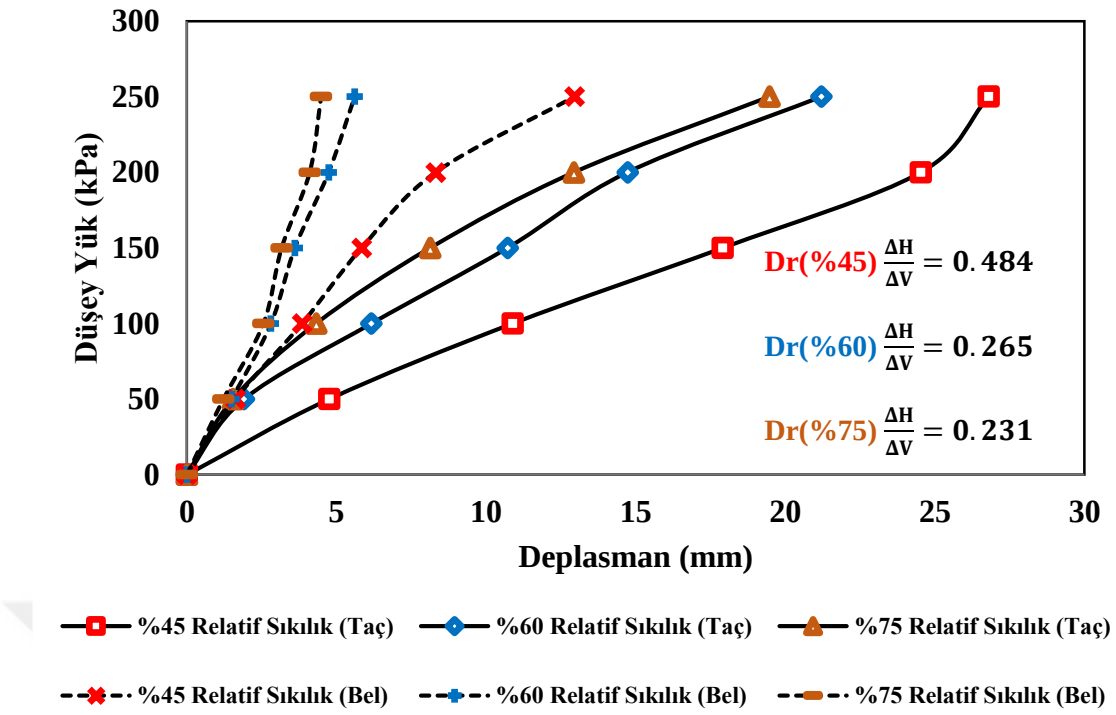
TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,001843	0,000070
100	0,002543	0,000213
150	0,003044	0,000347
200	0,003630	0,000392
250	0,006296	0,000498

Çizelge 5.3. %45 sıkılıkta boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	4,76	0,047391	0,001500
100	10,89	0,058290	0,002163
150	17,91	0,077730	0,002568
200	24,53	0,082717	0,003130
250	26,80	0,094344	0,003795
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,63	0,027072	0,000682
100	3,85	0,038986	0,001526
150	5,84	0,058052	0,002296
200	8,32	0,069408	0,002809
250	12,96	0,091020	0,003711

TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,002826	0,000099
100	0,006542	0,000261
150	0,009200	0,000347
200	0,010524	0,000483
250	0,014053	0,000540

Herhangi bir takviye uygulama bulunmayan ve relatif sıkılık değerlerinin değişken olarak belirlendiği deneylerde meydana gelen yük–taç bölgesi deplasman ve yük–bel bölgesi deplasman grafikleri ile düşey / yatay deplasman oranları sistemin orta kesiti (L/2) için Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Geridolgu malzemesi relatif sıkılık değerlerine göre yük–deplasman grafiği.

Relatif sıkılık değişkenin dikkate alındığı laboratuvar deneylerinde hem taç hem de bel bölgesi için en yüksek deplasman değerleri (L/2 kesiti), en gevşek zemin ortamı olan %45 relatif sıkılık durumunda görülmüştür. Beklenildiği üzere en düşük deplasman değerleri ise taç ve bel bölgeleri için en sıkı zemin ortamı olan %75 relatif sıkılıkta elde edilmiştir.

5.2.2 Boru hattı ortasında atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının incelenmesi

Farklı sıkılık koşullarında boru davranışlarının incelenmesi sürecinde göçme limitlerini zorlayan koşullar için literatürde boru hatları üzerine pek çok takviye ve tabakalandırma işlemleri uygulanarak şekil değiştirmeler en aza indirgenmeye çalışılmıştır.

Bu doktora tezinde de aynı amaç doğrultusunda, bütün haldeki atık araç lastikleri yarım kesitli halde kullanılarak boru hattı üzerine yerleştirilmiştir. Öncelikle, boru çapına uygun bu yarım kesitli atık araç lastikleri sadece en büyük deformasyonların gözlemlendiği boru hattı ortasında kullanılarak deformasyon davranışları göz önünde

tutulmuştur. Yine aynı %45, %60 ve %75 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda boru hattı orta bölümünde incelenen kesitte boru taç ve bel bölgelerindeki deformasyon ve eğilme momentlerinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir.

Bu sayede, sadece göçme potansiyeli bulunan kritik kesitlere yapılacak olan güçlendirmenin davranışa etkisi araştırılmıştır. Relatif sıkılığın değişken olarak belirlendiği ikinci grup üçlü testte, kademeli yüke karşılık gelen taç ve bel bölgesi deplasman değerleri, borunun orta kesiti (L/2=750 mm) ve çeyrek mesafedeki kesiti (L/4=375 mm) üzerinde meydana gelen eğilme momentleri boru hattı ortasında (600 mm'lik bölge) yarım kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak uygulandığı deneylerde %75 relatif sıkılık için Çizelge 5.4'te, %60 relatif sıkılık için Çizelge 5.5'te ve %45 relatif sıkılık için ise Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.4. %75 sıkılıkta boru hattının sadece ortasında atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,03	0,005909	0,000446
100	3,48	0,011357	0,000949
150	5,15	0,016921	0,001548
200	7,62	0,032293	0,002105
250	10,01	0,038284	0,002238
BEL	**L/2**	**L/4**	
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,39	0,003706	0,000183
100	0,87	0,007573	0,000493
150	1,33	0,012937	0,000894
200	1,64	0,022232	0,001523
250	2,19	0,029440	0,001893

TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,000860	0,000040
100	0,004348	0,000088
150	0,007687	0,000195
200	0,011357	0,000307
250	0,013183	0,000456

Çizelge 5.5. %60 sıkılıkta boru hattının sadece ortasında atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,30	0,006750	0,000555
100	4,08	0,011357	0,000949
150	6,44	0,019126	0,001686
200	8,93	0,032634	0,002312
250	11,37	0,040219	0,002363
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,37	0,004585	0,000185
100	1,11	0,010846	0,000385
150	1,88	0,018246	0,000749
200	2,53	0,022800	0,000847
250	2,86	0,032170	0,001258

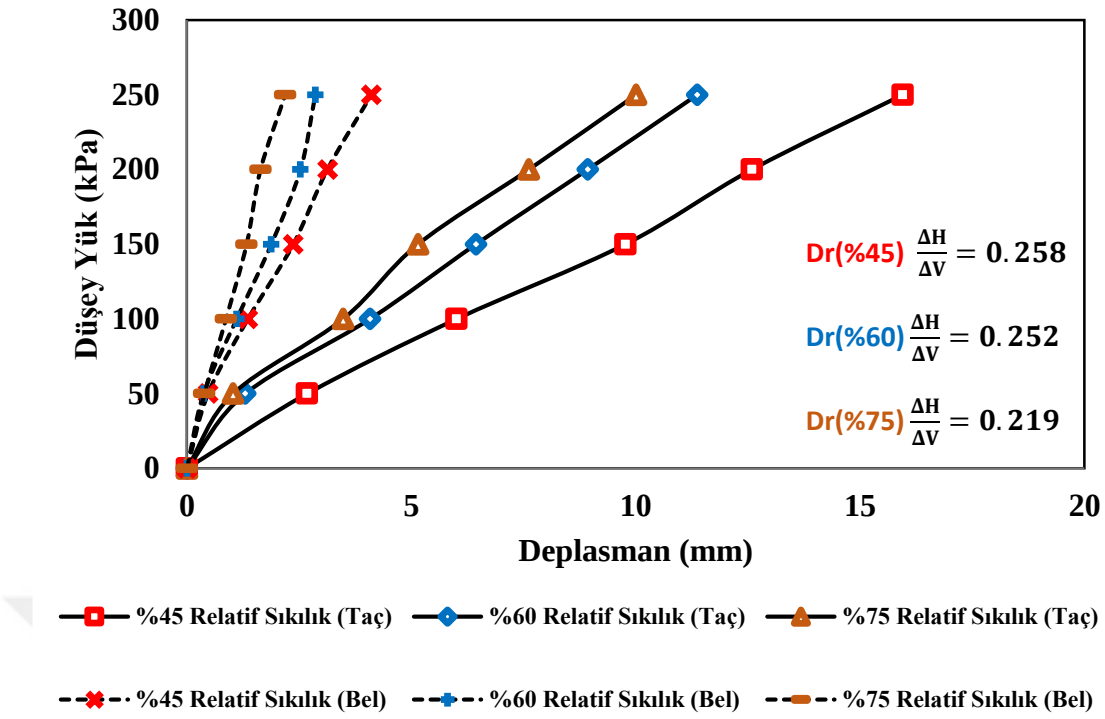
TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,000907	0,000046
100	0,003394	0,000164
150	0,007025	0,000322
200	0,010146	0,000530
250	0,001426	0,000697

Çizelge 5.6. %45 sıkılıkta boru hattının sadece ortasında atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	L/2		L/4
Düşey Yük	Taç Bölgesi Deformasyonu	Eğilme Momenti	Eğilme Momenti
(kPa)	(mm)	(kNm/m)	(kNm/m)
0	0,00	0,000000	0,000000
50	2,68	0,006769	0,000433
100	6,01	0,015217	0,001160
150	9,77	0,025083	0,001893
200	12,59	0,032425	0,002818
250	15,95	0,040702	0,003617
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,47	0,007601	0,000655
100	1,36	0,018076	0,001568
150	2,37	0,028228	0,002534
200	3,13	0,035639	0,003451
250	4,11	0,044165	0,003621

TABAN	L/2	L/4
Düşey Yük	Eğilme Momenti	Eğilme Momenti
(kPa)	(kNm/m)	(kNm/m)
0	0,000000	0,000000
50	0,002259	0,000020
100	0,003895	0,000047
150	0,008415	0,000165
200	0,012483	0,000274
250	0,001881	0,000441

Boru hattı ortasında yarım kesitli atık araç lastiklerinin güçlendirme olarak uygulandığı ve farklı relatif sıkılık koşulları altında gömülü esnek boru davranışlarının belirlendiği deneylerde meydana gelen yük–taç bölgesi deplasman ve yük–bel bölgesi deplasman grafikleri ile düşey / yatay deplasman oranları sistemin orta kesiti (L/2) için Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Boru hattı ortası kısmi lastik uygulamasında relatif sıkılık değerlerine göre yük–deplasman grafiği.

Sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyesi kullanılan laboratuvar deneylerinde hem taç hem de bölgesi için en yüksek deplasman değerleri (L/2 kesiti), %45 relatif sıkılıktaki en gevşek zemin ortamında elde edilmiştir. Beklenildiği üzere en düşük deplasman değerleri ise en sıkı zemin ortamı olan %75 relatif sıkılık durumunda görülmüştür. Ayrıca boru hattı ortasında takviye bulunan deneylerde (L/2 kesiti için), takviye bulunmayan deneylere göre tüm sıkılık koşullarında, hem taç hem de bel bölgeleri için daha düşük deplasman değerleri elde edilmiştir.

5.2.3 Boru hattı boyunca atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının incelenmesi

Yarım kesitli atık araç lastiklerinin boru hattı orta bölümünde (BHO) yer aldığı deneylerde incelenen güçlendirme etkisi, bu aşamada tüm boru hattı üzerinde incelenmiştir. Beklenildiği üzere, sadece boru hattı orta bölümünde değil tüm hat üzerinde bütün bölgeler için hem deformasyon hem de eğilme momentleri açısından belirgin azalmalar gözlemlenmiştir.

Yarım kesitli atık araç lastiklerinin etkinliğinin gözle görülür biçimde efektif olarak kullanımının ardından lastiklerin pek çok alanda parçalanarak kullanımı da göz önünde bulundurulmuştur. Deney düzeneği bir sonraki aşamada, geri kazanım fabrikalarında kord bezi ve metal parçalarından ayrılmış haldeki kauçuk parçalı malzeme ile de teste tabi tutularak da Bölüm 5.3 ve Bölüm 5.4'te ele alındığı gibi gerçekleştirilmiştir.

Yarım kesitli atıl haldeki atık araç lastikleri boru hattı ortasında ve boru hattı boyunca (BHB) gömülü esnek borular üzerinde takviye olarak kullanılmıştır. Yarım kesitli atık araç lastiklerinin konuşlanma biçimi, formasyonu ve ayrıntılı içerikleri ise Bölüm 4.1'de yer almaktadır.

Relatif sıkılığın değişken olarak belirlendiği üçüncü grup üçlü testte, kademeli yüke karşılık gelen taç ve bel bölgesi deplasman değerleri, borunun orta kesiti (L/2=750 mm) ve çeyrek mesafedeki kesiti (L/4=375 mm) üzerinde meydana gelen eğilme momentleri boru hattının sathı boyunca yarım kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak uygulandığı deneylerde %75 relatif sıkılık için Çizelge 5.7’de, %60 relatif sıkılık için Çizelge 5.8’de ve %45 relatif sıkılık için Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.7. %75 sıkılıkta boru hattı boyunca atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,44	0,003876	0,000491
100	2,17	0,010836	0,001012
150	4,56	0,017205	0,001293
200	7,06	0,031591	0,001745
250	9,65	0,037639	0,001993
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,25	0,002344	0,000061
100	0,76	0,006552	0,000200
150	1,21	0,014886	0,000536
200	1,44	0,023179	0,000764
250	1,91	0,031193	0,000989

TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,000662	0,000035
100	0,002458	0,000124
150	0,005190	0,000207
200	0,009607	0,000392
250	0,011489	0,000482

Çizelge 5.8. %60 sıkılıkta boru hattı boyunca atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0	0,000000	0,000000
50	1,85	0,009559	0,000370
100	4,28	0,013542	0,000491
150	6,33	0,024675	0,000898
200	8,12	0,022118	0,001211
250	10,89	0,040826	0,001709
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,34	0,006381	0,000134
100	0,93	0,009654	0,000464
150	1,54	0,017441	0,000765
200	1,99	0,025622	0,001007
250	2,43	0,035383	0,001335

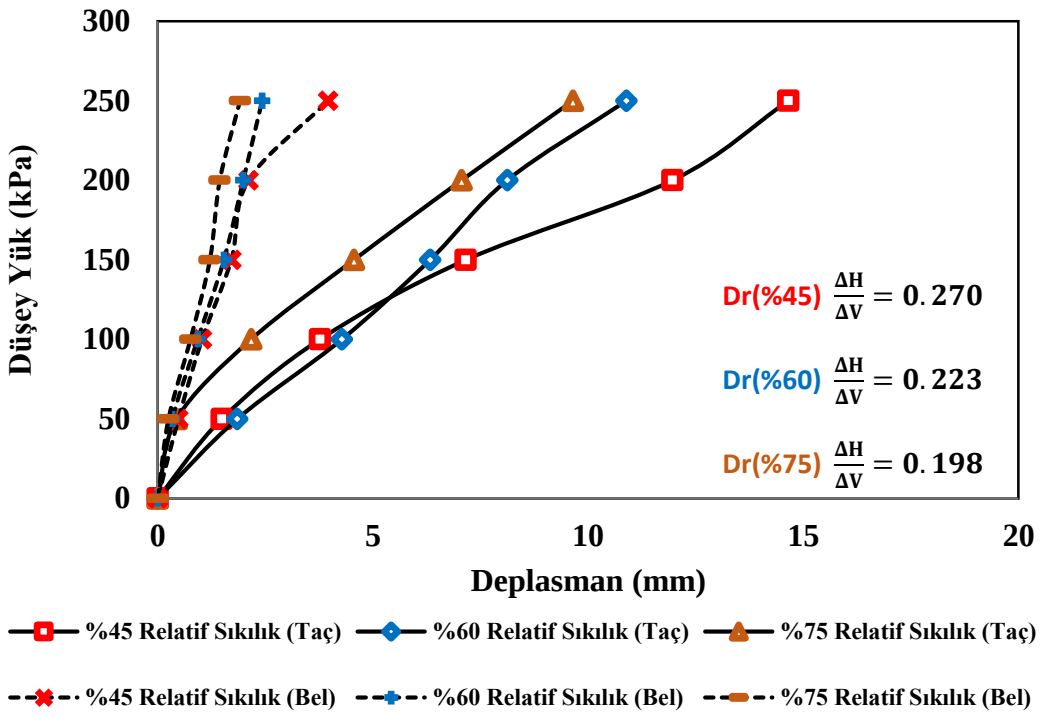
TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,000189	0,000008
100	0,002287	0,000055
150	0,004093	0,000128
200	0,005606	0,000304
250	0,008888	0,000439

Çizelge 5.9. %45 sıkılıkta boru hattı boyunca atık araç lastiği uygulamalı boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	1,49	0,007185	0,000870
100	3,77	0,016249	0,001439
150	7,16	0,027801	0,002368
200	11,96	0,033866	0,003158
250	14,65	0,041072	0,003309
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,00	0,000000	0,000000
50	0,48	0,007800	0,000533
100	1,03	0,017441	0,001296
150	1,71	0,026816	0,002145
200	2,11	0,034018	0,002777
250	3,96	0,039811	0,003242

TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,001229	0,000028
100	0,003015	0,000072
150	0,005190	0,000207
200	0,008538	0,000299
250	0,011830	0,000434

Boru hattının tüm kesitinde yarım kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak uygulandığı ve farklı relatif sıkılık koşulları altında gömülü esnek boru davranışlarının belirlendiği deneylerde meydana gelen yük–taç bölgesi deplasman ve yük–bel bölgesi deplasman grafikleri ve düşey / yatay deplasman oranları sistemin orta kesiti (L/2) için Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Boru hattı boyunca yapılan atık araç lastik uygulamasında relatif sıkılık değerlerine göre yük–deplasman grafiği.

Boru hattı boyunca atık araç lastik takviyesi kullanılan laboratuvar deneylerinde en yüksek deplasman değerleri (L/2 kesiti), hem taç hem de bel bölgeleri için en gevşek zemin ortamı olan %45 relatif sıkılık durumunda görülmüştür. Beklenildiği üzere en düşük deplasman değerleri ise en sıkı zemin durumu olan %75 relatif sıkılıkta elde edilmiştir. Ayrıca boru hattı boyunca takviye kullanılan laboratuvar deneylerinde, takviye kullanılmayan deneylere göre tüm sıkılık koşulları için hem taç hem de bel bölgesinde daha düşük deplasman değerleri görülmüştür. Diğer bir yandan L/2 kesiti için boru hattı orta noktasında her iki takviye uygulaması (BHO ve BHB) için de yaklaşık deplasman değerleri gözlemlenmiştir.

5.3 Kumlu Yataklama Ortamında ve Kauçuk Üstdolgu Ortamına Yerleştirilmiş HDPE Gömülü Borunun Deformasyon Davranışının İncelenmesi

Yükü ve darbeyi sönümleme kabiliyetinden dolayı pek çok alanda kullanılan kauçuk ve türevi materyaller esnekliği, hafifliği ve geri kazandırılabilmesi nedeni ile tercih edilmektedir. Ancak nispeten düşük elastisite modülü ve kompaksiyon edilememesi bu malzemenin noksan taraflarıdır. Düşey yüklemeler altında aşırı deformasyonlar ve

beklenmedik oturmalar gösterebilirler. Bu bakımdan, üstdolguda kullanımı denenen kauçuk materyalin meydana getirdiği aşırı oturmalar uygulama açısından özellikle bağlantı noktaları için sakıncalar doğurabilmektedir. Dolayısıyla uygulayıcılar, dolgu kalınlığına dikkat etmelidirler.

Yürütülen deneylerde, %75 relatif sıkılık koşulları ve 236,69 kN/m^2 gerilme altında zemin yüzeyinde gözlemlenen ortalama oturma değeri 185,6 mm iken yük boşaldıktan sonra zemin yüzeyi üzerinde gözlemlenen kalıcı deformasyon değeri 15,6 mm olarak saptanmıştır. Sistem görünümü Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Parçalanmış atık araç lastiklerinin üstdolgu olarak kullanıldığı deneyde zemin yüzeyinde meydana gelen oturma ve kabarmalar.

Kauçuk üstdolgunun düşey yük altındaki geridolgu ortamına gömülü esnek boru üzerinde oluşturduğu deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 5.10'da

verilmiştir. Sonuç olarak, yüksek bulunan zemin yüzey oturma değerlerinden dolayı parçalanmış atık araç lastiklerin bir de yataklama tabakasında göstereceği etkinliğin araştırılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 5.10. Kauçuk üstdolgulu deney sisteminde güçlendirmesiz boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

TAÇ	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Taç Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0	0,000000	0,000000
50	56,71	0,003223	0,000075
100	78,65	0,009380	0,000269
137,5	100	0,016590	0,000508
200	-	0,023075	0,000741
250	-	0,032056	0,001054
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	**Bel Bölgesi Deformasyonu**	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(mm)**	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0	0,000000	0,000000
50	49,51	0,005502	0,000130
100	88,2	0,020338	0,000493
137,5	100	0,038910	0,000828
200	-	-	-
250	-	-	-

TABAN	**L/2**	**L/4**
Düşey Yük	**Eğilme Momenti**	**Eğilme Momenti**
(kPa)	**(kNm/m)**	**(kNm/m)**
0	0,000000	0,000000
50	0,000652	0,000022
100	0,001843	0,000050
150	0,002940	0,000086
200	-	0,000175
250	-	0,000306

5.4 Kauçuk Yataklama Ortamında Kumlu Geridolgu Ortamına Yerleştirilmiş HDPE Gömülü Borunun Deformasyon Davranışının İncelenmesi

Laboratuvar deneyleri kapsamında parçalanmış atık araç lastiklerinin yer aldığı diğer bir deney durumu kauçuk materyalin yataklama malzemesi olarak kullanımıdır. %75 relatif sıkılık koşullarında düşey yüke tabi tutulan atık araç lastik parçalarının yatak malzemesi olarak kullanıldığı bu deneyde ise borunun başta taç bölgesinde olmak üzere tüm kısımlarında aşırı şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir. Hem borunun hem de borunun konuşlandırıldığı bölgenin esnek olması sebebiyle meydana gelen aşırı oturmalar ve sistemin yüksek deformasyon potansiyeli boru hattının servis kabiliyetini tehdit etmektedir. Bu bakımdan esnek borular için rijit yataklama tabakasının önemi ortaya çıkmaktadır. Böylece, yataklama malzemesinin maksimum sıkılıkta serilmesinin doğruluğu literatürün ışığında yürütülen laboratuvar deneylerince doğrulanmıştır.



Şekil 5.7. Parçalanmış atık araç lastiklerinin yatak malzemesi olarak kullanıldığı deneyde zemin yüzeyinde meydana gelen aşırı oturma.

Kauçuk yataklamanın düşey yük altındaki geridolgu ortamına gömülü esnek boru üzerinde oluşturduğu deplasman ve eğilme momenti değerleri Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Kauçuk yataklamalı deney sisteminde güçlendirmesiz boru kesitindeki deplasman ve eğilme momenti değerleri.

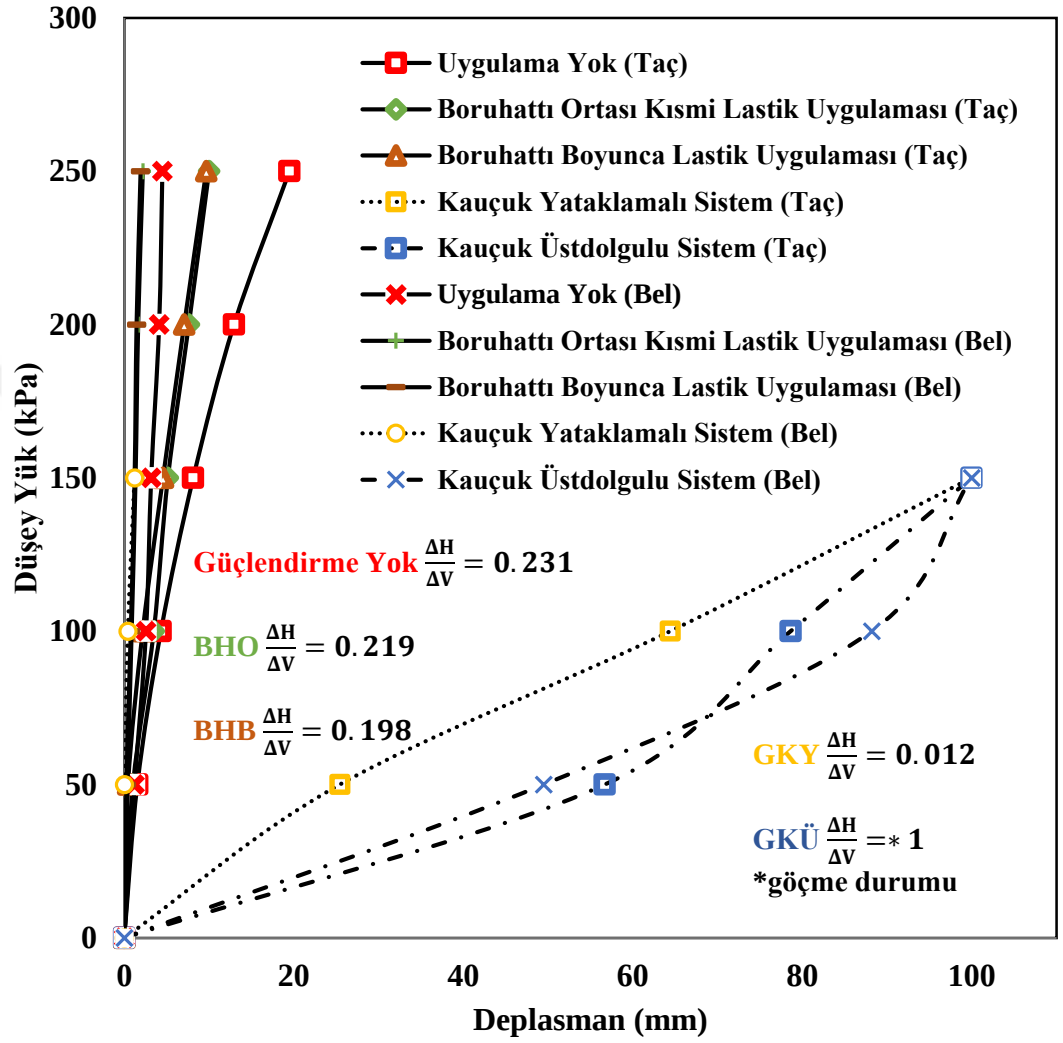
TAÇ	L/2		L/4
Düşey Yük	Taç Bölgesi Deformasyonu	Eğilme Momenti	Eğilme Momenti
(kPa)	(mm)	(kNm/m)	(kNm/m)
0	0	0,000000	0,000000
50	25,44	0,006750	0,000555
100	64,45	0,011357	0,000949
137,5	100	0,019126	0,001686
200	-	0,032634	0,002312
250	-	0,040219	0,002363
BEL	**L/2**		**L/4**
Düşey Yük	Bel Bölgesi Deformasyonu	Eğilme Momenti	Eğilme Momenti
(kPa)	(mm)	(kNm/m)	(kNm/m)
0	0	0,000000	0,000000
50	0,02	0,001550	0,000055
100	0,42	0,003592	0,000092
137,5	1,21	0,008150	0,000222
200	-	0,009786	0,000265
250	-	0,009786	0,000265

TABAN	L/2	L/4
Düşey Yük	Eğilme Momenti	Eğilme Momenti
(kPa)	(kNm/m)	(kNm/m)
0	0,000000	0,000000
50	0,000652	0,000022
100	0,001843	0,000050
150	0,002940	0,000086
200	0,005682	0,000175
250	0,009853	0,000306

5.5 Relatif Sıkılık Değerlerine Göre Tüm Uygulamaların Karşılaştırılması

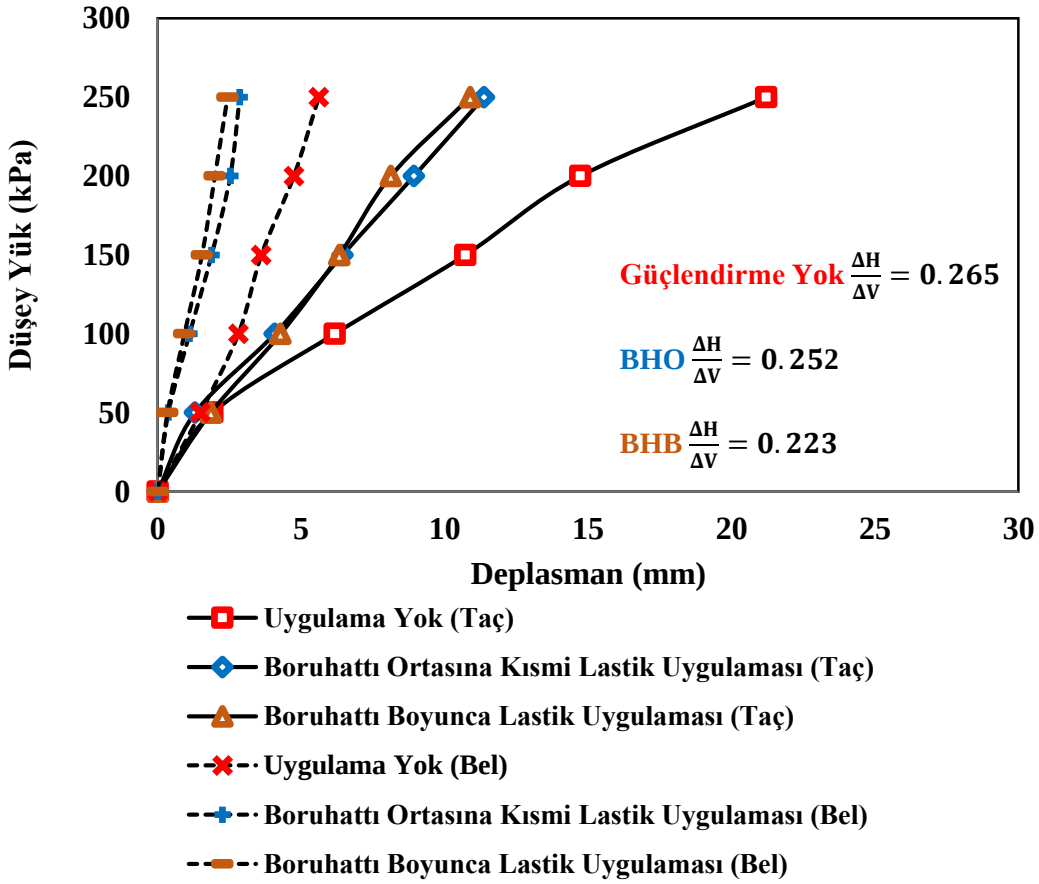
Bu bölümde %75, %60 ve %45 relatif sıkılık değerleri için boru hattı ortası ve boru hattının tamamında uygulanan yarım kesitli atık araç lastiklerinin deplasman davranışına olan etkisi incelenmiştir. %75 relatif sıkılıkta yürütülen deneylerin yük – deplasman grafiği Şekil 5.8'de %60 relatif sıkılıkta gerçekleştirilen deneylerin yük – deplasman grafiği Şekil 5.9'da ve %45 relatif sıkılıkta yapılan deneylerin yük –

deplasman grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir. Kauçuk yataklamalı ve kauçuk üstdolgu deney sistemleri arazi uygulamalarında sadece en sıkı halde yerleştirilmesinden ötürü sadece %75 relatif sıkılık koşullarında incelenmişlerdir.



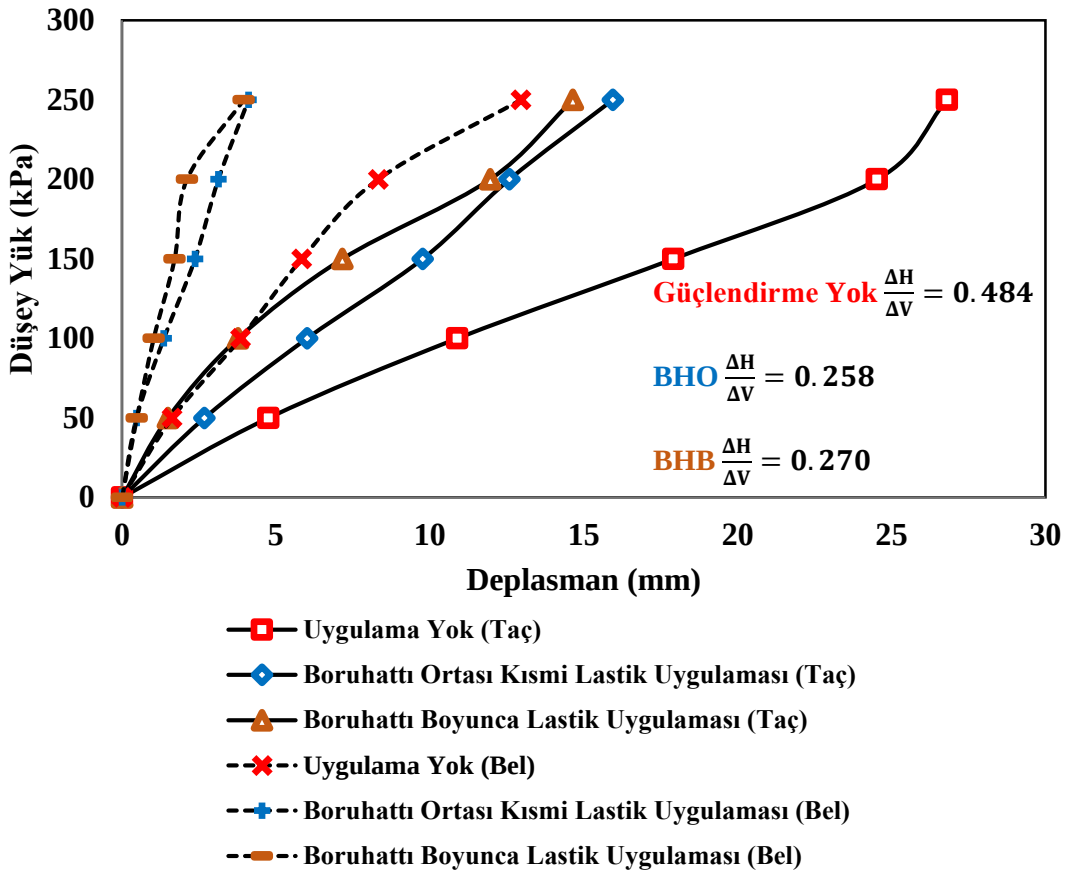
Şekil 5.8. %75 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük–deplasman grafiği.

%75 relatif sıkılık durumunda, Şekil 5.8'de görüldüğü üzere en yüksek deplasman değerleri granül kauçuk malzemesinin yataklama ve üstdolgu olarak kullanıldığı değerlerde görülmüştür. Herhangi bir takviye uygulanmayan deneylerde dahi hem taç hem de bel bölgesindeki deplasmanlar, kauçuk yataklama tabakası ve kauçuk üstdolgu bulunan deneylere göre daha düşük değerlerdedir.



Şekil 5.9. %60 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük–deplasman grafiği.

%60 relatif sıkılık durumunda L/2 kesiti için boru hattı orta noktası ve boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeleri uygulanan laboratuvar deneylerinde, takviye kullanılmayan deneylere göre hem taç hem de bel bölgesi için daha düşük deplasman değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.10. %45 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük–deplasman grafiği.

%45 relatif sıkılık durumunda da L/2 kesiti için boru hattı orta noktası ve boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeleri uygulanan laboratuvar deneylerinde, takviye kullanılmayan deneylere göre hem taç hem de bel bölgesi için daha düşük deplasman değerleri elde edilmiştir.

Deneylerden elde edilen veriler ışığında, parçalanmış atık araç lastiklerinin yataklama veya üstdolgu malzemesi olarak kullanımının uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Yarım kesitli atıl araç lastiklerinin boru hat düzlemini bütünleşik halde tutabilmesi hem de gömülü esnek borunun deformasyon değerlerini kısmi bir kemerlenme etkisi oluşturarak azaltması karşısında lastik parçaları ve kauçuk granüllerin etkinliği çok zayıf kaldığı anlaşılmıştır.

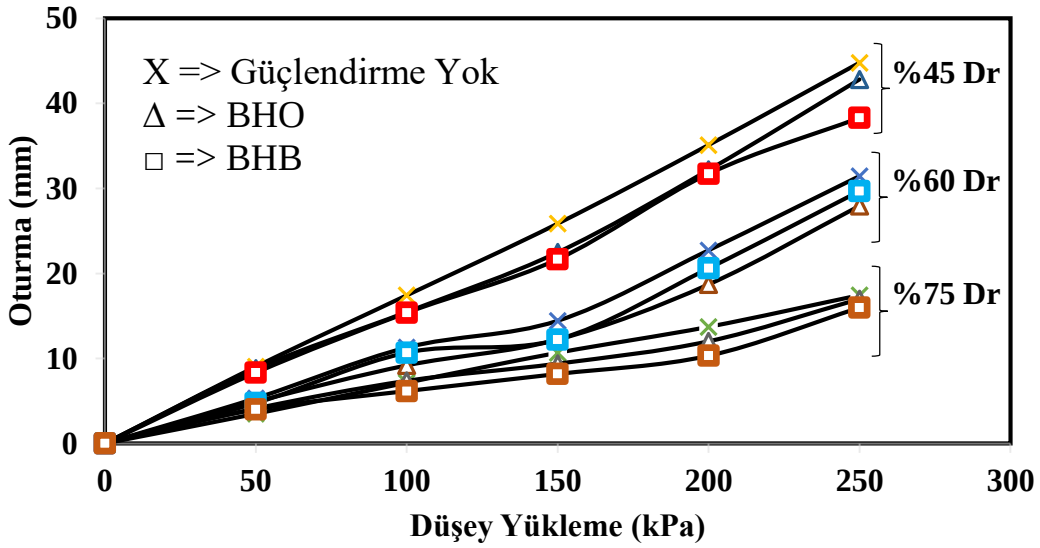
Bu değerlendirmelerden yola çıkarak, deformasyonların kontrol altında tutulması ile beraber parçalama maliyetlerinin bulunmaması, parçalama esnasında açığa çıkan gaz ve koku etmenlerinin ortadan kaldırılması açısından, kısaca uzun servis ömrü, maliyet,

çevre ve sağlık bakımından yarım kesitli atık araç lastiklerinin gömülü esnek boru hatları üzerinde kullanımı pek çok avantajı beraberinde getirmektedir.

Bu bölümde yer alan kapsamlı laboratuvar deneylerinin ANSYS programında yapılan sonlu elemanlar analiz adımları ve sonuçları Bölüm 6'da verilmiştir.

5.6 Düşey Yükleme Altında %75, %60 ve %45 Relatif Sıkılık Koşullarında Oturma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, takviye olarak kullanılan yarım kesitli atık araç lastiklerinin boru taç ve bel bölgelerindeki deplasman değerlerini ciddi ölçüde azalttığı yukarıda sunulan çizelgeler ve grafiklerde açıkça gözlemlenmektedir. Ancak, yapılan yarım kesitli araç lastiklerinin silis kumlu geridolgu ortam yüzeyinden ölçülen oturma değerlerinin azalmasına herhangi bir katkısı olmadığı belirlenmiştir. Silis kumu geridolgulu ve yataklamalı tüm deneylerde meydana gelen oturma değerleri Şekil 5.11'de verilmiştir.

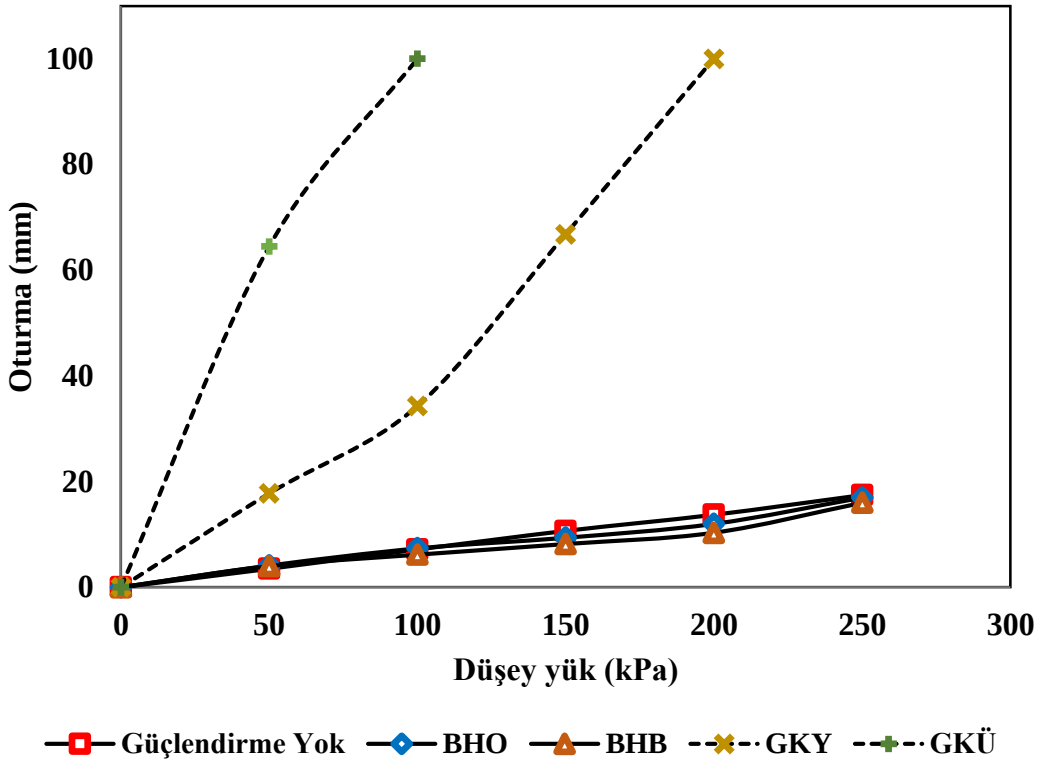


Şekil 5.11. %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen oturma–düşey yük grafiği.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında yürütülen aynı türde geridolgulu ve yataklamalı deney sistemlerinde, oturma karakteristiklerini beklenildiği üzere sadece relatif sıkılık değerleri vermektedir.

5.7 Düşey Yükleme Altında Kauçuk Üstdolgulu ve Kauçuk Yataklamalı Deneylerde Oturma Karakteristiklerinin İncelenmesi

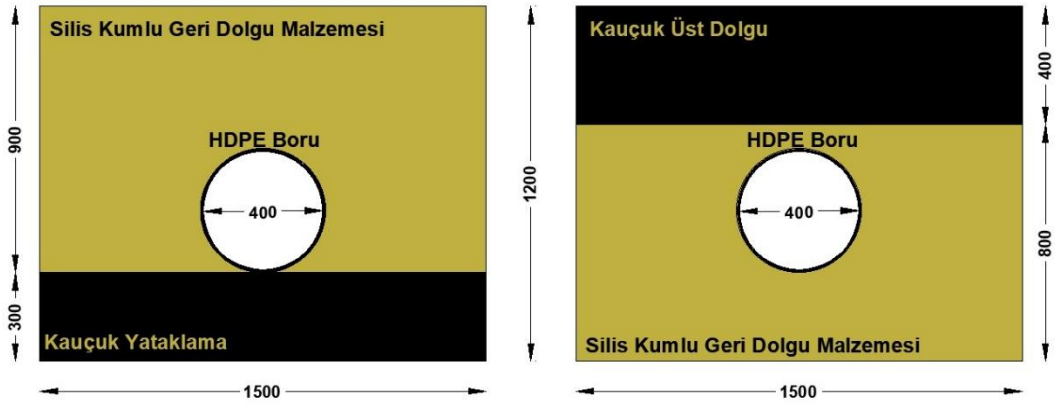
Kauçuk üstdolgulu ve kauçuk yataklamalı deney sistemlerinde meydana gelen oturma değerleri %75 relatif sıkılık koşullarında yürütülen tüm deneyler ile karşılaştırılarak Şekil 5.12'de sunulmuştur.



Şekil 5.12. %75 relatif sıkılık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen oturma–düşey yük grafiği.

Şekil 5.12'de görüldüğü üzere düşey yük etkisinde en çok oturmanın meydana geldiği deneyler kauçuk granül içeren yataklama tabakası ve üstdolgunun bulunduğu deneylerdir. %75 relatif sıkılık durumu için herhangi bir takviyenin bulunmadığı laboratuvar deneyinde, nihai düşey yüklemenin çok altında bir değer olan yaklaşık 100 kPa yüklemede dahi, granül kauçuk yataklama tabakası (GKY) bulunan deneye oranla yaklaşık 7 kat; granül kauçuk üstdolgu (GKÜ) bulunan deneye oranla yaklaşık 15 kat daha düşük oturma değerleri görülmüştür.

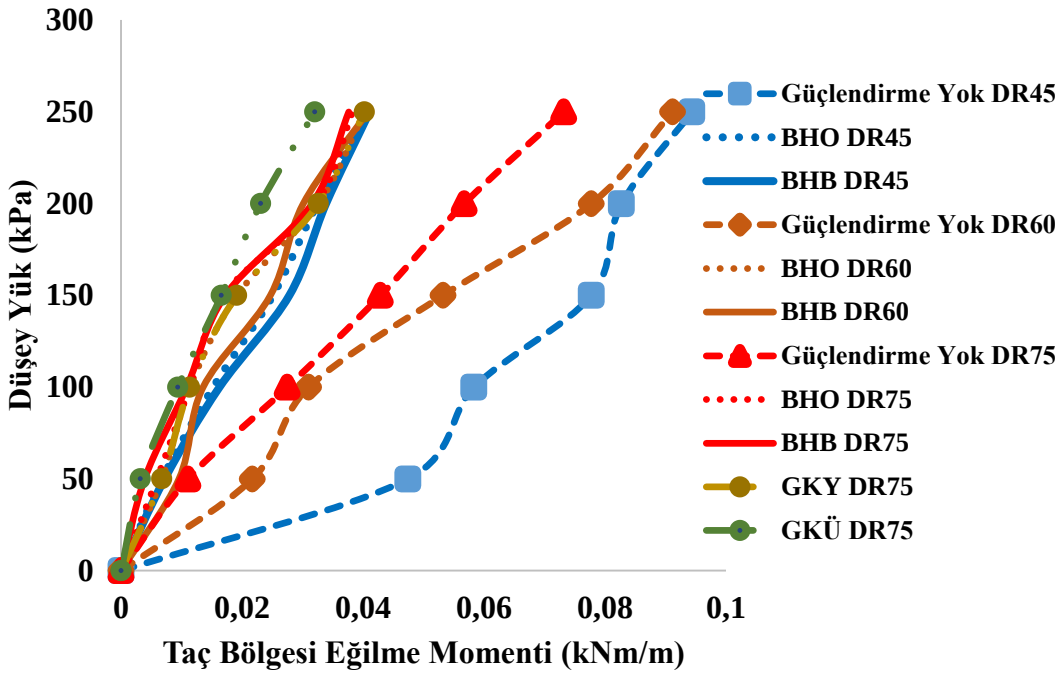
Atık araç lastiklerinden parçalanarak granül haline getirilen kauçuk malzemenin deney kutusu içerisindeki yerleşimi ise Şekil 5.13'te verilirmiştir.



Şekil 5.13. Granül kauçuk tabakaların deney kutusu içerisinde yerleşim mesafeleri.

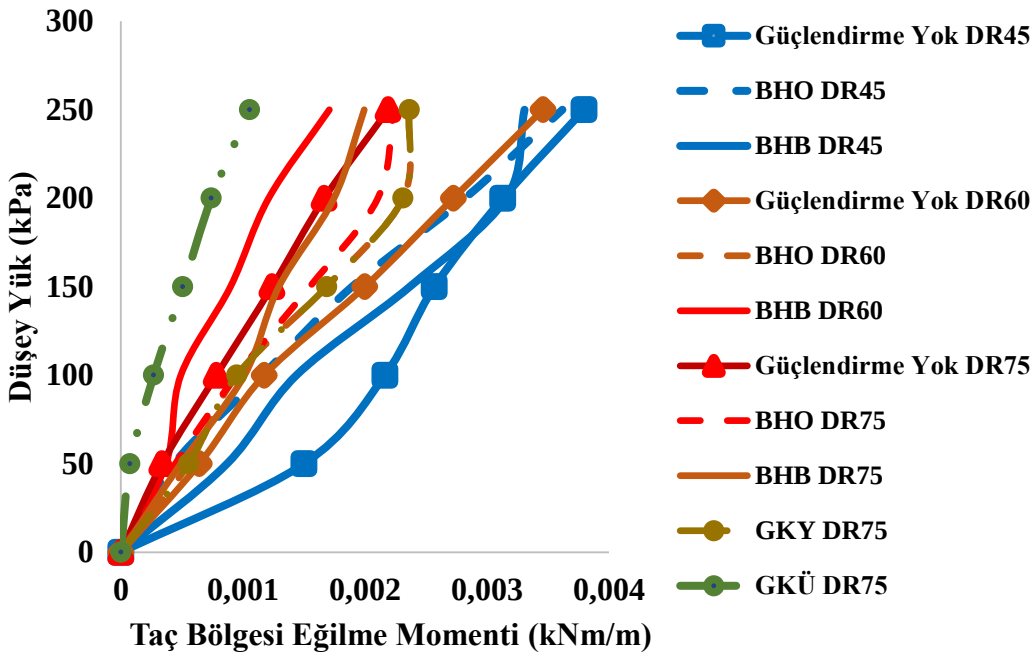
5.8 Düşey Yükleme Altında Eğilme Momenti Verilerinin İncelenmesi

Bu bölümde, tüm laboratuvar deneylerinden elde edilen birim şekil değiştirmelere karşılık gelen eğilme momenti verileri grafikler üzerinden değerlendirilmiştir. Taç bölgesi için L/2 kesitinde düşey yük-eğilme momenti grafiği Şekil 5.14'te, L/4 kesiti için ise düşey yük-eğilme momenti grafiği Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.14. L/2 kesitinin düşey yük-taç bölgesi eğilme momenti grafiği.

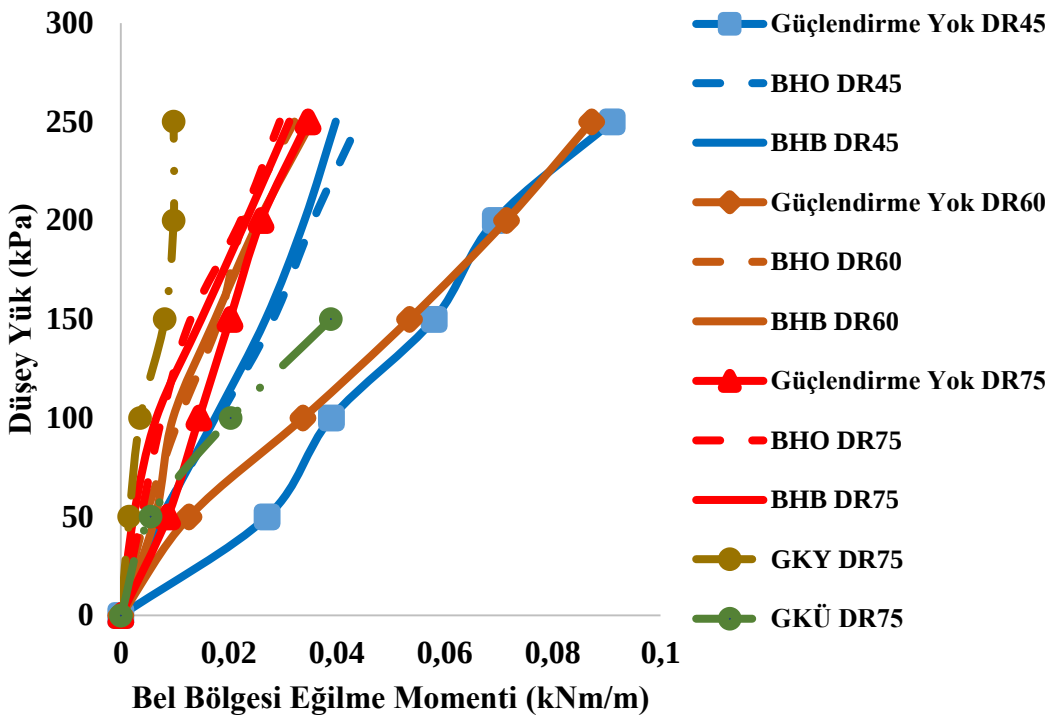
Düşey yükleme altında L/2 kesitinin taç bölgesi için en yüksek eğilme momenti değerleri tüm laboratuvar deneyleri arasından herhangi bir takviye uygulanmayan deney gruplarında görülmüştür. Aynı zamanda, relatif sıkılık durumu bakımından düşey yük-eğilme momenti grafiği incelendiğinde, en yüksek eğilme momenti değerleri en gevşek durum olan %45 relatif sıkılıkta, en düşük eğilme momenti değerleri ise en sıkı durum olan %75 relatif sıkılık durumunda görülmüştür. Diğer bir yandan en yüksek deplasmanların görüldüğü granül kauçuk malzemeden oluşturulmuş yataklama tabakası ve üstdolgu bulunan deneylerin düşük eğilme momentleri göstermesinin sebebi, boru hattının bütünüyle düşey yönde hareketidir. Granül kauçuk yataklı deneyde, boru tamamı ile granül kauçuk tabaksının içerisine gömülerek küçük ölçekli gerilmelere maruz kalmış olup minimal düzeyde şekil değiştirerek düşey yönlü hareket etmiştir. Granül kauçuk üstdolgulu deneyde ise düşey yönlü hareketin büyük bölümünü kauçuk üstdolgu tabakası karşılamış olup bu deneyde de boru minimal düzeyde şekil değiştirerek düşey yönlü hareket etmiştir. Bu sebepten dolayı deplasman değerleri yüksek iken eğilme momenti değerleri daha düşük seviyelerde olmuştur.



Şekil 5.15. L/4 kesitinin yük-taç bölgesi eğilme momenti grafiği.

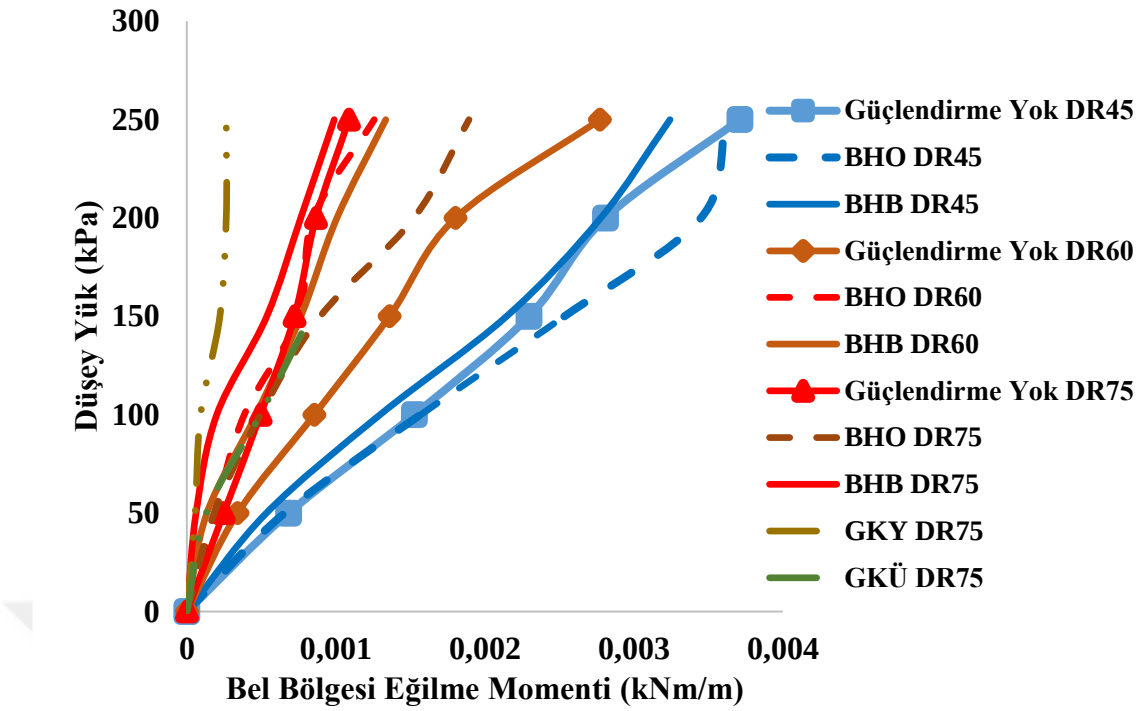
Düşey yükleme altında L/4 kesitinin taç bölgesi için en yüksek eğilme momenti değerleri tüm laboratuvar deneyleri arasından herhangi bir takviye uygulanmayan deney gruplarında görülmüştür. Aynı zamanda L/4 kesitinde de, relatif sıkılık durumu bakımından düşey yük-eğilme momenti grafiği incelendiğinde, en yüksek eğilme momenti değerleri en gevşek durum olan %45 relatif sıkılıkta, en düşük eğilme momenti değerleri ise en sıkı durum olan %75 relatif sıkılık durumunda görülmüştür. Yine L/4 kesitinde de, en yüksek deplasmanların görüldüğü granül kauçuk malzemeden oluşturulmuş yataklama tabakası ve üstdolgu bulunan deneylerin düşük eğilme momentleri göstermesinin sebebi, boru hattının bütünüyle düşey yönde hareketi olarak ortaya çıkmıştır. Bu sebepten dolayı L/2 kesitinde de olduğu gibi L/4 kesitinde de deplasman değerleri yüksek iken eğilme momenti değerleri daha düşük seviyelerde görülmüştür. Bu durum bel bölgesi için de hem L/4 hem de L/2 kesitinde benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Ayrıca, sadece boru hattı ortasına takviye yapılan uygulamaların tamamında, takviye uygulanmayan bölgelere göre hem taç hem de bel kısımlarında daha düşük eğilme momentleri elde edilmiştir.

Bel bölgesi için L/2 kesitinde düşey yük-eğilme momenti grafiği Şekil 5.16'da, L/4 kesiti için ise düşey yük-eğilme momenti grafiği Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.16. L/2 kesitinin yük-bel bölgesi eğilme momenti grafiği.

Düşey yükleme altında L/2 kesitinin bel bölgesi için en yüksek eğilme momenti değerleri tüm laboratuvar deneyleri arasından %45 ve %60 relatif sıkılık koşullarında herhangi bir takviye uygulanmayan deney gruplarında görülmüştür. Taç bölgesinde olduğu gibi bel bölgesinde de relatif sıkılık durumu bakımından düşey yük-eğilme momenti grafiği incelendiğinde, en yüksek eğilme momenti değerleri en gevşek durum olan %45 relatif sıkılıkta, en düşük eğilme momenti değerleri ise en sıkı durum olan %75 relatif sıkılık durumunda görülmüştür.



Şekil 5.17. L/4 kesitinin yük-bel bölgesi eğilme momenti grafiği.

Düşey yükleme altında L/4 kesitinin bel bölgesi için en yüksek eğilme momenti değerleri tüm laboratuvar deneyleri arasından %45 relatif sıkılık koşullarında görülmüştür. Bu kesit için en belirleyici faktör relatif sıkılık değeridir. Sadece boru hattı boyunca uygulanan yarı kesitli atık araç lastikleri olumlu yönde etkinlik göstermiştir. Diğer deney gruplarında bu kesit için takviye bulunmaması bel bölgesindeki deplasman artışlarını beraberinde getirmiştir. Granül kauçuk yataklamalı ve üstdolgulu deneylerde ise yine L/2 kesitindeki gibi boru hattının bütünüyle kauçuk tabaka içerisindeki düşey hareketi, kesit üzerinde minimal gerilmeler oluşturmuştur. Bu sebepten dolayı granül kauçuk yataklama ve üstdolgu bulunan deneylerde, yüksek deplasman değerleri ile birlikte düşük eğilme momenti değerleri elde edilmiştir.

6. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

6.1 Programa Girilen Malzeme Parametreleri

Ansys Workbench modülü "Static Structural" analizinde ilk olarak malzemelerin mühendislik parametreleri girilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan malzemelerden deney kutusu ve yükleme plakası St37 (TS EN 10216-1, 2014) çeliği olarak atanmıştır. HDPE gömülü boru ise polietilen hammadde olarak tanımlanırken zemin ortamı kum, yarım kesitli atık araç lastikleri ve kauçuk malzeme de hiperelastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Bu malzemelerin orijinal mühendislik parametrelerinin bazıları Aksaray Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarları ve üretim firmalarının ARGE laboratuvarları sonuçlar doğrultusunda, bazıları ise üretici firmaların teknik şartname kataloglarından tespit edilmiştir. Program, değişkenler, modeller, kriterler, kurallar, kanunlar vb. gibi birçok başlıklar altında bütün verilerin tanımlanması için çeşitli imkanlar tanımaktadır. Elde bulunan verilere göre söz konusu başlıklar seçilmekte ve veriler "Engineering Data" sekmesine girilmektedir. Her veri girişi için istenen birim program arayüzünde belirtilmektedir. Ayrıca, teoriye aykırı veya eksik veri girdisi olduğu durumlarda program tarafından uyarı verilmektedir.

6.1.1 Deney kutusu ve yükleme plakası özellikleri

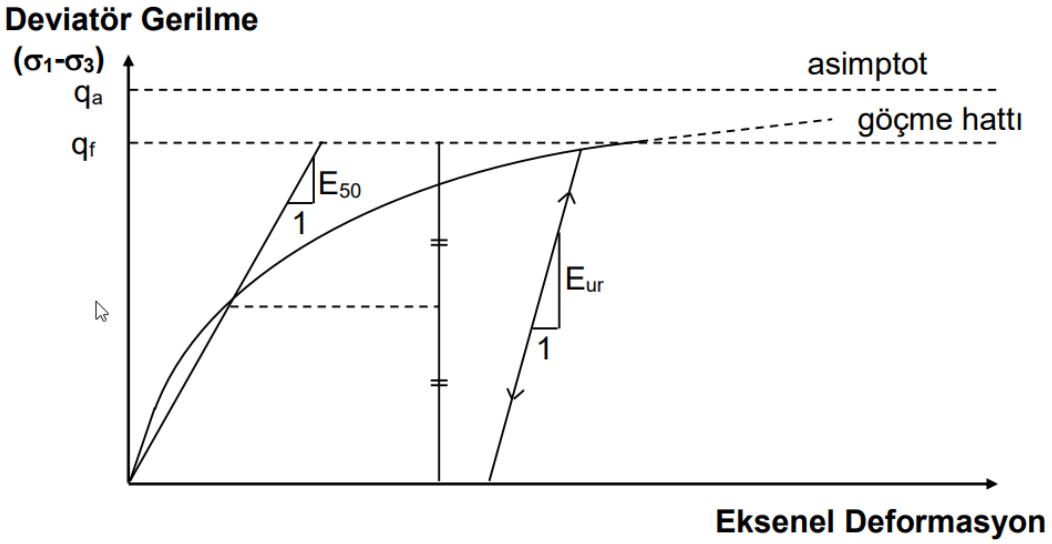
Deney kutusu, kutu çevresine rijitliği sağlamak için kaynaklanan kuşaklar ve yükleme plakası 10 mm et kalınlıktaki sacdan imal edilmiştir. Laboratuvar deneylerinde, TS EN 10216-1 (2014) standardına göre minimum çekme dayanımı 370 N/mm^2 olan St37 çeliği kullanılmakta olup programa standartta Çizelge 6.1'de verilen değerler girilmiştir.

Çizelge 6.1. St37 çeliği malzeme parametreleri.

Standart	Kalite	Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı (0-16 mm)	Akma Dayanımı (16-40 mm)	Uzama
EN10216-1	St37	350 – 480 MPa	min 235 MPa	min 225 MPa	%25

6.1.2 Silis kumu ve Mohr–Coulomb modeli

Analizlerde Mohr-Coloumb zemin modeli kabul edilmiştir ve geridolgu malzemesi için ikincil Young modüller kullanılmıştır. Sürdürülen sayısal analizler ve yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ışığında sonlu elemanlar analizleri, gömülü esnek HDPE boru davranışlarının belirlenmesinde başarılı olmuştur. Mohr-Coulomb zemin modelinde plastik davranışı modellenmek üzere c' (kohezyon), φ' (içsel sürtünme açısı) ve ψ (genleşme açısı)'na ihtiyaç duyulmaktadır. Elastik davranışın modellenmesinde ise E' (elastisite modülü) ve υ (Poisson oranı) hesaplamalarda ve analizlerde yer almaktadır. Geleneksel üç eksenli basınç deneylerinde gerilme - şekil değiştirme eğrisinin başlangıç eğimi başlangıç rijitlik E_i ve deviatorik gerilmenin %50'sine tekabül eden rijitlik modülü ise ikincil modül E_{50} olarak tanımlanabilmektedir. Mohr–Coulomb modelinde kumlar ve normal konsolide (NC) killer üzerinde ikincil modülün kullanılmasının gerçekçi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Mohr-Coulomb modelinde akma durumu asal gerilmelere göre belirtilen üç akma fonksiyonuna göre tanımlanmıştır.



Şekil 6.1. E_{50} Young modülü (Bildik, 2013).

Mohr-Coulomb modelinde kumlar ve normal konsolide (NC) killerin hesaplamalarında E_{50} modülünü kullanmak daha kesin sonuçlar vermektedir. Mohr-

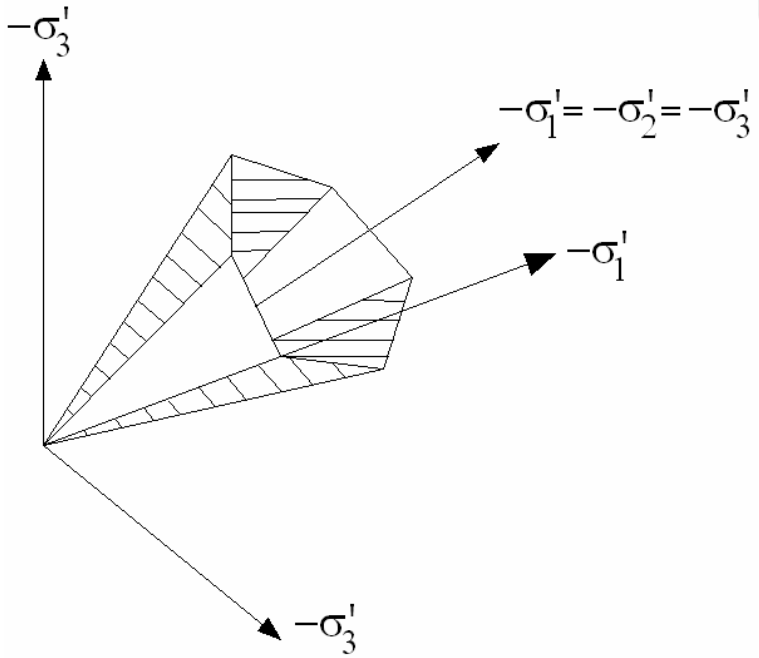
Coulomb modelinin akma hali için asal gerilmelerin esas alındığı üç akma fonksiyonu Eşitlik 6.1, Eşitlik 6.2 ve Eşitlik 6.3'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$g_1 = \frac{1}{2}.|\sigma_2' - \sigma_3'| + \frac{1}{2}.(\sigma_2' + \sigma_3').sin\psi \quad (6.1)$$

$$g_2 = \frac{1}{2}.|\sigma_3' - \sigma_1'| + \frac{1}{2}.(\sigma_3' + \sigma_1').sin\psi \quad (6.2)$$

$$g_3 = \frac{1}{2}.|\sigma_1' - \sigma_2'| + \frac{1}{2}.(\sigma_1' + \sigma_2').sin\psi \quad (6.3)$$

Plastik potansiyel fonksiyonlarında plastisite değişkenlerinden bir diğeri olan genleşme açısı ψ bulunmaktadır (Smith ve Griffith, 1982). Model içerisinde iki yerde basitleştirme uygulanmıştır. İlk basitleştirme, elastisite modülünün sabit olarak alınmasıdır. İkinci ise zemin göçtüğü andan itibaren limitsiz genleşme eğiminde bulunmasıdır. Gerçek koşullarda davranış göçme anından sonra zemin boşluk oranının kritik bir değere ulaşarak genleşmesi ve sona ermesi ile tamamlanmaktadır. Şekil 6.2'de asal gerilme uzayında Mohr Coulomb akma yüzeyi (c' = 0) belirtilmiştir.



Şekil 6.2. Mohr-Coulomb akma yüzeyi (Terzi, 2007).

6.1.3 Yarım kesitli atık araç lastikleri, lastik parçaları ve hiperelastik model

Sonlu elemanlar analizinde temel olarak farklı davranış türleri bulunmaktadır. Bu davranışlardan bazıları;

- Plastik şekil değiştirme bölgelerindeki doğrusal olmayan davranışı,
- Ezilme, parçalanma, aşırı deformasyon gösteren malzeme davranışları,
- Doğrusal olmayan kontakt davranışları veya sürtünme ilişkisi,
- Geometrik ve doğrusal olmayan davranışlar vb. olarak bilinmektedir.

Geometrik doğrusal olmayan davranışlar, büyük deplasmanlar, büyük rotasyonlar, büyük birim deformasyonlar ve gerilme sertleşmesi gibi hem yük etkisinde doğrusal deformasyon göstermeyen hem de anizotropik şekil değişimlerine uğrayan malzemelerin deformasyon davranışlarını yansıtmaktadırlar. Büyük deplasmanlar, geometrik doğrusal olmayan davranışta en çok gözlemlenen kriterlerin başında gelmektedir. Büyük deplasmanların program tarafından müsaade edilmesi sonlu elemanlar analizi yazılımını iterasyonlu çözümlere sürüklemektedir. Bu şekilde deformasyon, rijit cisim ötelenmeleri, dönme hareketleri, büyük birim deformasyonlar ya da bu etmenlerin birleşiminden ortaya çıkabilmektedirler. Elemanın nihai geometrisi ya da lokasyonu ilk duruma göre büyük oranda farklılıklar göstermekteyse büyük deplasmanlar programda aktif hale getirilmektedir. Bu tez çalışmasında atık lastiklerin ve parçalarının yük etkisinde söz konusu farklı deformasyonlarının dikkate alınması için büyük deplasmanlara izin verilmiştir.

Büyük rotasyonlar, rijit cisim hareketlerini göstermektedirler ve bu büyük birim deformasyonları içerisinde barındırdığı anlamına gelmemektedir. Dönme hareketlerinin belirli sınırlarda olduğu elemanlarda esnek ve rijit deformasyonların hassas bir biçimde tahkik edilebilmesi için de büyük şekil değiştirme etkileri analizde hesaba katılmalıdır. Açısal dönüşün 10°'yi geçtiği durumlarda büyük rotasyonal şekil değiştirme etkileri de dikkate alınmalıdır.

Büyük birim deformasyon, eleman mertebesinde şekil değişikliğini ifade etmektedir. Bu deformasyon türünde, elemanların her biri başlangıç şekline oranla büyük farklılıklar gösterecek kadar çekme, basınç ya da kesme kuvvetine maruz

kalmaktadırlar. Örneğin, kauçuk, kauçuk türevi vb. malzemelerin sıkıştırma ve çekme analizinde davranışın gerçeği yansıtacak şekilde modellenebilmesi için büyük şekil değiştirme hesaplamalarında tercih edilen hiperelastik malzeme modeli (genellikle Ogden veya Yeoh, Mooney-Rivlin, vb.) kullanılmaktadır.

Gerilme sertleşmesi ise uzun ve ince bir yapının eksenel doğrultuda çekme veya basınç yükü altında enine doğrultuda gözlemlenen rijitlik artışı ya da azalmasına bağlı olarak ortaya çıkan bir membran gerilmesidir. Gerilme sertleşmesi, en az bir doğrultuda eksenel veya membran gerilmesine maruz kalan yapılar için önem taşımaktadır. Eğer bu şekilde gözlemlenen sorunlar için deformasyonlar ve rotasyonlar küçük ise doğrusal olmayan geometrik etmenler dikkate alınmayabilmektedir. Bu durumda daha doğru bir çözümlemeye ulaşmak için gerilme sertleşmesini göz önünde bulundurmak yeterli olmaktadır (URL-5).

Hiperelastik malzemelerin uzama karakteristikleri, yük etkisinde doğrusal değildir ve neredeyse sıkıştırılamaz yapıda bulunmaktadırlar. Kauçuk kökenli malzemelerin programa tanımlanması hiperelastik malzeme modelleri ile yapılmaktadır. Hiperelastik malzemelerin mühendislik parametrelerinin tayin edilmesi ve programlara yansıtılması elastik malzemelerden farklıdır. Örneğin, tek eksenli sabit hızda çekme testi uygulanan numuneler üzerinde uzamadan sonraki uzunluğun, ilk uzunluğa oranı Eşitlik 6.4'teki gibi "uzama oranı" λ olarak tanımlanmaktadır.

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1 \tag{6.4}$$

Hiperelastik malzemelerin bünye denklemi için ise gerinme enerjisi potansiyeli kullanılmaktadır. Gerinme enerjisi potansiyelinin tanımlanması için invaryant ve uzama oranı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. İnvaryantlar, koordinat sisteminden bağımsız olarak gerinme değerlerini ölçmek için kullanılmaktadırlar. Üç eksende uzama (λ_1, λ_2, λ_3) oranları tanımlanarak gerinme enerjisi potansiyeli belirlenmektedir. λ_1 ve λ_2 düzlemdeki uzamaları temsil etmekte iken λ_3 düzlem dışı uzamayı göstermektedir. Böylece, üç yöndeki gerinme invaryantları Eşitlik 6.5, Eşitlik 6.6 ve Eşitlik 6.7'deki şekilde yazılabilmektedir (Erkek vd., 2015).

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2.\lambda_1 + \lambda_3^2 \tag{6.5}$$

$$I_2 = \lambda_1^2.\lambda_2^2 + \lambda_2^2.\lambda_3^2 + \lambda_3^2.\lambda_1^2 \quad (6.6)$$

$$I_3 = \lambda_1^2.\lambda_2^2.\lambda_3^2 \quad (6.7)$$

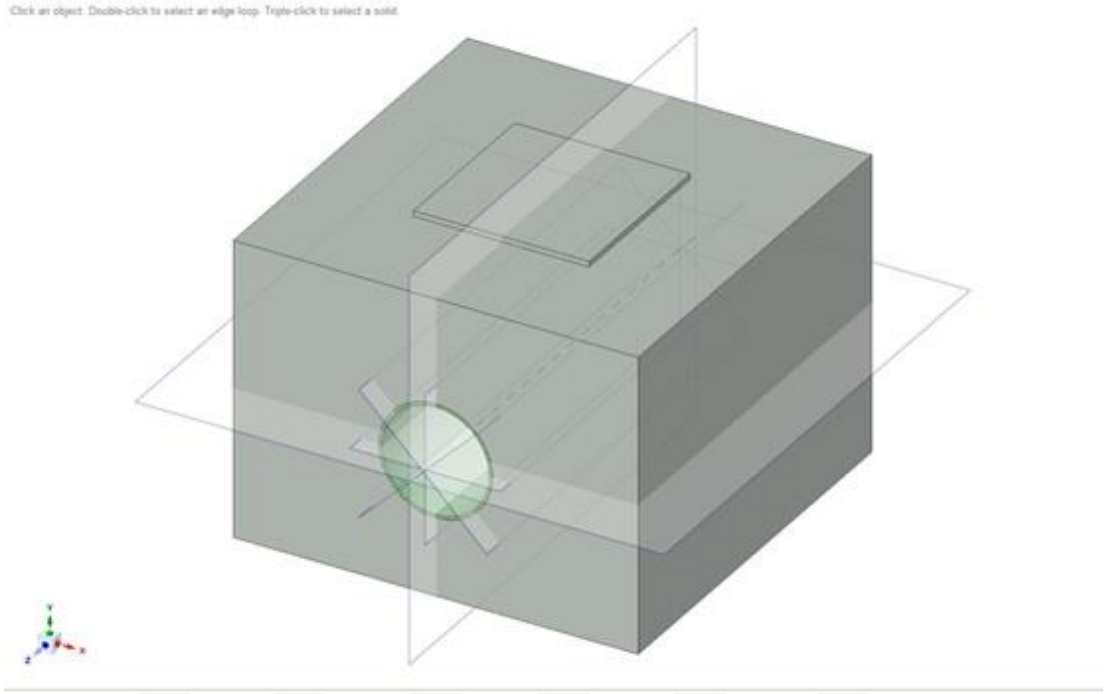
İzotropik ve tamamen sıkıştırılamaz malzeme, I_3=1 olarak gösterilmektedir. Ayrıca, gerinme enerjisi potansiyeli (W), uzama oranları ve gerinme invaryantlarının fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Literatürde pek çok hiperelastik malzeme modeli yerini almaktadır ve başlıca bilinen hiperelastik malzeme modelleri Mooney-Rivlin, Polynomial Form, Neo-Hookean, Ogden, Arruda-Boyce, Gent, Yeoh ve Marlow modelleri olarak bilinmektedir (Karen vd., 2008).

Bu tez çalışmasında yer alan kauçuk esaslı malzemelerin modelleri ise literatürde (Automotive Design, 2015; Başar ve Itskov, 1998; Conradie vd., 2016; Giurgiu vd., 2012; Oktay ve Gürses, 2013; Vahapoğlu, 2010) hiperelastik modellerden Neo-Hookean, Yeoh veya genellikle Ogden malzeme modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Bu bakımdan, ANSYS programında atık lastikler için elastik malzeme özellikleri atandıktan sonra hiperelastik malzeme modeli sekmesinde Ogden malzeme modeli için yer alan parametreler tanımlanmıştır. Programa tanımlanan mühendislik parametreleri, Bölüm 4'te laboratuvar deneyleri, firma verileri ve literatür ışığında toplanarak belirtilmiştir.

6.2 Sistem Geometrisi ve Çizimi

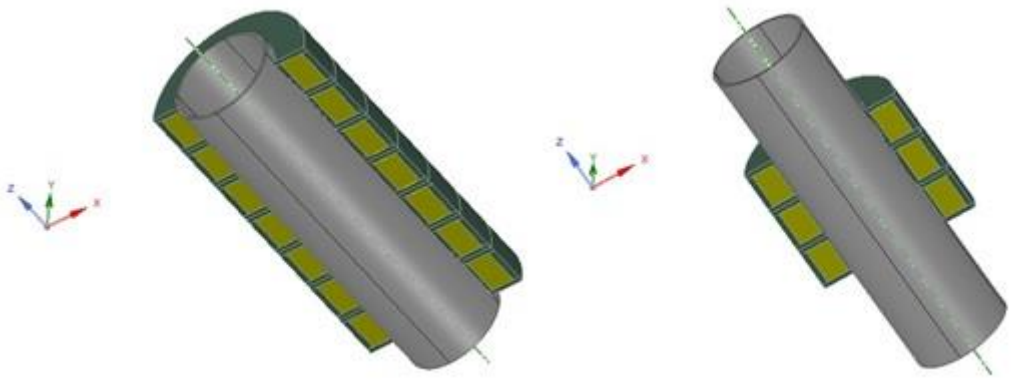
Space Claim, ANSYS programında cisimlerin çizimi ve tasarımına imkan sağlayan bir üç boyutlu (3D) tasarım yazılımıdır. Space Claim sisteminin komutlar vasıtasıyla çizimler yapmak yerine bünyesinde basit bir yapay zeka algoritması barındırması, yapılan işlemler üzerinde düzeltmelerin ve eklemelerin daha hızlı bir şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır. Böylelikle, geometrinin ortaya çıkarılışı daha da işlevselleşmektedir. Bu entegre yazılımın diğer avantajları ise yaygın kullanılan tüm CAD dosyalarının herhangi bir sorun yaratmaksızın açılabilmesi ve veri kaybının yaşanmamasıdır. Bu bakımdan tez çalışmasında, programa tanımlanan deney kutusu, zemin ortamı, boru, bütüncül ve parçalanmış lastik malzemelerinin deney kutusu içerisinde olduğu gibi programa aksettirilebilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca, farklı modelleme programları ile tasarlanan parçalar Space Claim ile rahatlıkla

düzenlenebilirken son zamanlarda sıkça tercih edilen bir çizim programı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada, geridolgu ortamı, boru ve yükleme plakasını temsil eden çizim Şekil 6.3'te gösterilmiştir.

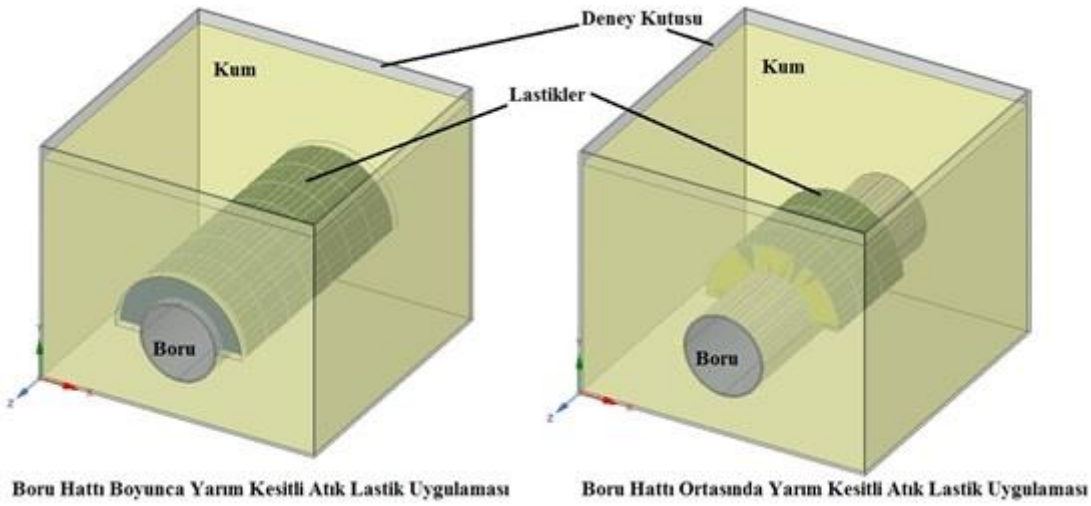


Şekil 6.3. Space Claim tasarımı.

Atık araç lastiklerinin programa entegrasyonu ise boru üzerine hat boyunca çizilerek oluşturulmuştur. İçi sıkı halde silis kum dolgulu olan materyal malzeme özelliklerinin Bölüm 4'te belirtildiği gibi atanması ile tamamlanmıştır. Yarım kesitli atık araç lastiklerinin program üzerindeki görünümleri boru hattı üzerinde Şekil 6.4'te ve silis kumlu geridolgu ortamı içerisinde Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

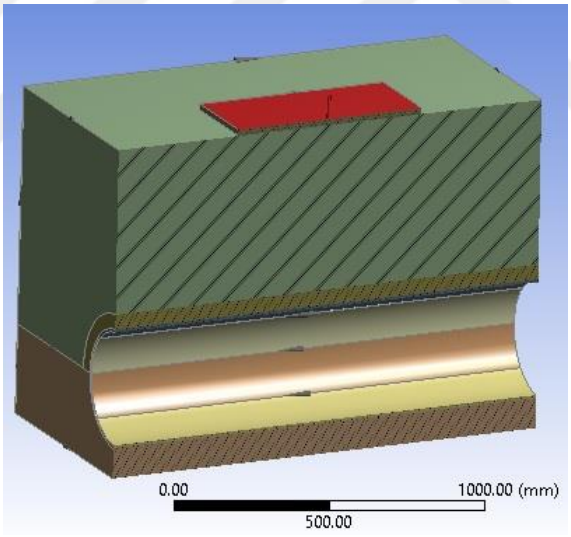


Şekil 6.4. Boru hattı üzerinde yarım kesitli atık araç lastiklerinin gösterimi.

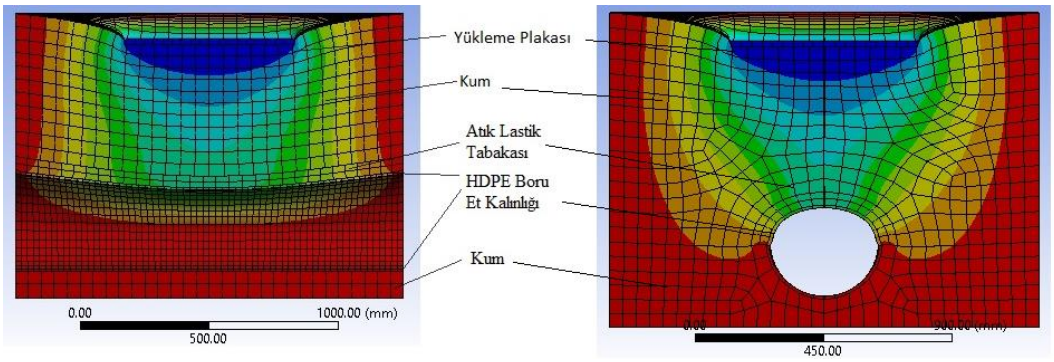


Şekil 6.5. Geridolgu ortamı içerisinde yarım kesitli atık araç lastiklerinin gösterimi.

Düşey yük altında, boru hattı ve lastik kesitinin geridolgu ile beraber oluşturduğu sistem geometrisinin gösterimi ise Şekil 6.6'da ve Şekil 6.7'de gösterildiği gibi programda tasarlanmıştır.



Şekil 6.6. Yataklama, boru, lastik ve geridolgu kesiti.



Şekil 6.7. Düşey yük altında düşey deformasyon kontür gösterimi.

6.3 Sonlu Eleman Ağları Üretme

Sistem geometrisinin ardından geçilen model oluşturma aşamasında, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecek sistem küçük parçalara ayrılarak çözümlenmektedir. Bunun için model, ağ adı verilen işlem adımı ile yüzeysel ve hacimsel olarak problem türü ve belirlenen metotlara göre kısımlara ayrılmaktadır. Ağ üretimi adımlarının kaliteli olabilmesi için ise Space Claim ile tasarım esnasında zemin ortamı dörde, boru kesiti boru hattı boyunca iki, radyal bazda ise sekize olmak üzere toplam 16 parçaya ayrılmıştır. Böylece, parçalar arası boyutsal oran birbirine uyumlu olmaktadır ve parçaların düğümler arası hesaplama koordinasyonu sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilmektedir. Parçalara ayırma işlemi, cisimleri farklı parçalar haline getirmek yerine tek bir cismin ayrı düzlemlere ayrılması şeklinde yorumlanmaktadır. Aksi takdirde, çizim esnasında uygulanacak olan tek bir cismin farklı parçalardan bir araya getirilmesi, davranış ve analiz sonuçları açısından hatalı neticeler ortaya koymaktadır.

Sonlu elemanlar ile çözümlenen problemlerinin yürütülmesi esnasında sonlu eleman ağları üretme işlemi, program verilerinin sağlıklı ve hassas olması için çok büyük önem taşımaktadır. Ağ üretme, kısaca cismi problemin türüne göre küçük parçalara bölme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Böylece, parçalara ayrılan cismin tüm elemanlarında meydana gelen gerilim değerleri bir arada toplanarak tüm cismin toplam gerilim değerine ulaşılır. Cismin geometrisine göre ve problem kompleksliğine göre üçgen, dörtgen, tetrahedron, hegzahedron veya pentahedron şeklinde gibi farklı eleman ayrımları yapılabilmektedir. Ağ üretmenin dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli aşaması ise mesh hassasiyetidir. Optimum ağ üretimine kadar parçaların

küçültülmesi hassas sonuçlar alınmasını sağlarken gereksiz hassaslıkta parçalara bölmek sadece işlem süresini uzatmaktadır.

Elemanların en–boy oranı mesh kalitesini doğrudan etkilemektedir ve en boy oranı birbirine ne kadar yaklaşır ise kaliteli bir ağ üretimi yapmak da o kadar mümkün olmaktadır. Ayrıca, birden fazla parçanın temas eden kısımlarında mesh uyumu da oldukça önemlidir. Aksi takdirde, ara yüzeyde gerçek olmayan yük gerilmelerinin gözlemlenmesi meydana gelebilmektedir. Özellikle, ara yüzeylerde düğüm noktalarının tam olarak çakışması ya da diğer bir deyişle uyumlu olması, gerilmelerin ara yüzeylerden aktarılırken hassas bir biçimde geçiş yapılmasını sağlamaktadır.

Hassas ve kritik bölgelerdeki değerlerin doğru olarak tespit edilebilmesi için gerekli bir diğer işlem adımı ise bölgesel ağ üretimidir. Modelin tüm bölümlerinde aynı yoğunlukta ve türdeki mesh kritik bölgedeki değerlerin gerçek değerlerinden uzaklaşmasını sağlayabilmektedir. Bu yüzden, keskin köşeli parçalarda, temas yüzeylerinde, çatlak veya yarık başlangıçlarında, yük aktarım yüzeylerinde bölgesel küçük ölçekli ağlar tercih edilmelidir. Söz konusu bölgelere daha küçük boyutlu ağ üretiminin yapılması tercih edilmediğinde ise global hata oranı değeri maksimize olabilmektedir ve buna bağlı olarak elde edilecek değerlerin kabul edilebilir sınırlara çekilmesi için fine mesh gerekmektedir.

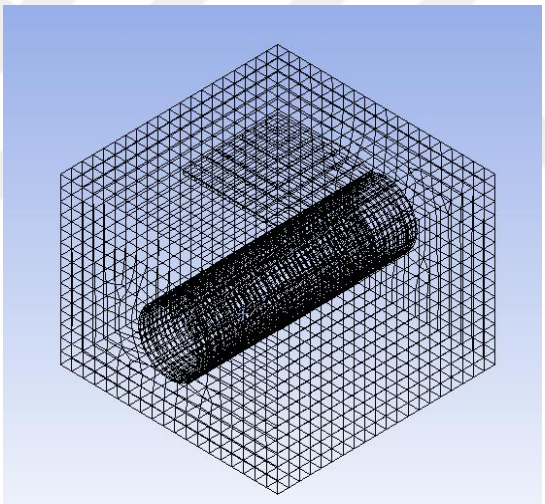
ANSYS programı, ağ üretiminin mümkün olabildiğince iyi olmasını denetleyen birtakım kriterleri sunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Eleman kalitesi,
- En–boy oranı,
- Jacobi oranı,
- Çarpılma faktörü,
- Paralel sapma,
- En büyük köşe açısı,
- Çarpıklık,
- Ortogonal kalitedir.

Ağ üretimi işlemi gerçekleştirilirken bu kriterler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Ağ üretimi uygunluk düzeyinin belirlenmesi amacıyla ANSYS tarafından öne sürülen bu kriterlere dikkat edilmesi gerekmektedir. İstenilen kontroller için ekranda her kriter için ayrı değerlendirme aralıkları mevcuttur. Örneğin, kriter olarak en–boy oranını dikkate alan kriter değeri 1 ise ağ üretimi çok iyi, 5 ile 10 arası ise kabul edilebilir, 20 ise çok kötüdür. En çok kullanılan kriter ise çarpıklık kriteridir. Bu değer, Eşitlik 6.8'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$çarpıklık = \frac{\text{optimum element boyutu} - \text{aktif element boyutu}}{\text{optimum element boyutu}} \tag{6.8}$$

Sonuç olarak çarpıklık, 0.00 ile 0.25 arası çok iyi, 0.25 ile 0.50 iyi bir ağ kalitesini, 0.80 ile 0.94 kabul edilebilir, 0.98 ile 1.00 ise kabul edilemez bir ağ kalitesini göstermektedir (Ovalı ve Esen, 2017).



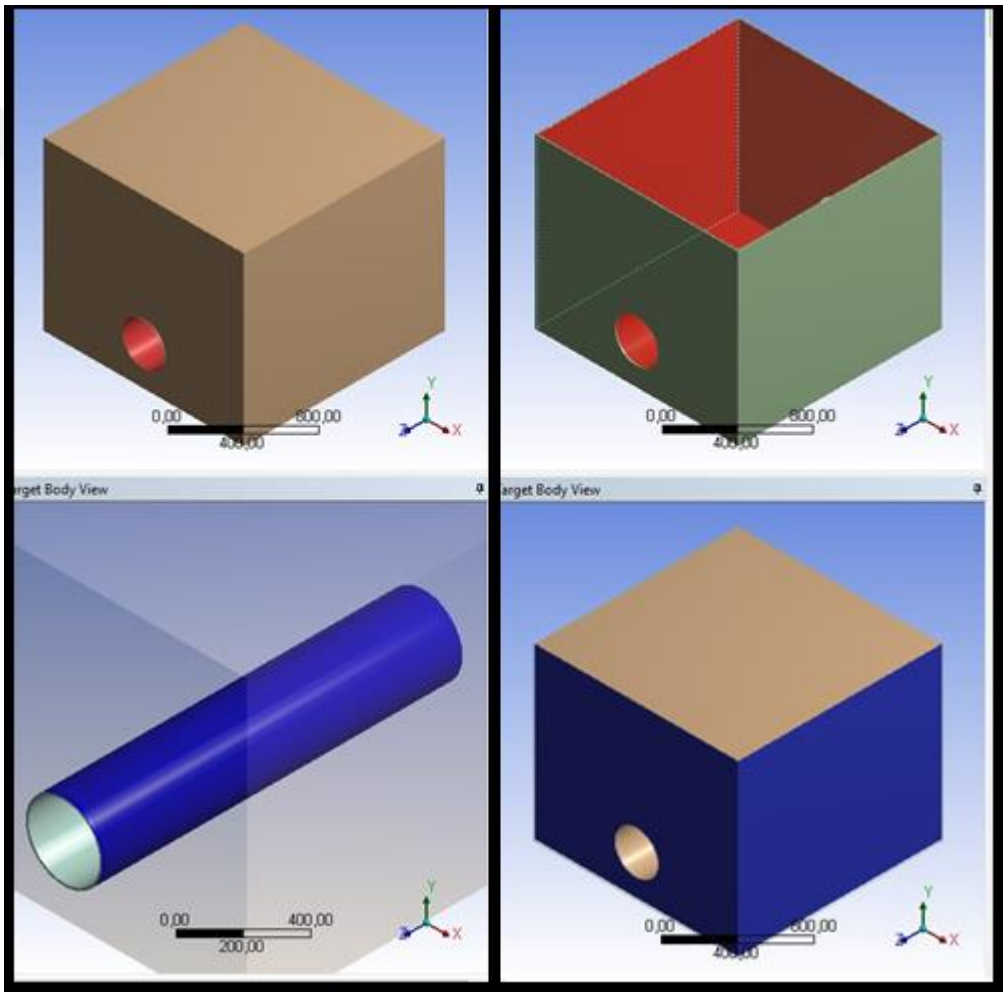
Şekil 6.8. Ağ üretimi işlemleri ve boru üzerinde fine mesh.

Sonuç olarak, modelleme esnasında ağ üretilirken söz konusu kriterler dikkate alınıp standartlarda yer alan limitler göz önünde bulundurularak analizler gerçekleştirilmiştir.

6.4 Temas Bölgelerinin Tanımlanması ve Atanması

Program verilerinin, deney verileri ile örtüşmesi veya davranış bakımından benzer mekanizmalar elde edilmesi için ortam koşullarının programa doğru bir şekilde aktarılması gerekmektedir. Bunu sağlayan veri girdilerinden bir tanesi de

arayüzeylerin ve birleşim bölgelerinin doğru tanımlanmasıdır. Materyallerin birbirlerine uyguladıkları itki ve modelin bütünsel davranışını doğrudan etkileyen bu olgu söz konusu veri örtüşmeleri için oldukça büyük önem taşımaktadır. ANSYS programında bu işlem adımları, materyal özellikleri ve problem türüne göre "bağlı, sürtünmeli, sürtünmesiz, ayrımsız vb." seçenekleri arasından tercih edilmektedir. Modelleme yapılırken esas olarak dikkate alınan temas yüzeylerinden bazıları Şekil 6.9'da gösterilidiği gibidir. Bu arayüzey tanımlamalarının malzemeler arası özelliklere göre ayrıntılı açıklaması Çizelge 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.9. Kum – boru ve kutu – kum arayüzey tanımları.

Sistemdeki problem türündeki modeller için kumlu zemin ortamının boru ve kutu ile oluşturdukları temas yüzeyi sürtünmeli olarak tercih edilmiştir. Aynı mühendislik

özelliklerine sahip materyaller için mesnetli bağlantı tipi seçilmiştir. Temas yüzeylerinin doğru seçilmesi davranış bakımından oldukça önemlidir (Alam vd., 2013; Hassan vd., 2014). Sürtünmeli, sürtünmesiz, bağlı, pürüzlü vb. bağlantı şekilleri, mesnetlenme, birleştirme veya ayrılma gibi durumlara göre değişebilmektedir (Stolarski, 2018).

Çizelge 6.2. ANSYS kontakt türleri ve karakteristikleri (URL-6).

Kontakt Tipi	İterasyon	Materyaller Arası Boşluk	Materyaller Arası Kayma
Mesnetli	1	Boşluk yok	Kayma yok
Birleşik	1	Boşluk yok	Kaymaya izin verilir
Sürtünmesiz	Çoklu	Boşluğa izin verilir	Kaymaya izin verilir
Pürüzlü	Çoklu	Boşluğa izin verilir	Kayma yok
Sürtünmeli	Çoklu	Boşluğa izin verilir	Kaymaya izin verilir

6.5 Mesnetler ve Sınır Şartları

Program analiz sonuçlarının gerçeği yansıtabilmesi için gerekli bir diğer işlem adımı yüklemenin düzgün bir biçimde atanabilmesidir. Hidrolik kontrollü piston vasıtasıyla yükleme plakasına aktarılan yükün belirli zaman dilimlerinde belirli artışlara karşılık gelen aktarımların doğru yansıtılması analiz ile eşleşme açısından oldukça önemlidir. Bu bakımdan, zemin ortamına etkitilen gerilmeler deneyde aktarıldığı gibi adımlar halinde sisteme aksettirilmiştir.

Yükleme adımları ve değerleri girildikten sonra mesnet koşulları girilmektedir. Deney kutusu, uygulamalardaki yükleme koşullarının 5 katı daha fazla yüklemeye maruz bırakılarak analiz edildiği takdirde dahi maksimum 3 mm deplasman göstermiştir. Bu değer de $3/1500=0.002<0.010$ olduğu için deney kutusu duvarları rijit kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak, kutu duvarları rijit tamamen mesnetli olarak kabul edilmiştir.

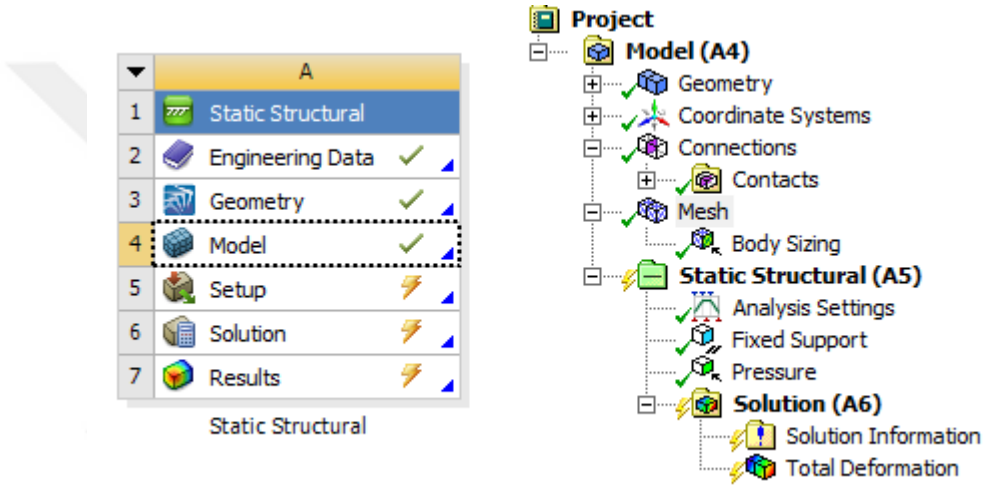
6.6 Yükleme Koşulları

Laboratuvar deneylerinde uygulanan 90 saniyede bir 10 kN yük artırımı analize de yansıtılmıştır. Yükleme 10 eşit parçaya bölünerek her kademede 10'ar kN yük artırımı

tanımlanmıştır. Laboratuvar deneylerinde olduğu gibi yük yine 650 mm en ve genişliğinde 20 mm kalınlığında yükleme plakası üzerinden etkitilerek uygulanmıştır. Yükleme, nihai olarak 100 kN'da (236,69 kN/m^2) tamamlanmıştır.

6.7 Çözümleme

Kumlu geridolgu ortamlarına yerleştirilen HDPE esnek borular üzerinde yürütülen bu tez çalışmasında, tüm deney setlerini literatür ve standartlar kapsamında gerçek koşulların arazi ortamını en iyi şekilde yansıtacağı modeller seçilerek ANSYS programında analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. Proje menüsü ve model menüsü.

Şekil 6.10'da gösterildiği üzere mühendislik parametreleri atanıp sistem geometrisi çizildikten sonra modelleme aşaması sırası ile girilerek tamamlanmaktadır. Temas yüzeyi karakteristikleri, sonlu elemanlar ağ üretimi ve tercihi, yükleme ve mesnet koşulları belirlendikten sonra istenilen deformasyon analizleri seçilerek çözümlenme aşamasının sonuç çıktılarını göstermesi beklenmektedir. Daha sonra arzu edilen değerler, sayısal veya grafiksel olarak bilgisayar ortamında kaydedilmektedir ve yorumlanmaktadır.

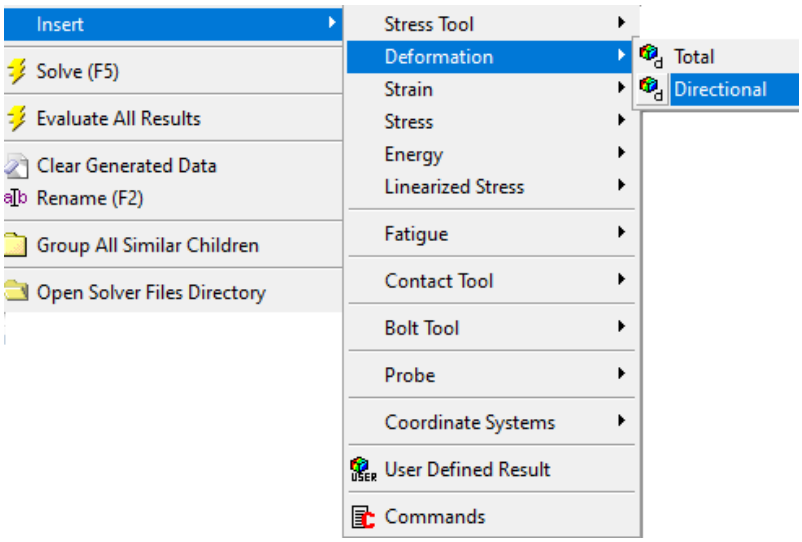
Program verilerinin hassas ve doğru bir biçimde değerleri tespit edebilmesi ve buna bağlı olarak davranışın da deneyler ile paralel yol izlemesi açısından doğru modelleme şarttır. Nümerik hesaplama yöntemlerini esas alarak ortaya konmuş programların farklı malzeme özellikleri tercihleri, tasarım ve çizim kısımları, problem çözüm

yöntemleri ve pek çok daha değişken özellikleri mevcuttur. Bu bakımdan her program için ayrıntılı araştırma yaparak doğru tasarım ve çözümlemeleri gerçekleştirmek gerekir. Programların farklı değerler vermesinin sebeplerinden bazıları;

- Çizim esnasında oluşturulan süreksizlikler,
- Atanmayan veya eksik ya da yanlış atanan malzeme özellikleri,
- Hatalı mesh,
- Yanlış veya eksik arayüzey tanımı,
- Yanlış çözüm yöntemi seçimi,
- Farklı malzemeler arası ilişkilendirmeler için gerekli işlemlerin yapılmaması vb.

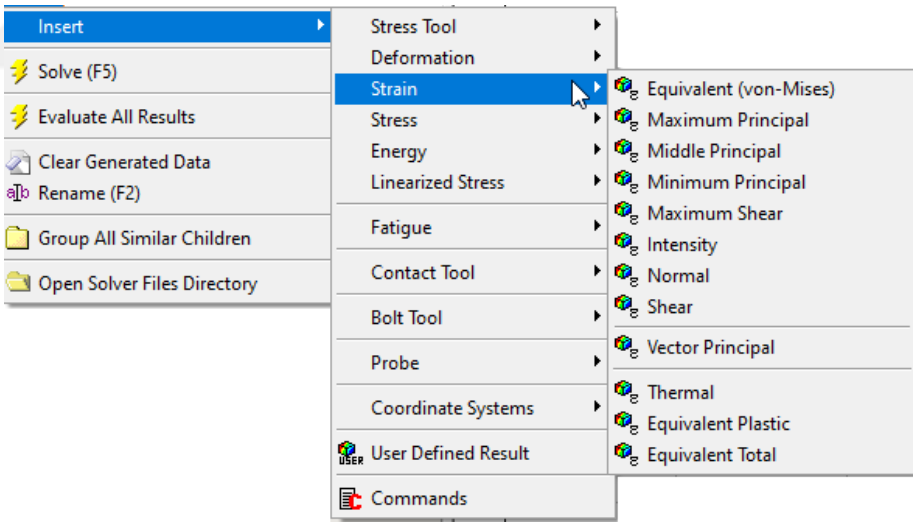
6.8 Deformasyon ve Gerilme – Şekil Değiştirme Analizleri

Tüm parametrelerin gerçek koşullarla örtüşecek şekilde ANSYS programına tanıtılmasından sonra çözümleme işlem adımlarının son aşaması olarak istenen gerilme, deformasyon, birim şekil değiştirme, enerji, yorulma, bağlantı – birleşim vb. analiz türü belirlenerek çözümle sekmesine tıklanarak analiz başlatılmaktadır. Deformasyon analizlerinin tamamının seçilmesi, işlem sayısının artmasına sebebiyet vereceği için işlem süresi uzamaktadır. Bunun için bu çalışmada sadece ihtiyaç duyulan deformasyon ve birim şekil değiştirme değerleri seçilerek analizler sürdürülmüştür. Boru taç bölgesindeki düşey deformasyonu, boru bel bölgelerinin yatay deformasyonları, yükleme plakasının oturma değerlerini ve yük etkisinde meydana gelen tüm eksenel deformasyonlar, x ve y ekseninde Şekil 6.11'de görüldüğü üzere "directional" olarak seçilmiştir.



Şekil 6.11. Çözüm menüsü ve deformasyon arabirimi.

Eğilme momentlerinin saptanması için ihtiyaç duyulan birim şekil değiştirme oranı için kullanılan metot ise "strain" analizi olarak yapılmıştır (Şekil 6.12). Buradan alınan sonuçlar, birim deformasyon ölçerler aracılığı ile toplanan veriler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.



Şekil 6.12. Çözüm menüsü ve gerilme arabirimi.

6.9 Analiz Sonuçları

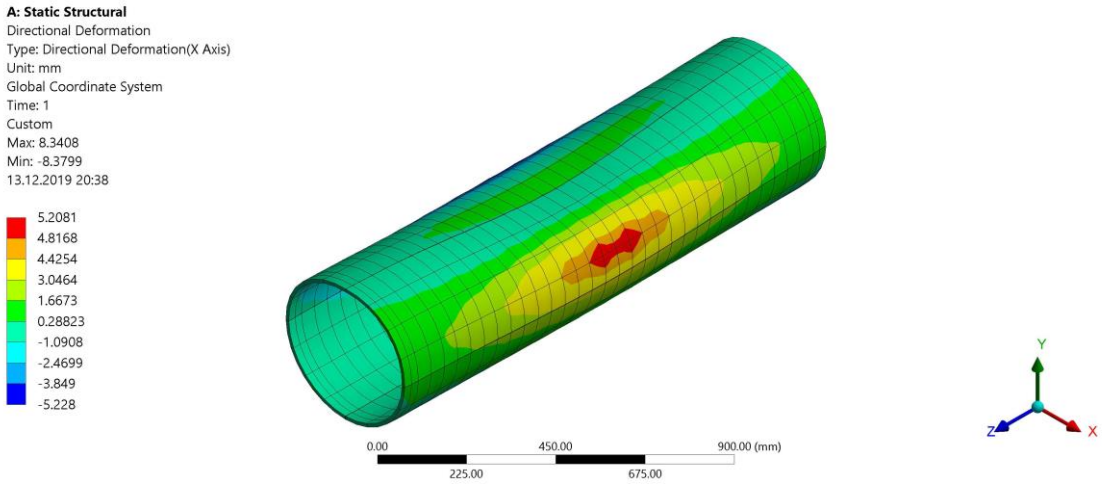
Tüm sıkılık koşullarında boru hattı boyunca atık lastik uygulaması yapılan tüm deney setlerinde atık lastikler, uygulama bulunmayan deney setlerine göre boru taç ve bel

bölgelerinde hat boyunca daha düşük eğilme moment değerleri ve daha az deformasyon değerleri oluşmasını sağlamıştır. Sıkılık değerleri ve atık lastik uygulama bölgelerine göre alınan deformasyon ve eğilme momenti değerleri ayrıntılı olarak Bölüm 5 ve Bölüm 6'da verilmiştir.

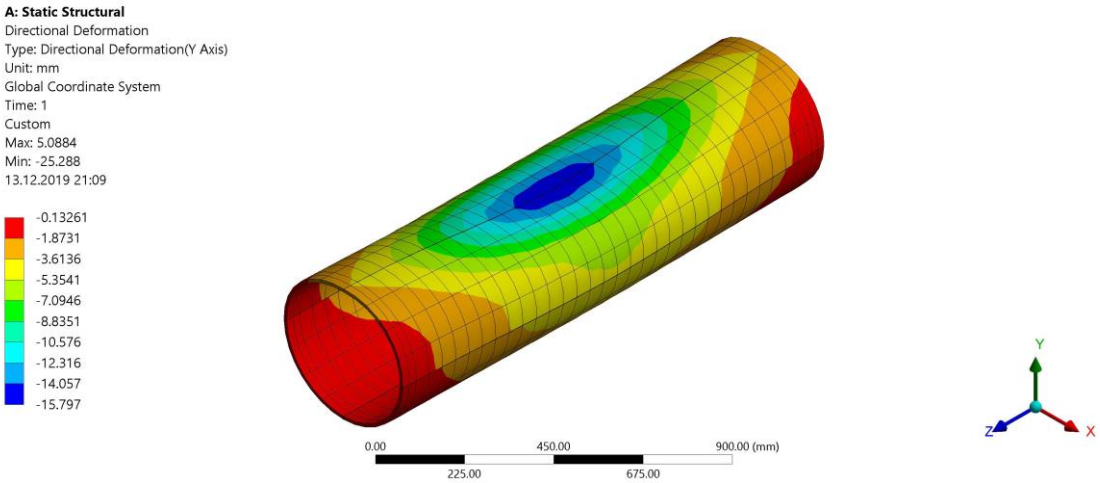
Boru hattı ortasındaki taç ve bel deformasyonu ile eğilme momenti değerleri aynı sıkılık değerleri için boru hattı boyunca yapılan atık lastik uygulaması ve sadece boru hattı ortasında yapılan atık lastik uygulamasında benzer sonuçlar vermiştir. Ancak, nihai yükleme altında atık lastik uygulaması bulunmayan boru hattı L/4 mesafesinde gözlemlenen eğilme momenti değerleri aynı sıkılık kondisyonları için boru hattı boyunca atık lastik uygulaması olan deneylere göre daha yüksek değerlere ulaşmışlardır.

6.9.1 %75, %60 ve %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Herhangi bir takviye uygulamanın yapılmadığı %75 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.13'te, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.14'te verilmiştir.

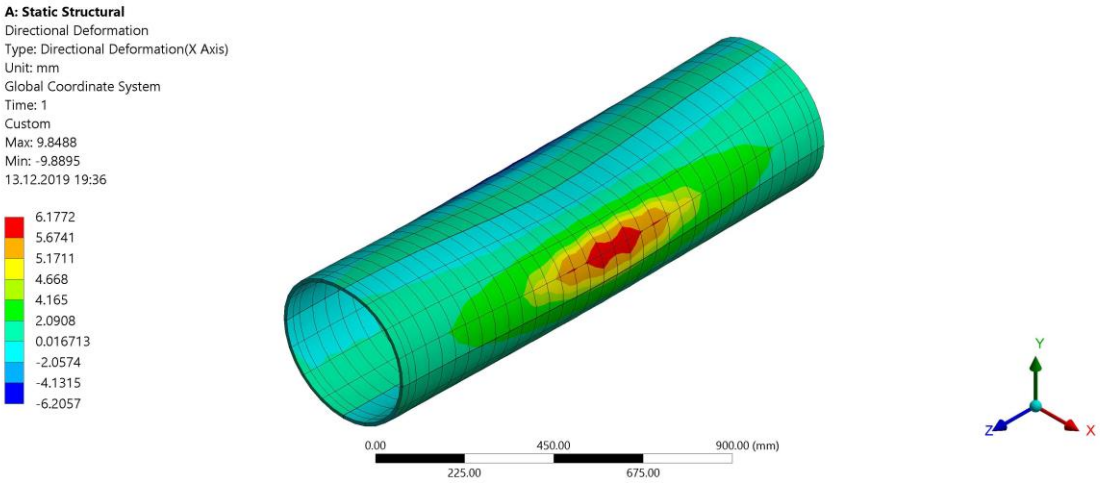


Şekil 6.13. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

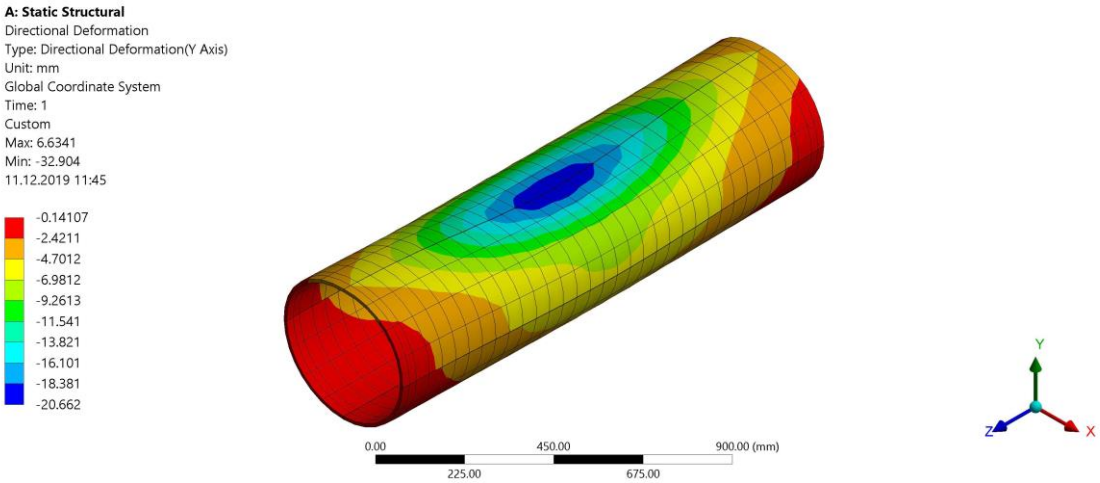


Şekil 6.14. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

Herhangi bir takviye uygulamanın yapılmadığı %60 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.15'te, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.16'da verilmiştir.

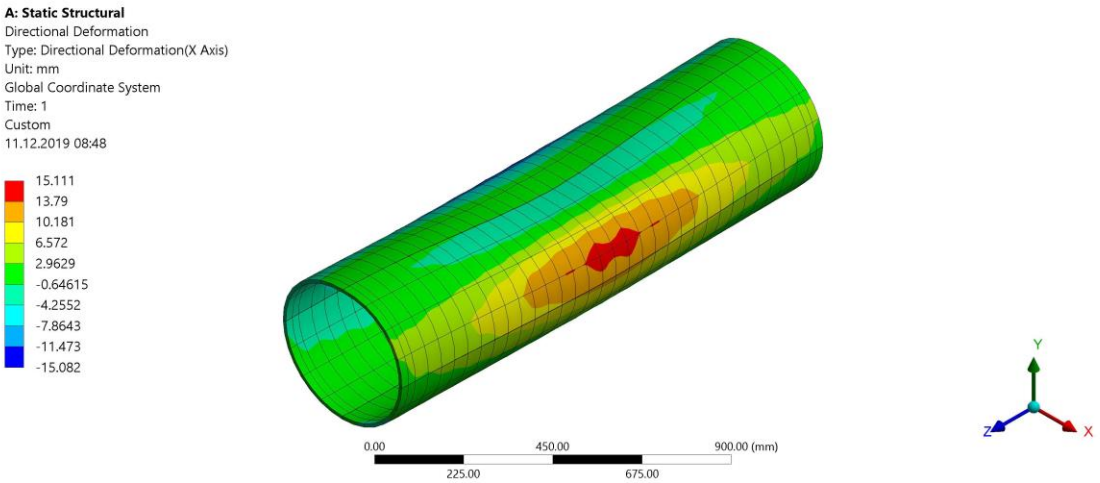


Şekil 6.15. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

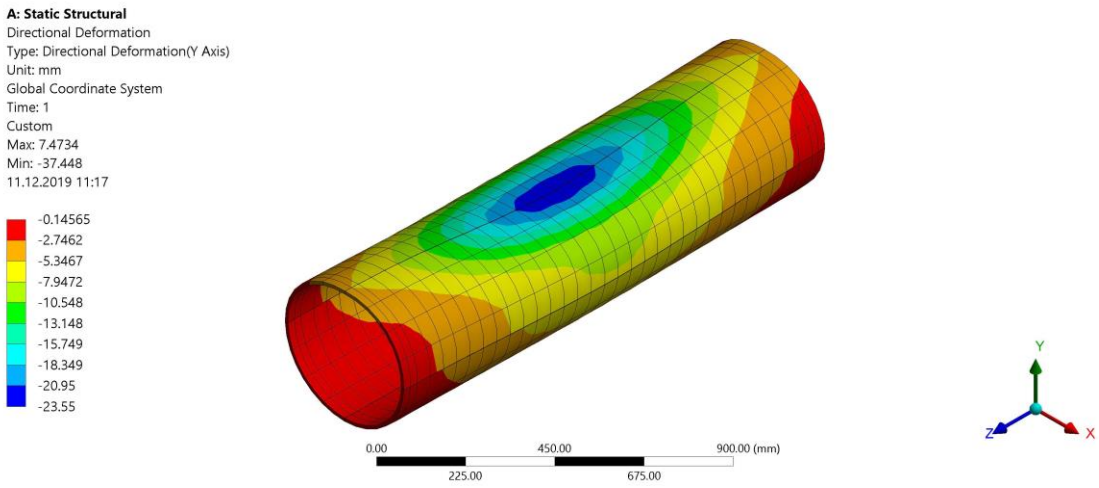


Şekil 6.16. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

Herhangi bir takviye uygulamanın yapılmadığı %45 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.17'de, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.17. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

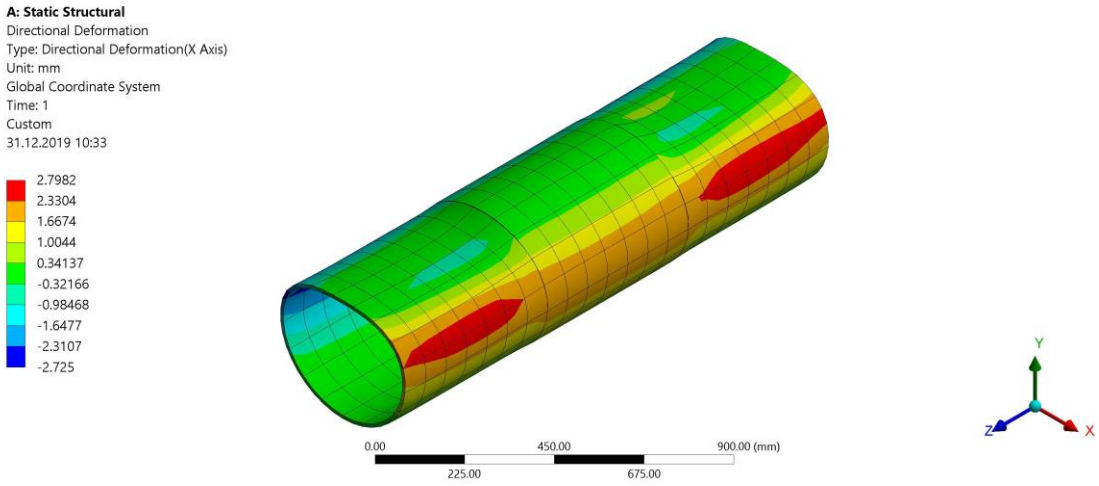


Şekil 6.18. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

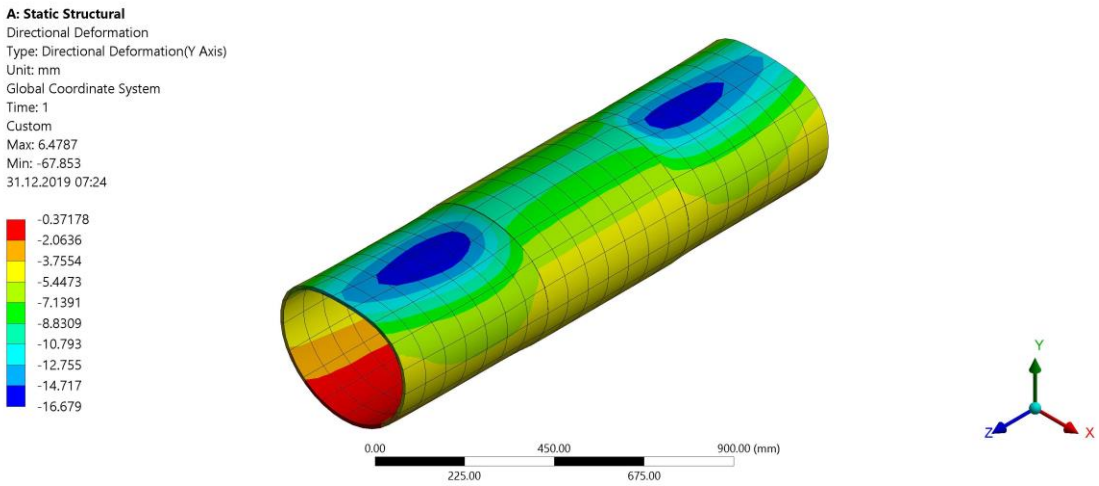
Relatif sıkılık değişkeni dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda, relatif sıkılık arttıkça tüm kesitler için hem taç hem de bel bölgesinde deplasman değerleri azalmaktadır. Laboratuvar deney sonuçları ile benzer deplasman azalma oranları gözlemlenen analizlerde, relatif sıkılık %45'ten %60'a yükseldiğinde taç bölgesi için %10, bel bölgesi için ise %22 daha az deplasman değerleri elde edilmiştir. Relatif sıkılığın %45'ten %75'e yükselmesi durumunda ise taç bölgesinde %33, bel bölgesinde %55 daha az deplasman değerleri elde edilmiştir.

6.9.2 Boru hattı ortasında atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Yarı kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak boru hattı ortasına (BHO = 600 mm'lik bir bölge) uygulandığı %75 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.19'da, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.20'de verilmiştir.

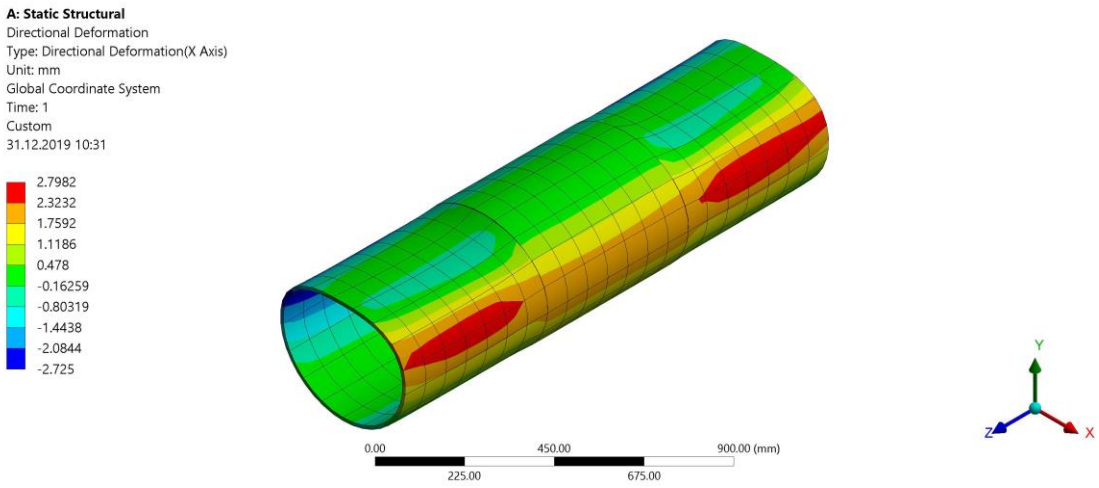


Şekil 6.19. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

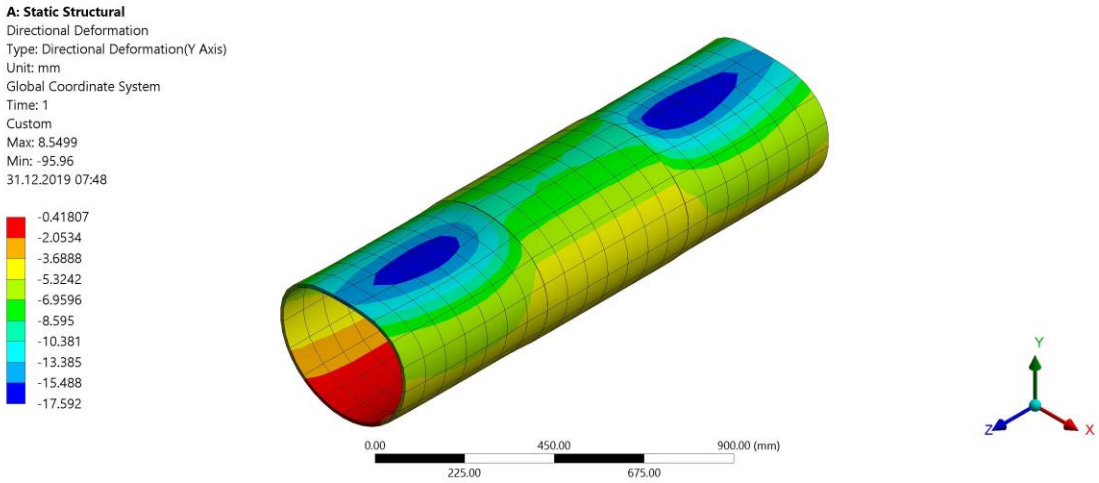


Şekil 6.20. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

Yarı kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak boru hattı ortasına (600 mm'lik bir bölge) uygulandığı %60 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.21'de, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.22'de verilmiştir.

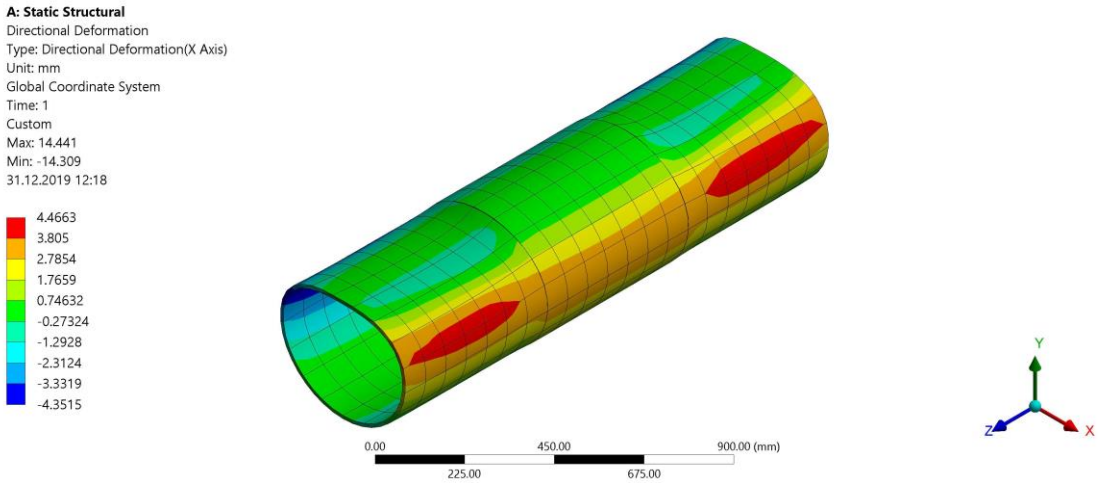


Şekil 6.21. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

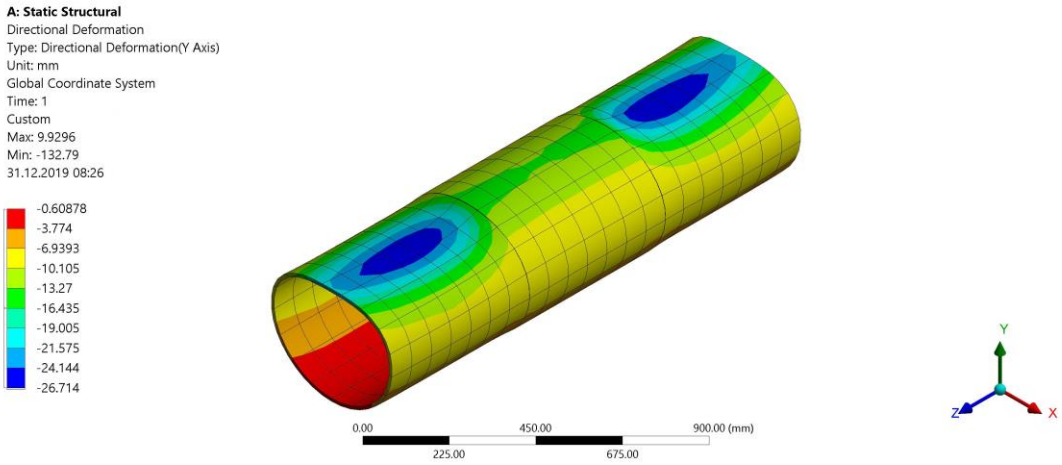


Şekil 6.22. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

Yarı kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak boru hattı ortasına (600 mm'lik bir bölge) uygulandığı %45 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.23'te, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.24'te verilmiştir.



Şekil 6.23. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

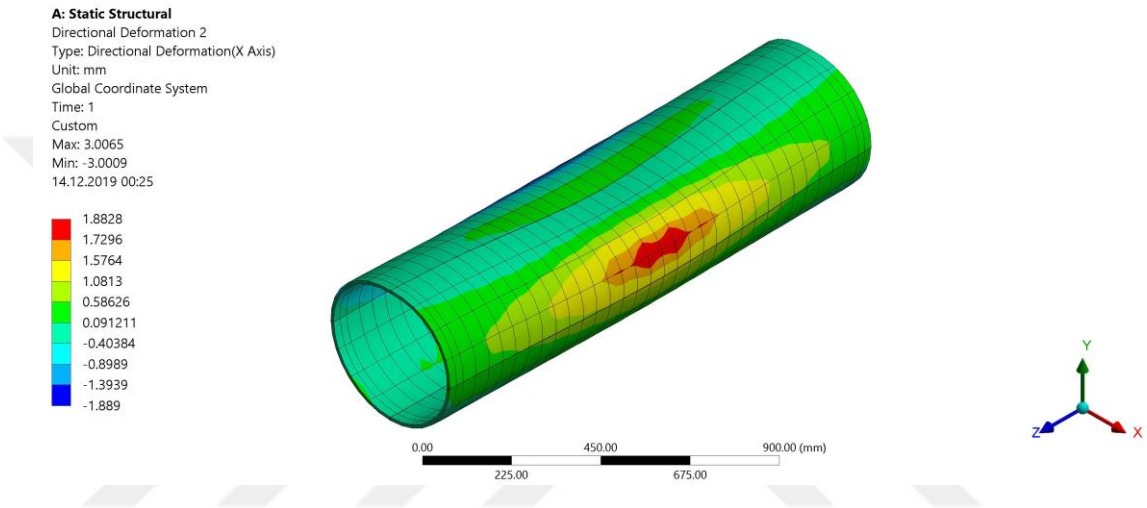


Şekil 6.24. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş sadece boru hattı ortasında yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

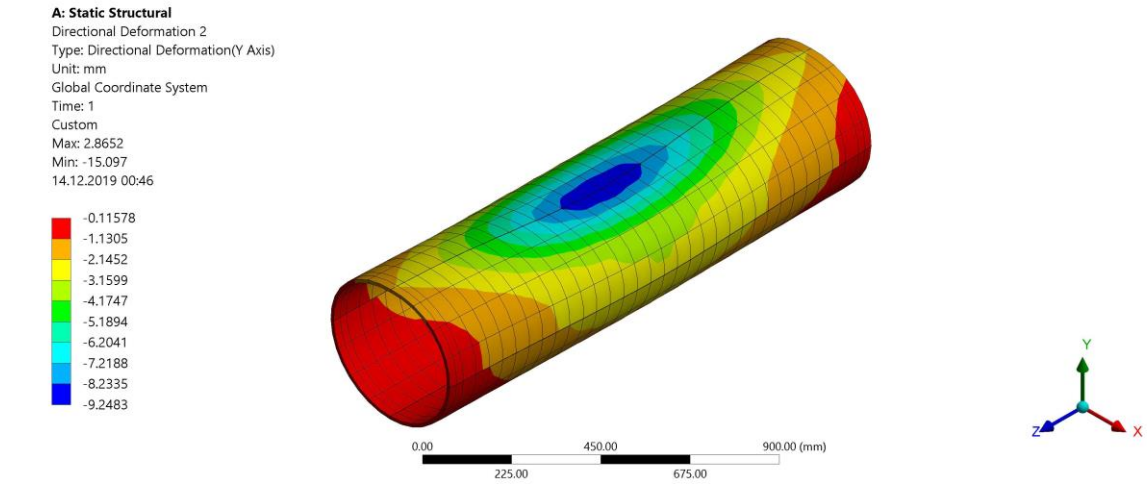
Boru hattı ortasında uygulanan yarı kesitli atık araç lastiklerinin etkinliğinin dikkate alındığı analizlerde, tüm relatif sıkılık değerleri için boru hattı orta kesiti olan L/2 mesafesindeki deplasman değerleri takviye bulunmayan kesitlere göre daha azdır. Ayrıca beklenildiği üzere, relatif sıkılık değeri arttıkça da aynı koşullar altında tüm kesitler için deplasman değerlerinde azalmalar laboratuvar deneyleri ile yaklaşık oranlarda elde edilmiştir.

6.9.3 Boru hattı boyunca atık lastiklerle güçlendirilmiş HDPE boru davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Yarı kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak boru hattı boyunca uygulandığı %75 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.25'te, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.26'da verilmiştir.

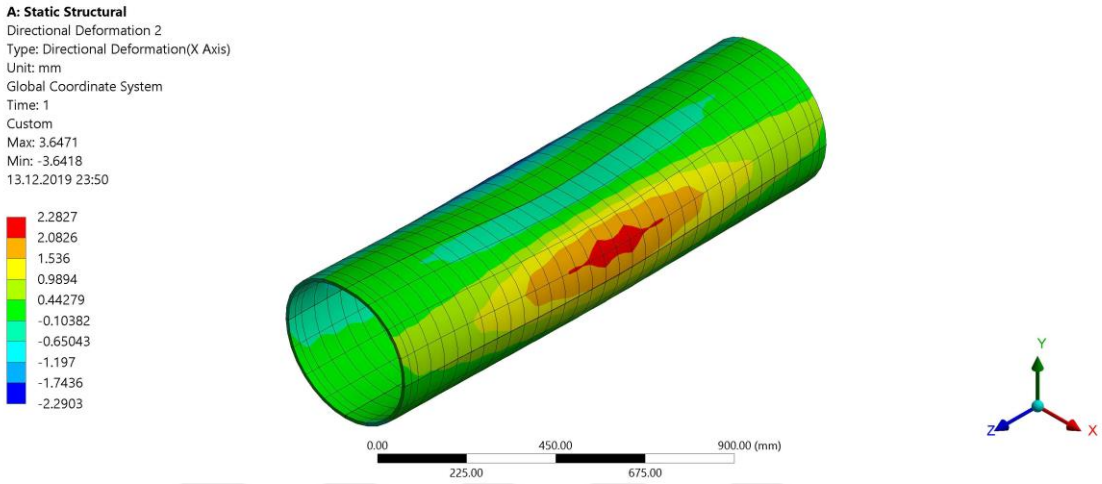


Şekil 6.25. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

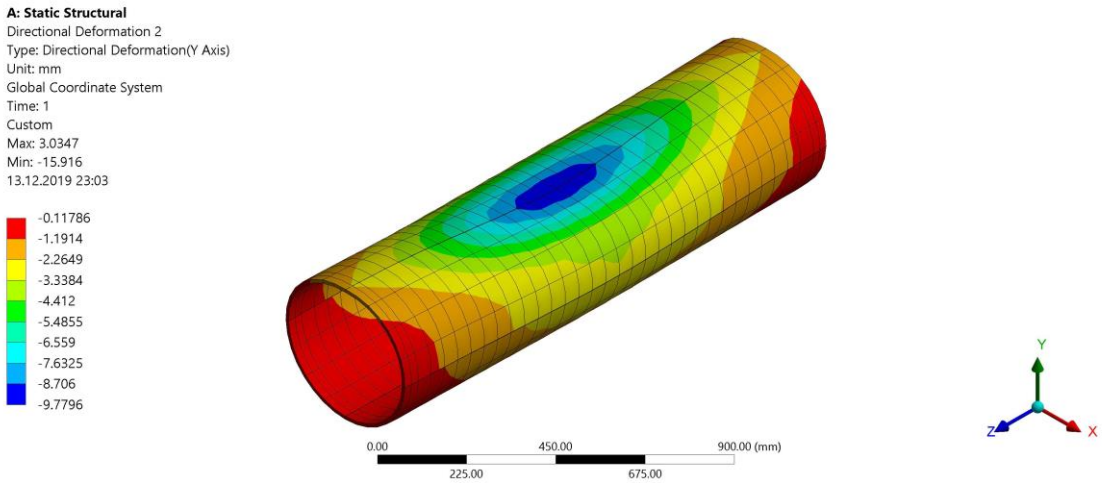


Şekil 6.26. %75 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

Yarı kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak boru hattı boyunca uygulandığı %60 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.27'de, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.28'de verilmiştir.

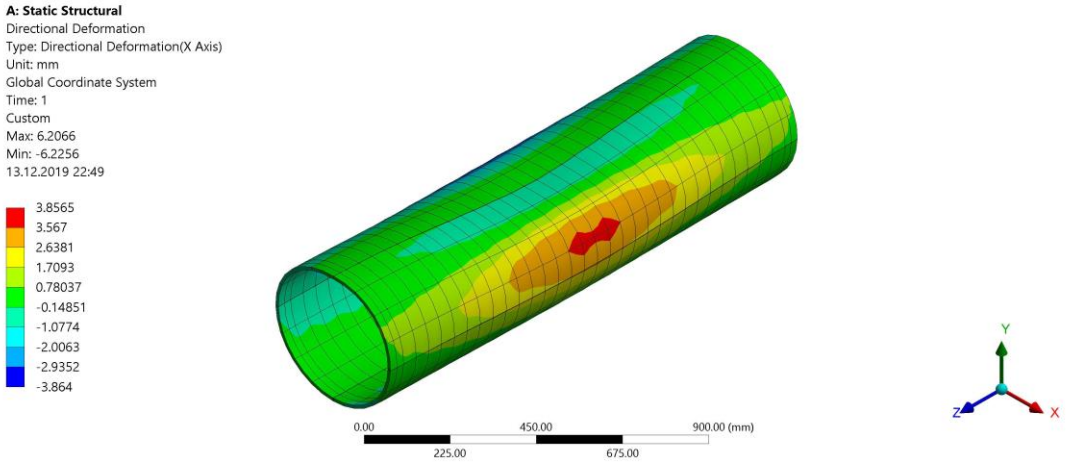


Şekil 6.27. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

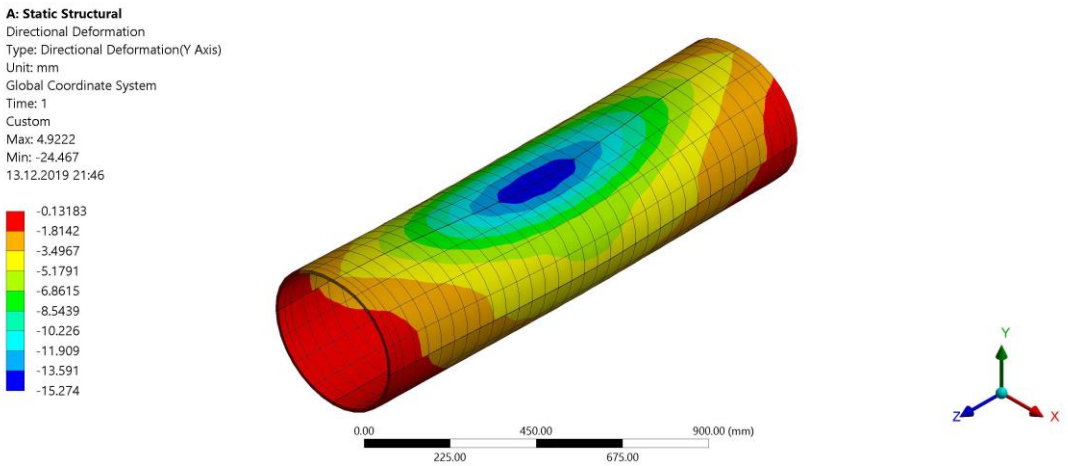


Şekil 6.28. %60 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

Yarı kesitli atık araç lastiklerinin takviye olarak boru hattı boyunca uygulandığı %45 relatif sıkılık koşullarında silis kumlu geridolgu ortamına gömülü borunun ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.29'da, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.29. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

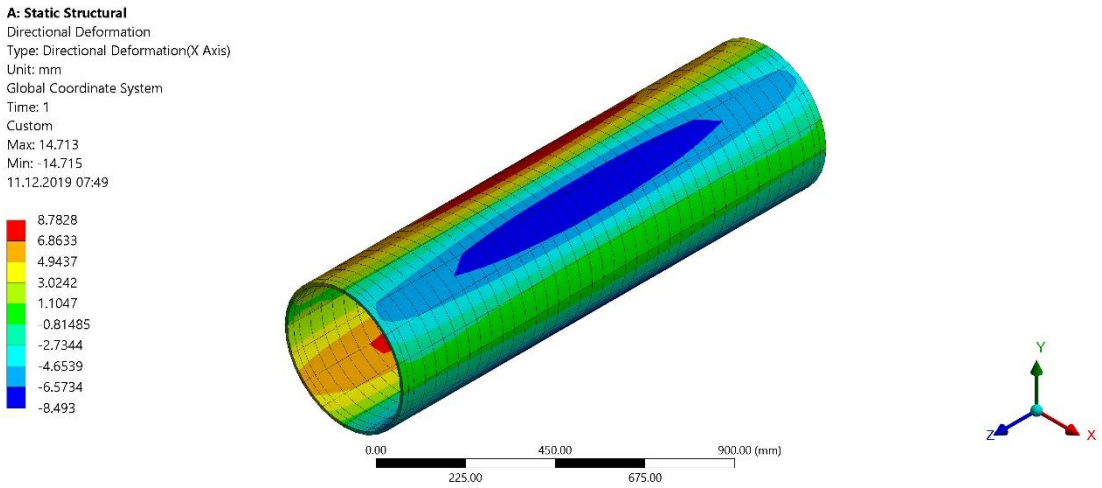


Şekil 6.30. %45 relatif sıkılık koşullarında geridolgu ortamına yerleştirilmiş boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli HDPE gömülü borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

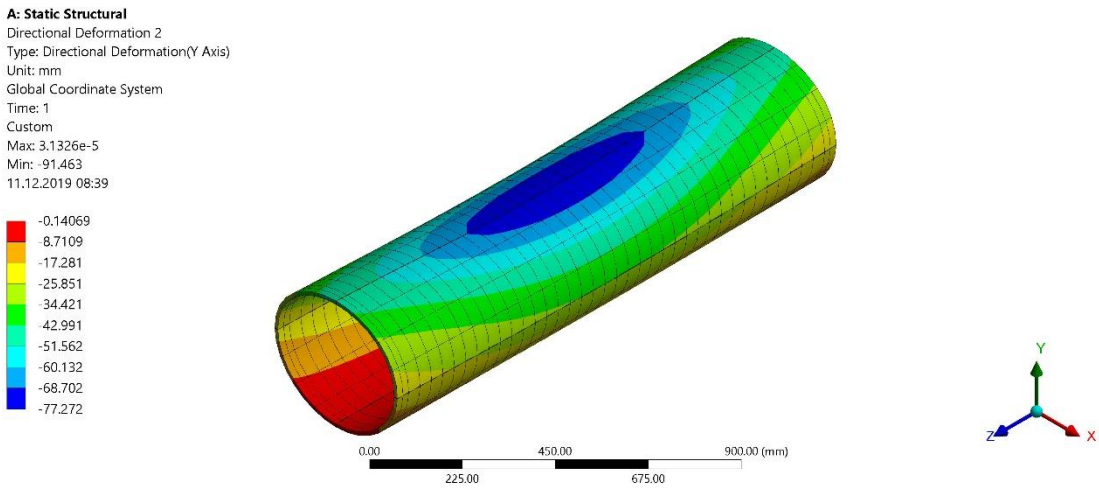
Tüm boruhattı boyunca uygulanan yarı kesitli atık araç lastik takviyelerinin etkinliğinin dikkate alındığı analizlerde, hat boyunca güçlendirme olduğunda dolayı tüm kesitlerde güçlendirme bulunmayan analizlere göre hem taç hem de bel bölgesi için daha düşük deformasyon değerleri elde edilmiştir. Boru hattı boyunca yarı kesitli atık araç lastik takviyeli deneylerde tüm kesitler için taç ve bel deplasman değerleri doğrudan relatif sıkılık ile değişmektedir. Diğer laboratuvar deneyleri ve analizlerde olduğu gibi bu deney grubunda da relatif sıkılık arttıkça deplasman değerlerinde azalmalar elde edilmiştir. En büyük deplasman değerlerinin gözlemlendiği L/2 mesafesi için takviye bulunan borularda takviye bulunmayan borulara oranla, %45 relatif sıkılık için taç bölgesinde %41 ve bel bölgesinde %57; %60 relatif sıkılık için taç bölgesinde %46 ve bel bölgesinde %56; %75 relatif sıkılık için ise taç bölgesi için %49 ve bel bölgesi için %48 daha az deplasman değerleri elde edilmiştir.

6.9.4 Kumlu yataklama ortamında ve kauçuk üstdolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Kauçuk üstdolgulu ortam koşullarında gömülü boru hattı üzerine herhangi bir takviye uygulamanın yapılmadığı modellerin ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre bel bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları Şekil 6.31'de, taç bölgesinde gözlemlenen deplasman dağılımları ise Şekil 6.32'de verilmiştir.



Şekil 6.31. Kauçuk üstdolgu ortamına gömülü HDPE borunun X ekseni yönünde deplasman kontürü.

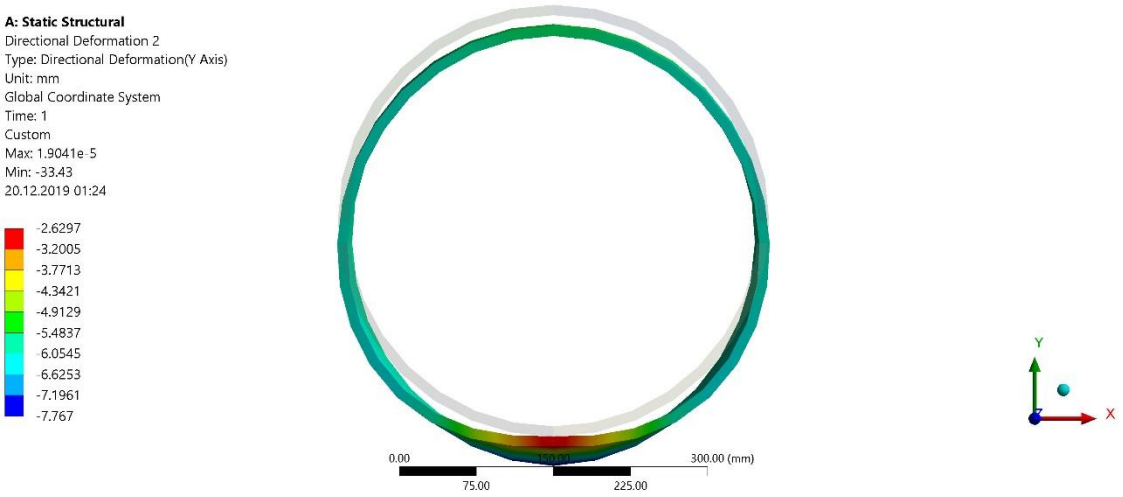


Şekil 6.32. Kauçuk üstdolgu ortamına gömülü HDPE borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü.

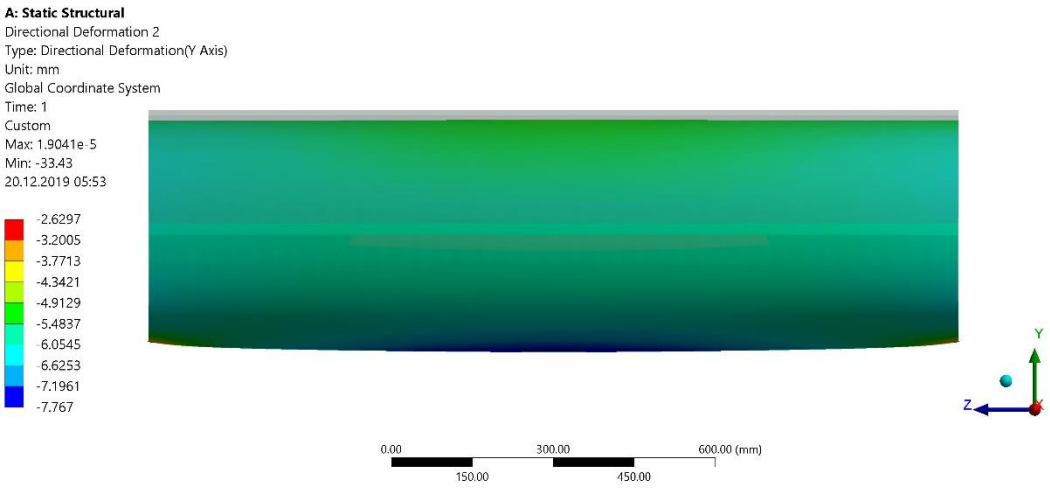
Kauçuk üstdolgu ortamındaki laboratuvar deneyi ve sonlu elemanlar analizi, üstdolgunun en yüksek sıkılık değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, en sıkı halde dahi boşluk oranının yüksek oluşu ve kauçuk granüller ile yatak malzemesinin elastisite modülleri arasındaki yüksek fark, aşırı oturmalara sebebiyet vermiştir. Düşey yükleme altında, en büyük deplasman değeri boru hattı ortasında diğer deney gruplarındaki ile benzer şekilde gözlemlenmektedir. Bel bölgesinde ise düşey yükleme etkisinde oluşan gerilme dağılımları boru omuz bölgelerinde daha yüksek değerlerdedir.

6.9.5 Kauçuk yataklama ortamında ve kumlu geridolgu ortamına yerleştirilmiş HDPE gömülü borunun deformasyon davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Kauçuk yataklamalı ortam koşullarında gömülü boru hattı üzerine herhangi bir takviye uygulamasının yapılmadığı modellerin ANSYS programından elde edilen analiz sonuçlarına göre her iki doğrultuda gözlemlenen davranışı temsil eden durum Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te verilmiştir.



Şekil 6.33. Kauçuk yataklamalı sistem içerisinde kumlu geridolgu ortamına gömülü HDPE borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü (X-Y doğrultulu).

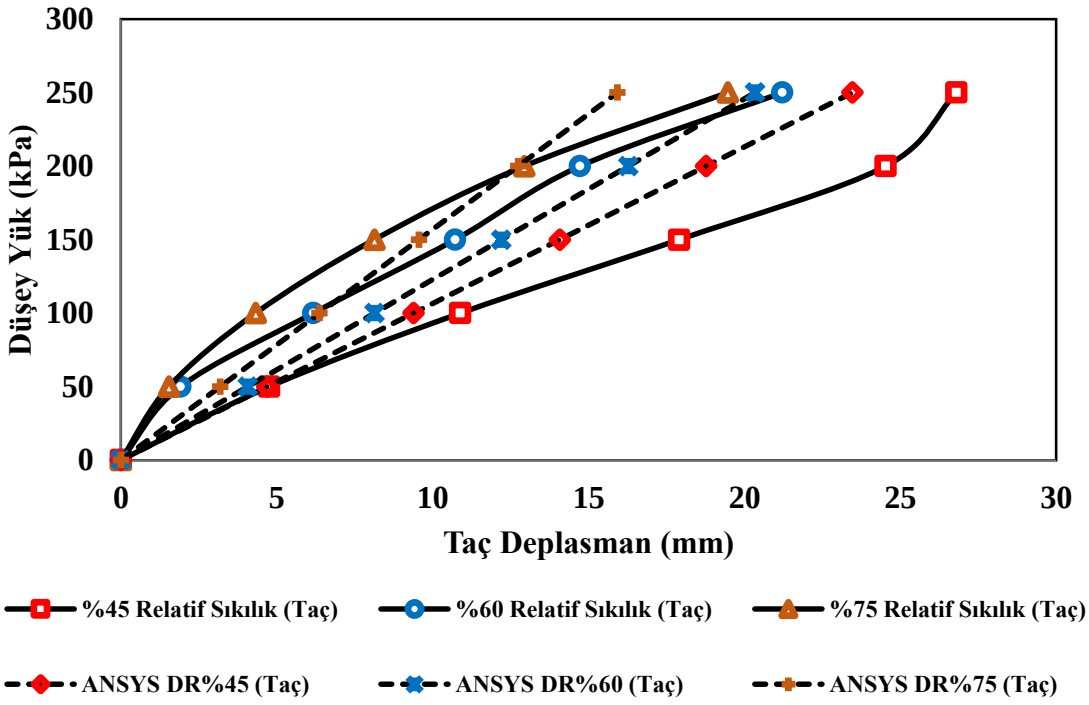


Şekil 6.34. Kauçuk yataklamalı sistem içerisinde kumlu geridolgu ortamına gömülü HDPE borunun Y ekseni yönünde deplasman kontürü (Y-Z doğrultulu).

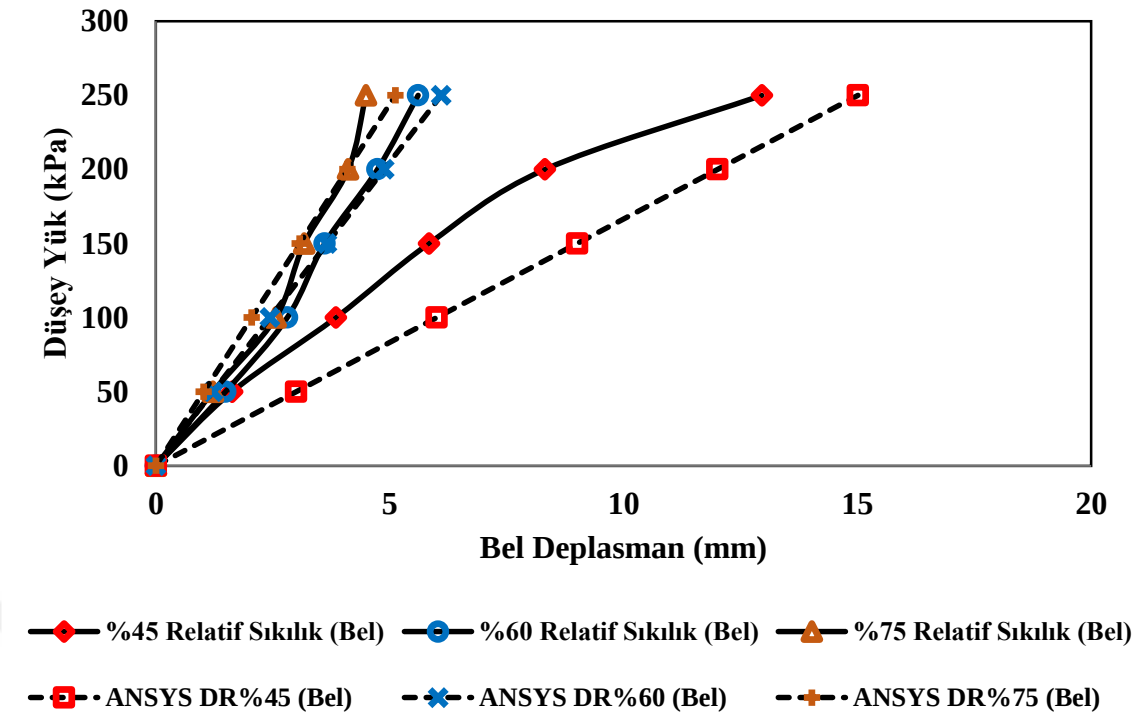
Düşey yükleme uygulanmaya başladığı andan itibaren silis kumlu geridolgu ortamı basıncı doğrudan boru üzerine aktararak hat üzerinde yer değiştirmelere sebep olmaya başlamıştır. Bu doğrultuda, kauçuk yataklama tabaka kalınlığı da eş zamanlı olarak azalmaya başlamıştır. Sonuç olarak bu sistemde gözlemlenen deplasman değerleri diğer deneylerden farklı olarak sistem yer değiştirmesini de içerisinde barındırmaktadır. Dolayısıyla, program çıktılarında boru üzerinden veriler toplam yer değiştirmeyi ifade etmektedir.

Diğer bir yandan söz konusu uygulamanın, sistem bütünlüğünü sağlamaması, stabil bir hat oluşturulmaması ve yüksek deformasyonlar sebebiyle kullanımı mümkün görünmemektedir. Sönümleme gereken kısımlarda önceki deney setlerinde olduğu gibi kritik kesitlere veya hattın tamamına uygulanacak takviyelerin çok daha efektif olduğu ileri sürülmektedir.

Relatif sıkılığın değişken olarak belirlendiği güçlendirme bulunmayan deneylerde, laboratuvar deney sonuçları ile ANSYS nümerik analiz sonuçlarının kıyaslandığı grafikler, düşey yük–taç deplasmanı karşılaştırmaları için Şekil 6.35'te, düşey yük–bel deplasmanı karşılaştırmaları için Şekil 6.36'da gösterilmiştir.



Şekil 6.35. Relatif sıkılık koşullarına göre laboratuvar deney sonuçları ve nümerik analiz sonuçlarının düşey yük–taç deplasmanı üzerinden karşılaştırılması.



Şekil 6.36. Relatif sıkılık koşullarına göre laboratuvar deney sonuçları ve nümerik analiz sonuçlarının düşey yük–bel deplasmanı üzerinden karşılaştırılması.

Laboratuvar deney sonuçları ile ANSYS program çıktıları karşılaştırıldığında, deplasman ve eğilme momenti değerleri bakımından tüm relatif sıkılık koşulları için birbiri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Nihai düşey yükleme altında, boruların birim deformasyon değişimleri incelendiğinde tüm deney setlerinde lineer bölgede kalınmıştır. HDPE boru üzerinde yapılan sabit hızda çekme testi sonucu belirlenen sınırlar kapsamında borunun %8 düşey deplasman (32 mm) yaptığı durumda doğrusal olmayan davranışa girilmektedir. Bu bakımdan, ANSYS program çıktılarından edinilen veriler doğrultusunda eğilme momenti değerleri nihai yükleme durumunda oluşturulmuş Çizelge 7.1'deki verilerle orantılı olarak değerlendirilmektedir.

ANSYS program çıktıları ile laboratuvar deneyleri kapsamında relatif sıkılık, yarı kesitli atık araç lastik takviyesi, takviye uygulanan kesit, granül kauçuk yataklama ve granül kauçuk üstdolgu değişkenleri doğrultusunda ve nihai yükleme altında elde edilen tüm sonuçlar ve çıkarımlar Bölüm 7'de (Deney Sonuçlarının Yorumlanması) ayrıntılı olarak verilmiştir.

7. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI

Deney sonuçları, düşey yüklemeler altında farklı relatif sıkılık koşullarındaki kumlu geridolgu ortamına gömülü HDPE esnek boruların deplasman, gerilme ve eğilme momentleri değerlerinin karşılaştırmasını içermektedir. Bunun yanında güçlendirmeli ve güçlendirmesiz durumlar altında boru davranışı ele alınmıştır. Güçlendirmeli durumlar için yarı kesitli atık araç lastiklerinin boru hattı ortasında ve boru hattı boyunca uygulanması değerlendirilmiştir. Bu doktora tezi kapsamında ayrıca granül atık araç lastiklerinin yataklama malzemesi ve geridolgu olarak kullanılabilirliği de değerlendirilmiştir. Yürütülen deneylerin nümerik analizleri ANSYS programında modellenerek deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Uygulamacıların basit ve hızlı tasarım formülleri de dikkate alınarak boru tasarım esasları bu ampirik formüller kullanılarak değerlendirilmiştir. Yukarıda bahsi geçen bütün deneylerden elde edilen veriler, nümerik analiz sonuçları ve amprik eşitliklerin grafik dağılımları Çizelge 7.1'de verilmiştir. Çizelgede, L/2 ifadesi boru uzunluğunun 750 mm'lik mesafesini tanımlarken L/4 ifadesi ise boru hattının 375 mm'lik mesafesini işaret etmektedir.

Boru taban kısmı için gerilme ve eğilme momenti değerleri, kauçuk malzemesi ile oluşturulan yataklama durumlu deneyler dışında tüm deneyler için en sıkı yataklama koşullarında çok küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu nedenle bu karşılaştırmalar grafiklendirilmemiştir. Buna mukabil, L/2 ve L/4 mesafesindeki taban eğilme momenti değerleri her bir yükleme kademesi için ayrıntılı olarak Bölüm 5'te (Laboratuvar Deneyleri) verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deney sonuçları, ANSYS çıktıları ve hesaplama yöntemleri verileri.

-No- Dr(%)	Uyg.	TAÇ			BEL			Analiz Türü
		Dep.*** L/2 (mm)	Eğ.Mom.** L/2 (kNm/m)	Eğ.Mom.** L/4 (kNm/m)	Dep.*** L/2 (mm)	Eğ.Mom.** L/2 (kNm/m)	Eğ.Mom.** L/4 (kNm/m)	
1) 45	-	26,80	0,094344	0,003795	12,96	0,091020	0,003711	**D**
2) 60	-	21,21	0,091134	0,003458	5,61	0,087229	0,002773	**D**
3) 75	-	19,47	0,073193	0,002190	4,58	0,034662	0,001088	**D**
5) 45	BHO	15,95	0,040702	0,003617	4,11	0,044165	0,003621	**D**
6) 60	BHO	11,37	0,040219	0,002363	2,96	0,032170	0,001258	**D**
7) 75	BHO	10,01	0,038284	0,002238	2,19	0,029440	0,001893	**D**
8) 45	BHB	14,65	0,041072	0,003309	3,96	0,039811	0,003242	**D**
9) 60	BHB	10,89	0,040826	0,001709	2,43	0,035383	0,001335	**D**
10) 75	BHB	9,65	0,037639	0,001993	1,91	0,031193	0,000989	**D**
11) 45	-	23,46	0,091279	0,003346	15,01	0,087640	0,003349	**A**
12) 60	-	20,34	0,088134	0,003094	6,10	0,081224	0,002267	**A**
13) 75	-	15,93	0,068117	0,001914	5,12	0,029771	0,000916	**A**
14) 45	BHO	15,18	0,039920	0,003385	3,89	0,041593	0,003364	**A**
15) 60	BHO	10,08	0,037883	0,002641	2,44	0,032118	0,002144	**A**
16) 75	BHO	9,71	0,036137	0,001977	1,99	0,027112	0,001672	**A**
17) 45	BHB	15,01	0,038125	0,002817	3,82	0,041174	0,003098	**A**
18) 60	BHB	9,76	0,037448	0,002203	2,24	0,031976	0,001987	**A**
19) 75	BHB	9,19	0,035469	0,001813	1,88	0,028003	0,001607	**A**
20) 45	-	19,85	0,093815	0,003557	9,92	0,083931	0,003982	**H**
21) 60	-	19,02	0,086943	0,003672	5,03	0,081642	0,002750	**H**
22) 75	-	18,65	0,076155	0,002129	4,61	0,034621	0,001521	**H**
23) 75	GKÜ	100	0,016590	0,000508	100	0,038911	0,000828	**D**
24) 75	GKY	100	0,019126	0,001686	1,21	0,008156	0,000222	**D**
25) 75	GKÜ	76,84	0,008191	0,000952	1,11	0,017982	0,008351	**A**
26) 75	GKY	29,11	0,092170	0,000178	0,09	0,002010	0,000078	**A**

- Dr (Relatif Sıkılık), *Uygulama; **Kesitteki maksimum eğilme momenti; ***Deplasman,
- BHO: Yarı kesitli atık araç lastiklerinin sadece boru hattı orta noktasında takviye olarak kullanıldığı uygulama,
- BHB: Yarı kesitli araç lastiklerinin boru hattı boyunca takviye olarak kullanıldığı uygulama,
- GKÜ: Granül kauçuk üstdolgulu deney,
- GKY: Granül kauçuk yataklamalı deney,
- Deplasman ve eğilme momenti değerleri nihai düşey yükleme altında maksimum değerlerdir,
- GKÜ ve GKY kodlu deneylerde en büyük deplasman değerleri 100 mm için yük=150 kPa'dır,
- D: Deney; A: ANSYS; H: Uygulama bulunmayan deneyler için hesaplama yöntemleri,
- Hesap yöntemleri bölümü için yapılan eğilme momenti işlemleri literatürde yer alan gerilme metotlarından elde edilen ε üzerinden yapılmıştır.

Yukarıdaki veriler ışığında elde edilen çıkarımları ayrı başlıklar altında değerlendirmek gerekirse:

Sıkılık koşullarının deplasman ve eğilme momenti büyüklüklerine etkisi:

- Güçlendirmeli deneylerin tümünde sıkılığın artması ile beraber deplasman ve eğilme momenti değerlerinde önemli ölçüde düşüşler gözlemlenmiştir.
- Deneylerden elde edilen en önemli sonuçlardan biri sıkılığın boru davranışına olan etkisidir. Nitekim bütün deneyler için relatif sıkılık %75'ten %60'a düştüğü anda L/2 mesafesi taç deplasman değerleri yaklaşık ortalama %25 artmıştır. Relatif sıkılığın %75'ten %45'e düştüğü durumlar için ise bu artış %33 olarak gözlemlenmiştir.
- Relatif sıkılığın %60'tan %45'e azaldığı koşullarda da bu artış yaklaşık %10 olarak ölçülmüştür. Diğer bir yandan, yine tüm deneyler için relatif sıkılık %75'ten %60'a düştüğü anda L/2 mesafesi bel deplasman değerleri yaklaşık ortalama %41 artmaktadır. Relatif sıkılık %75'ten %45'e düştüğü durumlar için ise bu artış %55 olarak gözlemlenmiştir. Relatif sıkılığın %60'tan %45'e azaldığı koşullarda da deplasman artışı yaklaşık %22 olarak ölçülmüştür.
- Relatif sıkılık düşüşüne bağlı olarak yukarıda değinilen deplasman artış oranları aynı koşullar için yaklaşık olarak eğilme momentlerinde yaşanan düşüşler ile paralel sonuçlar göstermektedir.
- ANSYS sonlu elemanlar analizi sonuç çıktılarında da yukarıdaki sonuçlar ile uyumlu veriler elde edilmiştir. Relatif sıkılığın azalması benzer şekilde deplasman ve eğilme momenti artışlarına neden olmuştur.

Yarı kesitli atık araç lastikleri ile güçlendirme uygulamasının gömülü esnek boru deplasman ve eğilme momentleri değerlerine etkisi:

- Beklenidiği gibi yarı kesitli atık araç lastikleri kullanılan tüm deneylerde aynı relatif sıkılık koşulları için, takviyenin bulunduğu bölgedeki deplasman ve eğilme moment değerleri güçlendirmesiz deneylere göre daha düşük değerlerde gözlemlenmektedir.
- Deney verileri incelendiğinde, aynı relatif sıkılık koşulları için yarı kesitli atık araç lastik takviyelerinin, boru hattı ortasında ve boru hattı boyunca

uygulanması L/2 mesafesi için deplasman ve eğilme momentleri bakımından çok yakın değerler vermiştir. Takviyelerin bulunmadığı bölgelerdeki deplasman ve eğilme momentleri, uygulama bulunmayan modellere göre (L/4 mesafesinde) daha yüksektir.

- Hat ortasında yarı kesitli atık araç lastikleri kullanılan deneylerde L/2 mesafesi için taç bölgesi deplasman değerleri yaklaşık olarak %75 relatif sıkılık için %49, %60 relatif sıkılık için %46 ve %45 relatif sıkılık için %41 azalmıştır. Aynı şekilde taç bölgesi eğilme momentleri için de %75 relatif sıkılık için %48, %60 relatif sıkılık için %56 ve %45 relatif sıkılık için %57 azalma gözlemlenmiştir.

Kauçuk üstdolgunun dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin değerlendirmesi ele alınırsa:

- 500 mm tabaka kalınlıklı kauçuk granüllü üstdolgulu sistemde, 100 kPa'lık düşey yükleme adımına kadar olan deney süresince boru üzerindeki deplasman ve eğilme momentleri sadece üstdolgunun sıkışmasına bağlı değerler olarak yansımıştır. Maksimum sıkılıkta yerleştirilen üstdolgunun düşey yükleme altında üzerine aktarılan gerilmeleri sönümlemiştir. Bununla birlikte gömülü esnek boru üzerine aktarılan gerilmeler boru hattı üzerinde çok küçük deplasman ve eğilme momenti büyüklükleri oluşturmuştur.
- Kauçuk üstdolgu sebebiyle yükleme plakasının referans alındığı seviye, henüz boru üzerine kaydadeğer gerilmelerin ulaşmadığı anlarda %5 deplasman limitinin çok üzerinde bir deplasman gözlemlendiği için söz konusu sistemin arazide kullanılması mümkün görünmemektedir. Deneyler sonucunda, kauçuk materyalin gerilme sönümleme etkilerinin avantajından yararlanmak ve aşırı oturmanın dezavantajlarından kaçınmak için kauçuk malzemenin takviye olarak boru hattı üzerinde kullanılması ön plana çıkmıştır.
- ANSYS analizleri sonucunda da kauçuk materyalin kullanıldığı bölgelerde aşırı şekil değiştirmeler gözlemlendiği için ve malzemenin karakteristik özellikleri gereği Bölüm 6'da detaylı olarak anlatılan hiperelastik malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu veriler ışığında, nihai düşey yükleme altında elde edilen ekstrem değerler (maksimum ölçüm kapasitesi=100 mm) laboratuvar

deneyleri sonucunda da izlenmiş olup sonuçların karşılaştırılabilmesi için veriler 150 kPa düşey yükleme sınırlarına kadar yapılmıştır.

Kauçuk yataklama tabakasının sisteme getirdiği sakıncalar:

- Laboratuvar deneyleri kapsamında yataklama tabakası diğerlerine göre farklı olarak incelenen bu deneyde, düşey yükleme başladığı andan itibaren kutu – boru temas yüzeyi ile beraber boru hattı düşey yönlü harekete eğilim göstermiştir. Her yükleme adımında boru hattı üzerinde deplasman değerleri içerisinde sistemin toplam yer değiştirme değeri de yer almıştır. Böylelikle net deplasmanın tayini, toplam yer değiştirme değerinden potansiyometrik cetvel okumasının çıkarılması ile elde edilmiştir.
- Düşey yüklemenin oluşturduğu gerilmeler silis kumlu geridolgu malzemesi üzerinden direkt olarak gömülü esnek boru üzerine etkimektedir. Ancak bu deneyde yataklama malzemesi de esnek olarak seçildiği için sistemin bütünleşik bir davranışta hareket etmesine sebep olmaktadır. Bu bakımdan, uygulamacılar açısından literatür, yönetmelikler ve şartnamelerde belirtildiği şekilde standart bir yataklama tabakasının hazırlanması gerekmektedir.
- Sonuç olarak yataklamada takviye bakımından, lastik parçaları, kauçuk granüller vb. esnek malzemelerin parçalı, kırçıllı veya granüllü biçimlerde kullanımının söz konusu etkilerden dolayı sakıncalı olduğu kanaatine varılmıştır. Bu tip atık esnek materyallerin kompakt ve bütüncül bir şekilde sisteme dahil edilmesinin ise kritik kesitlerde deformasyonların azalmasını sağlayacağı öne sürülmüştür.

Bu çalışmada, gömülü esnek boruların deformasyon davranışları incelenirken, literatürde yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemlerinden, büyük ölçekli laboratuvar deneylerinden ve laboratuvar deney koşullarını birebir yansıtan modellerin kullanıldığı ANSYS sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Literatürde modeller oluşturulurken, düzlem gerilme durumunun dikkate alınmasından dolayı modelin genellikle 2D olarak kullanılması tercih edilmektedir. Bu çalışmada ise atık lastiklerin hat boyunca farklı kesitlerde uygulanması, kritik kesitlerde meydana gelen gerilme farklarının belirlenmesi, sınır koşullarının incelenmesi ve gerçek modelin oluşturulmasında tüm parametrik etmenlerin yansıtılmasının hedeflenmesi sebebi ile

3D model kullanılmıştır. Sıkılık koşullarına göre 5 ile 6 ton aralığındaki zemin ortamı içerisinde düşey yüklemeye maruz gömülü esnek boruların yük teorileri çerçevesinde değerlendirilmesinde; yük aktarımı, materyaller arası sürtünme özelikleri, sınır koşulları ve zemin - boru etkileşimleri birebir karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Her bir ayrı durumda tüm kesitler için düzlem gerilme ve eksenel simetrik durumları bakımından araştırmalar sürdürülmektedir. Çalışmanın sonraki aşamalarında, deney verileri ve hesaplama yöntemleri baz alınarak söz konusu iki modelin kıyaslanması ve değerlendirilmesi hedefler arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

Abdulaliyev, Z., Bulut, O. ve Ataoğlu, Ş., 2017. Gömülü esnek borularda gerilme analizi.

Ahlvin, R.G. ve Smoots, V.A., 1988. Construction guide for soils, John Wiley & Sons Inc., New York.

Akınay, E., 2010. Gömülü esnek boru davranışının incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Akınay, E. ve Kılıç, H., 2016. Gömülü esnek boru tasarımında Iowa ile Alman yaklaşımlarının karşılaştırılması, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Akınay, E., Kılıç, H. ve Rouzegari, B., 2016. Gömülü esnek boru üzerindeki zemin gerilmelerinin EPS geofoam ile azaltılması, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Akyelken, F. ve Kılıç, H., 2019. Investigation of effects of EPS material use on buried flexible pipe behavior by numerical analysis, 8th Geotechnical Symposium, İTÜ, İstanbul.

Alam S., Allouche, E. N., Bartlett C., Sherpa A. ve Keil B., 2013. Experimental evaluation of soil-pipe friction coefficients for coated steel pipes, Pipelines, ASCE, 360-371.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1996. Standart specification for highway bridges, 16th Edition American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington. D.C/ ABD.

American Foundrymen Society (AFS), 2015. Mold and core test handbook, Fourth Edition, ISBN: 0-87433-228-1.

American Society of Civil Engineers (ASCE), 1993. Standard practice for direct design of buried precast concrete pipe using standard installation (ASCE93-15).

American Society of Civil Engineers (ASCE), 2000. Journal of transportation engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 440-447.

Anon., 1976. Boru hatlarının teknik ve işletme karakteristikleri, altyapı maliyeti ve işletme giderleri ulaştırma bakanlığı ulaştırma koordinasyon idaresi, Yayın No: (199.088) UKİ 5.094, Ankara.

Anon., 2005. Vertical soil arching, www.geosyscorp.com/Documents/VertSA.pdf.

ASTM D6270-98, 2004. Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications.

ASTM B 788/B 788M., 2004. Standard practice for installing factory-made corrugated aluminum culverts and storm sewer pipe, West Conshohocken, United States.

ASTM D2321, 2008. Standard Practice for Underground İnstallation of Thermoplastic Pipe for Sewers and Other Gravityflow Applications.

ASTM D648-07, 2007. Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position, West Conshohocken, PA: ASTM.

ASTM D638-10, 2010. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohocken, PA: ASTM.

ASTM D792-13, 2013. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, West Conshohocken, PA: ASTM.

ASTM D 3034, 2013. For Elastomeric-Seal Joints or ASTM D 3034 for Elastomeric Gasket Joints, 2. Join Dissimilar Pipe Materials with Nonpressure-Type, Flexible Couplings.

ASTM D2487-93, 1995. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM Designation D2487-93. Annual Book of ASTM standards, West Conshohocken, 4.08.

ASTM D698, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, In Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia (PA): ASTM.

Arockiasamy, M., Chaallal, O. ve Limpeteeprakarn, T., 2006. Full-scale field tests on flexible pipes under live load application, Journal of performance of constructed facilities, 20, 1, 21-27.

Automotive Design, 2015. Advanced nonlinear simulationansys, Advantage Volume Ix | Issue 2.

Ayalp, Ö. G., 2006. Gömülü borulara etkiyen zemin yüklerinin bulunması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

American Water Works Association (AWWA), 2002. Standart specification for plastic pipes, ABD.

Azizian, M., Tafreshi, S. M. ve Darabi, N. J., 2020. Experimental evaluation of an expanded polystyrene (EPS) block-geogrid system to protect buried pipes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 129, 105965.

Balkaya, M., 2002. Zemine gömülü boruların mühendislik davranışı, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Başar, Y. ve Itskov, M., 1998. Finite element formulation of the Ogden material model with application to rubber - like shells, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42(7), 1279-1305.

Bekhiti, M., Trouzine, H. ve Asroun, A., 2014. Properties of waste tire rubber powder, Engineering, Technology & Applied Science Research, 4, 4, 669-672.

Bildik, S., 2013. Farklı zemin ve yükleme koşullarındaki gömülü boru sistemlerinin davranışının araştırılması, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Boussinesq, J., 1885. Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et mouvement des solides elastiques, Gauthier–Villard, Paris.

Brachman, R. W. I., 1999. Structural performance of leachete collection pipes, PhD Thesis, Department of Civil and Enviromental Eng. University of Western Ontario, London/Kanada.

BS 2782-3, 1993. Methods of Testing Plastics, Mechanical Properties, Determination of Tensile Strength and Elongation at Break of Polytetrafluoroethylene Products, London: BSI.

BS 9295, 2010. Guide to the Structural Design of Buried Pipelines, BSI, London, UK.

Bull, J.W., 2002. Soil structure interaction: numerical analysis and modeling, Chapman&Hall, London.

Burns, J.,Q. ve Richard, R. M., 1964. Attenuation of stresses for buried cylinders, Proc. of Soil Symposium on Soil-Structure Interaction, Univ. of Arizona pp 379-392.

Cameron, D. A., 2005. Analysis of buried flexible pipes in granular backfill subjected to construction traffic.

Canadian Council of Ministers of the Environment, 1994.

CEN/TS 12201-7, 2014. Plastics Piping Systems for Water Supply - Polyethylene (PE) - Part 7: Guidance for the Assessment of Conformity.

Chatterjee, S., White, D. J. ve Randolph. M. F., 2012. Numerical simulations of pipe–soil interaction during large lateral movements on clay, Geotechnique 62, 8, 693–705.

Cheuk, C. Y., White, D. J. ve Dingle, H. R. C., 2008. Upper bound plasticity analysis of a partially - embedded pipe under combined vertical and horizontal loading, Soils Found, 48, 1, 133–140.

Cho S., 2003. Behaviour of flexible plastic pipes with flowable backfill in trench conditions, Phd Thesis, University of Houston, ABD.

Choollun, V. K., Wijeyesekera, D. C., Potter, R. ve Walsh, J. W., 2009. Photoelastic method revisited for residual stress measurement in high density polyethylene pipes.

Chua, K. M. ve Lytton, R. L., 1989. Viscoelastic approach to modeling performance of buried pipes, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 115, No. 3, pp.253-269.

Conradie, J. M., Els, P. S ve Heyns, P. S., 2016. Finite element modelling of off-road tyres for radial tyre model parameterization, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 230(4), 564-578.

Cooper, G. A., 1994. Directional drilling, Scientific American, 270, 5, 82-87.

Cui, X. Z., Jin, Q., Cui, S. Q., Wang, Y. L., Zhang, L. ve Wang, Z. X., 2018. Laboratory tests on the engineering properties of sensor-enabled geobelts (SEGB), Geotextiles and Geomembranes, 46, 1, 66-76.

Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R. ve Rajagopal, K., 2001. Bearing capacity of strip footings supported on geocell - reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 19, 4, 235-256.

Dash, S. K., Sireesh, S. ve Sitharam, T. G., 2003. Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay, Geotextiles and Geomembranes, 21, 4, 197-219.

Dash, S.K., Rajagopal, K. ve Krishnaswamy, N.R., 2007. Behaviour of geocell reinforced sand beds under strip loading, Canadian Geotechnical Journal 44, 905-916.

Demiralp, H.G., 2017. Depremin kanalizasyon ve içme suyu sistemlerine etkisi, İller Bankası Anonim Şirketi, Uzmanlık Tezi, İlbank.

Demirci, H.E., 2014. An investigation on behaviour of buried pipelines subjected to transverse permanent ground deformation, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dezfooli, M. S., Abolmaali, A. ve Razavi, M., 2014. Coupled nonlinear finite-element analysis of soil–steel pipe structure interaction, International Journal of Geomechanics, 15, 1, 04014032.

Drescher, A., Newcomb, D. ve Heimdahl, T., 1999. Deformability of shredded tires, Final Report, Minnesota Local Road Research Board, Minnesota Department of Transportation Office of Research Services.

Dutta, S., Hawlader, B. ve Phillips, R., 2015. Finite element modeling of partially embedded pipelines in clay seabed using coupled Eulerian-Lagrangian method, Can. Geotech. J. 52, 1, 58–72.

DVS 2207-1, 2005. Welding of thermoplastics - heated tool welding of pipes, pipeline components and sheets made of PE-HD, ISO 21307.

Edeskär, T., 2004. Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications, Luleå tekniska universitet.

El Naggar, H., 2011. Cenrifuge tests for static and seismic soil – culvert interaction (SCI) of square box culvert inside a dry cohesionless soil, University of Western Ontario.

EN 12201-3, 2014. Plastics Piping Systems for Water Supply and for Drainage and Sewerage Under Pressure - Polyethylene (PE) - Part 3: Fittings.

EN ISO 178, 2003. Plastics - Determination of Flexural Properties, (ISO 178: 2001).

Erkek, M., Kaya, N. ve Güven, C., 2015. Kauçuk burçların hiperelastik modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering, 20(1), 65-74.

Fattah, M. Y. ve Redha, W. B. M., 2016. Effect of geocell reinforcement in the mitigation of traffic loads transmitted to the flexible buried pipes, Global Journal of Engineering Science and Research Management, 3, 7, 118-128.

Gattis, J. L. ve Everett, J. W., 1996. Evaluation of culvert pipe made from waste truck tires, Transportatıon Research Record 1541, 1, 140-146.

Gaube, E. ve Mueller, W., 1981. 12 years of deformation measurements on sewer pipes from Kostalen GM 5010, In Proc., Int. Conf. on Underground Plastic Pipe (pp. 272-278), New Orleans.

Giurgiu, T., Ciortan, F. ve Pupaza, C., 2012. Static and transient analysis of radial tires using ANSYS, Recent Advances in Industrial and Manufacturing Technologies.

Greenwood., M., E. ve Lang., D.C., 1990. Vertical deflection of buried flexible pipes, Buried Plastic Pipe Technology, ASTM STp 1093 Philedephia /ABD.

Halabian, A. M. ve Hokmabadi, T., 2018. A new hybrid model for rigorous analysis of buried pipelines under general faulting accounting for material and geometrical non-linearities with focusing on corrugated HDPE pipelines, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 115, 1-17.

Han, T. H., Oh, M. H., ve Kang, Y. J., 2012. Design of end plate stiffeners and curved connection of buried corrugated pipes for stress reduction, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 12, 2, 9-15.

Han, T. H., Kim, H. S., Jang, Y. D., Park, Y. H. ve Kang, Y. J., 2010. Behavior analysis of buried GFRP pipes and flanges, Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, 1, 1, 27-33.

Hassan K., Alam, S., Bartlett C. ve Allouche E. N., 2014. Experimental investigation of soil-pipe friction coefficients for thermoplastic pipes installed in selected geological materials, North American Society for Trencless Technology (NASTT), Florida, USA.

Hater, G. R., Green, R. ve Hamblin, G., 2001. Sequential aerobic/anaerobic solid waste landfill operation, U.S. Patent No. 6,283,676. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Hauch, S. R. ve Bai, Y., 2000. Bending moment capacity of pipes, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 122, 4, 243-252.

Hegde A. M. ve Sitharam T. G., 2015. Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells, Geotextiles and Geomembranes, 43(5):372-81.

Herd, I. M., Herd, G., Jenkins, L. C. ve Maxwell, J. E., 1998. Water drainage and collection system and method of construction, U.S. Patent No. 5, 823, 711. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Hodder, M. S. ve Cassidy, M. J., 2010. A plasticity model for predicting the vertical and lateral behaviour of pipelines in clay soils, Geotechnique 60, 4: 247–263.

Hoeg, K., 1966. Pressure distiribution on underground structural cylinders, Technical Report No. AFWL TR 65-98 Kirtland Air Force Base /ABD.

Hosseini, M. ve Ajideh, H., 2001. Seismic analysis of buried jointed pipes considering multi-node excitations and wave propagation phenomena, In Pipelines 2001: Advances in Pipelines Engineering and Construction (pp. 1-12).

Howard, A., 1996. Pipeline installation, Relativity Publishing, Colorado.

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.

Hwang, H. H. M., Lin, H. ve Shinozuka, M., 1998. Seismic performance assesment of water delivery systems, Journal of Infrastructure Systems,September 1998, 118-125.

IS 11273, 1992. Woven Roving Fabrics of ‘E’ Glass Fibre, New Delhi, India: BIS.

IS 11551, 1996. Glass Fibre Chopped Strand Mat for the Reinforcement of Epoxy, Phenolic and Polyster Resin Systems, New Delhi, India: BIS.

IS 11320, 1997. Glass Fibre Rovings for the Reinforcement of Polyster and of Epoxide Resin Systems, New Delhi, India: BIS.

ISO 11922-1, 1997. Thermoplastics Pipes for the Conveyance Of Fluids - Dimensions and Tolerances - Part 1: Metric Series.

ISO 21004, 2006. Plastics Piping Systems - Multilayer Pipes and Their Joints, Based on Thermoplastics, for Water Supply.

ISO 4065, 1996. Thermoplastics Pipes - Universal Wall Thickness Table.

ISO 6259-1, 2004. Termoplastik Borular - Çekme Özelliklerinin Tayini - Bölüm 1: Genel Deney Yöntemleri.

ISO 6259-3, 2015. Termoplastik Borular - Çekme Özelliklerinin Tayini - Bölüm 3: Poliolefin Borular.

ISO/TR 10358, 1993. Plastics Pipes and Fittings - Combined Chemical-Resistance Classification Table.

Islam, M. R. ve Al-Masud, M. A., 2011. Numerical analysis of a corrugated metal pipe: A case study, International Journal of Applied Engineering Research, 2, 1, 250.

İşkan, E., 2001. Zemine gömülü boruların sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Jahromi, H. F. Jafarzadeh, F. ve Zakaria, M. S., 2018. Experimental study of burial depth effect on embedded pipe deformations in sandy slopes under dynamic landsliding, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 114, 281-297.

Jeyapalan, J. K. ve Balasubramaniam, B. K., 1995. Underground pipeline materials, design, and construcion, ASCE, New York, 25-42.

Ji, X., Zhao, W., Ni, P., Barla, M., Han, J., Jia, P. ve Zhang, C., 2019. A method to estimate the jacking force for pipe jacking in sandy soils, Tunnelling and Underground Space Technology, 90, 119-130.

Jonasson, T., ve Watkins, M. 1998. Microtunneling: an owner's perspective, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 3, 2, 56-59.

Karen, İ., Kaya, N., Öztürk, F. ve Korkmaz, İ., 2008. Motor titreşim takozlarının istenen özelliklerde tasarımı ve doğrulaması, 4. Otomotiv Teknolojileri Kongresi – OTEKON'08, Bursa.

Kawabata, T., Mohri, Y. ve Ling, H. I., 2002. Earth pressure distribution for buried pipe bend subject to internal pressure, In Pipelines 2002: Beneath Our Feet: Challenges and Solutions (pp. 1-2).

Khalaj, O., Darabi, N. J., Tafreshi, S. M. ve Mašek, B., 2017. Protection of buried pipe under repeated loading by geocell reinforcement, In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95, 2, IOP Publishing.

Kılıç, H. ve Akınay, E., 2019. Effects of using EPS geofoam as compressible inclusion on HDPE pipe behavior, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 10, 2, 04019006.

Kienow, K. K. ve Prevost, R. C., 1989. Pipe/soil stiffness ratio effect on flexible pipe buckling threshold, Journal of Transportation engineering, 115, 2, 112-129.

Kong, D., Martin, C. M. ve Byrne, B., 2017. Sequential limit analysis of pipe-soil interaction during large-amplitude cyclic lateral displacements.

Kuo, N. W., Liu, C. C. ve Leu, J., 2003. Environmental restoration by using waste tires: an example of the Nan-Liao landfill in Taiwan, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 64.

Kurbonshoeva, L., 2019. Pipeline shore crossing approach in the arctic conditions, Master's Thesis, University of Stavanger, Norway.

Laidlaw., T. C., 1999. Influence of loacal support on corrugated hdpe pipes, Ms Thesis University of Western Ontoria / Kanada.

Leonhardt, G., 1979. Die erdlasten bei überschütteten durchlässen, Bautechnik, 56(11).

Linsley, R., 1992. Water resources engineering, McGraw-Hill Book Company, U.S.A.

Lueke, J. S. ve Ariaratnam, S. T., 2005. Surface heave mechanisms in horizontal directional drilling, Journal of construction engineering and management, 131(5), 540-547.

Madhavi Latha, G., Rajagopal, K., ve Krishnaswamy, N. R., 2006. Experimental and theoretical investigations on geocell-supported embankments, International Journal of Geomechanics, 6(1), 30-35.

Madhavi Latha G ve Rajagopal K., 2007. Parametric finite element analyses of geocell-supported embankments, Can Geotech J 2007, 44, 8, 917–27.

Mane, A. S., Shete, S. ve Bhuse, A., 2017. Effect of geofoam inclusion on deformation behavior of buried pipelines in cohesive soils, In International Congress and Exhibition, Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology, (pp. 20-33), Springer, Cham.

Marston, A. ve Anderson, A. O., 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 load, Ph.D. Thesis, Ohio University College of Engineering and Technology.

Masada, T., 2000. Modified Iowa formula for vertical deflection of buried flexible pipe.

Masada, T., 2009. Improved design approach for buried flexible pipe, In Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets (pp. 920-928).

McGrath, T. J., 1998. Design method for flexible pipe, A Report to the AASHTO Flexible Culvert Liaisom Committee, Simpson Gumpertz and Heger Inc.

McGrath, T., 2005. Performance of thermoplastic pipe under highway vehicle loading, (No. MN/RC-2005-22).

Mehrjardi, G. T., Tafreshi, S. M. ve Dawson, A. R., 2012. Combined use of geocell reinforcement and rubber–soil mixtures to improve performance of buried pipes, Geotextiles and Geomembranes, 34, 116-130.

Merifield, R. S., White, D. J. ve Randolph, M. F., 2008. The ultimate undrained resistance of partially embedded pipelines, Geotechnique 58(6):461–470.

Moo-Young, H., Sellasie, K., Zeroka, D. ve Sabnis, G., 2003. Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction, Journal of Environmental Engineering, 129, 10, 921-929.

Moser, A. P., 1990. Buried pipe design, Mcgraw-Hill, New York.

Moser, A. P., 2001. Buried pipe design second ed., Mcgraw-Hill New-York N.Y., ABD.

Moser, A. P. ve Folkman, S., 2008. Buried pipe design 3rd edition, Mc Graw- Hill Press, USA.

Nirmala, R. ve Rajkumar, R., 2016. Finite element analysis of buried UPVC pipe, Indian J. Sci. Technol, 9, 5, 1-5.

Noor, M. A. ve Dhar, A. S., 2003. Three-dimensional response of buried pipe under vehicle loads, Pipeline Engineering and Construction International Conference 2003, ASCE, American Society of Civil Engineers.

O'Rouke, M. J., Liu, X. ve Flores-Berrones, R., 1995. Steel pipe wrinkling due to longitudinal permanent ground deformation, Journal of Transportation Engineering, September/October 1995, 443-451.

Oktay, H. E. ve Gürses, E., 2013. Yarı kristal polimer malzemelerin çok ölçekli modellenmesi, XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

Ovalı, İ. ve Esen, C., 2017. ANSYS Workbench, Kodlab Yayınları, İstanbul, ISBN: 978-605-9118-89-7.

Öner, A. A., 2016. Numerical investigation of flow around a pipeline with a spoiler near a rigid bed, Advances in Mechanical Engineering, 8, 6.

Pokharel, S. K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R. L. ve Halahmi, I., 2010. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading, Geotextiles and Geomembranes, 28, 6, 570-578.

Pusca, A., Bobancu, S. ve Duta, A., 2010. Mechanical properties of rubber an overview, Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Engineering Sciences. Series I, 3, 107.

Qasim, R. M., 2017. Analytical study of foundation – soil – pipe interaction, International Journal of Applied Engineering Research, 12, 19, 9176-9194.

Rajani, B. ve Kuruoka, S., 1995. Field performance of pvc water mains buried in different backfills, Advances in Underground Pipeline Eng. School International Conference pp. 138 – 149.

Rajendran, S., Arkadu, J. P., Dinakaran, S. V., Ganapathy, D. ve Ramana Murthy, M. V., 2018. Application of GFRP for unburied submarine pipeline in shallow water of coral islands, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 9, 4, 04018023.

Rajkumar, R. ve Ilamparuthi, K., 2008. Experimental study on the behaviour of buried flexible plastic pipe, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13, 1-10.

Randolph, M. F. ve White, D. J., 2008. Upper-bound yield envelopes for pipelines at shallow embedment in clay, Geotechnique 58, 4: 297-301.

Reddy, D. V. ve Ataoğlu Ş., 2002. Experimental analysis of buried high density polyethylene pipes, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 26, 3, 293-300.

Rofooei, F. R., Jalali, H. H., Attari, N. K. A., Kenarangi, H. ve Samadian, M., 2015. Parametric study of buried steel and high density polyethylene gas pipelines due to oblique-reverse faulting, Canadian Journal of Civil Engineering, 42, 3, 178-189.

Rogers, C. D. F., 1988. Some observations on flexible pipe response o load, Transportation Reseach Record 1191 pp 1-11.

Saberi, M., Halabian, A. M. ve Vafaian, M., 2011. Numerical analysis of buried steel pipelines under earthquake excitations, In Pan-Am CGS Geotechnical Conference.

Sargand, S. M., Masada, T. ve Gruver, D., 2005. Field performance and analysis of large - diameter high-density polyethylene pipe under deep soil fill, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 131, No. 1, pp. 39-51.

Selig, E.T. ve Packard, D.L., 1987. Burried concrete pipe trench installation analysis, Journal of Transportation Engineering, 113, 5.

Simicevic, J. ve Sterling, R. L., 2001. Guidelines for pipe ramming, Technical Rep., 1-21.

Smith, I. M. ve Griffith, D.V., 1982. Programming the finite element method, John Wiley & Sons, Chisester, U.K., second edition.

Smith, M. E., 2004. Drainage pipe deflection for high heaps, Published in Mining Record.

Sofi, A., 2018. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete–a review, Ain Shams Engineering Journal.

Spangler, M. G., 1941. The structural design of flexible pipe culverts, Iowa Engineering Experiment Station, Bulletin 153. Ames, Iowa.

Spangler, M. G., 1966. Soil engineering, International Textbook Company, Scranton, USA.

Spangler, M. G. ve Handy, R. L., 1982. Soil engineering, Harper and Row, New York.

Standard, A. D., 2000. ATV-DVWK-A 127E: Static calculation of drains and sewers.

Stein, D., 2003. New pipeline technologies, security and safety, ASCE, Virginia.

Stolarski, T., Nakasone, Y. ve Yoshimoto, S., 2018. Engineering analysis with ANSYS software, Butterworth-Heinemann.

Suleiman, M. T., 2002. The structural performance of flexible pipes, Retrospective theses and dissertations, Iowa State University.

Sun, Z., Zhang, L., ve Rose, J. L., 2005. Flexural torsional guided wave mechanics and focusing in pipe, Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 127, 4, 471-478.

Tafreshi, S. M. ve Khalaj, O., 2008. Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated-load, Geotextiles and Geomembranes, 26, 2, 145-163.

T.C. Resmi Gazete, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ömrünü tamamlamış lastiklerin kontrolü yönetmeliği, Sayı:26357, 25 Kasım 2006.

T.C. Resmi Gazete, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Kanunu Kanun No:2872, Sayı:18132, 11 Ağustos 1983.

Teja, A. S., 2018. Field investigation on structural performance of the buried UPVC pipes with and without geogrid reinforcement, In AIP Conference Proceedings, 1930, 1, AIP Publishing.

Terzi, N. U. ve Yıldırım, S., 2009. Farklı zemin ortamlarına yerleştirilen esnek gömülü boruların düşey yükler altındaki şekil değişiminin deneysel ve ampirik yöntemlerle incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(1), 49-58.

Terzi, N. U., 2007. Gömülü borulara etkiyen düşey ve yatay yüklerin boru stabilitesine olan etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Thomson, J., 1993. Pipejacking and microtunneling, Chapman & Hall, Cambridge.

Tian, Y., Cassidy, M. J. ve Gaudin, C., 2010. Advancing pipe-soil interaction models in calcareous sand, Appl. Ocean Res. 32, 3, 284–297.

Tian, Y., Liu, H., Jiang, X. ve Yu, R., 2015. Analysis of stress and deformation of a positive buried pipe using the improved Spangler model, Soils and Foundations, 55, 3, 485-492.

Toğulga, M., 2003. Processing and characterization of high performance piping materials for geothermal applications, Master's thesis, İzmir Institute of Technology.

Trentin, T. F., Moraes, J. C., Melges, J. L. P., Akasaki, J. L., Fugii, A. P., Tashima, M. M. ve Camacho, J. S., 2016. Use of tire rubber residue in reinforced concrete pipes, In Key Engineering Materials (Vol. 668, pp. 283-289), Trans Tech Publications.

TS 418-4 EN 12201-4, 2011. Plastics Piping Systems for Water Supply, and for Drainage and Sewerage Under Pressure - Polyethylene (PE) - Part 4: Valves for Water Supply Systems.

TS 706 EN 12620+ A1, 2009. Beton Agregaları, TSE, Ankara, Türkiye.

TS 1114, 1986. Hafif Agregalar - Beton İçin, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 2170, 1989. Su ve Gaz Borularının Yeraltına Yerleştirilmesi Kuralları, TSE, Ankara.

TS 7397, 1989. Dış Yüklere Maruz Basınçlı veya Basınçsız Asbestli Boru Seçilmesi Kuralları, TSE, Ankara.

TS EN 728, 1997. Plastik Boru ve Kanal Sistemleri - Poliolefin Borular ve Ekleme Parçaları - Oksidasyon İndüksiyon Süresinin tayini.

TS EN 744, 1997. Plastik Boru ve Kanal Sistemleri – Termoplastik Borular – Çevre Boyunca Dış Darbeye Mukavemet Deneyi.

TS EN 10216-1, 2014, Basınç Amaçları İçin Dikişsiz Çelik Borular - Teknik Teslim Şartları-Bölüm 1: Belirtilen Oda Sıcaklık Özellikleri Olan Alaşımsız Çelik Borular, TSE, Ankara, Türkiye.

TS EN 10163-3 Standardı, 2012. Çelik Yassı Mamuller - Sıcak Haddelenmiş Levha, Geniş Yassılar ve Profiller için Teslim Şartları Bölüm:3 Profiller, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 12201-2, 2012, Basınç Altında İçme ve Kullanma Suyu, Kanalizasyon ve Drenaj Suyu için Plâstik Boru Sistemleri - Polietilen(PE) - Bölüm 2: Borular, TSE, Ankara, Türkiye.

TS EN ISO 1133-1, 2012. Plastikler - Erimiş Termoplastiklerin Kütlesel Akış Hızının (MFR) ve Hacimsel Akış Hızının (MVR) Tayini – Bölüm 1: Standart Yöntem.

TS EN ISO 1167-1, 2006. Termoplastik Borular, Ekleme Parçaları ve Takımlar - Sıvıların Taşınmasında Kullanılan - İç Basınca Direncin Tayini - Bölüm 1: Genel Yöntem.

TS EN ISO 1167-2, 2006. Termoplastik Borular, Ekleme Parçaları ve Takımlar - Sıvıların Taşınmasında Kullanılan - İç Basınca Direncin Tayini - Boru Deney Parçalarının Hazırlanması.

TS EN ISO 1183-1, 2006. Plâstikler – Gözeneksiz Plâstikler – Yoğunluk Tayin Metotları – Bölüm 1: Daldırma Metodu, Sıvı Piknometre Metodu ve Titrasyon Metodu.

TS EN ISO 2505, 2010. Termoplastik Borular - Uzunluğundaki Değişim – Deney Yöntemi Ve Parametreler.

TS EN ISO 3126, 2006. Plastik Boru Sistemleri - Plastik Elemanlar - Boyutların Tayini.

TS EN ISO 6259-3, 2015. Termoplastik Borular – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm :3 Poliefin Borular.

TS EN ISO 9969, 1998. Termoplastik Borular – Çember Rijitliğinin Tayini.

TS EN ISO 11357-6, 2013. Plastikler - Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) - Bölüm 6: Oksidasyon İndüksiyon Süresi ve Sıcaklığının Hesaplanması.

TS EN ISO 13968, 1998. Plastik Boru ve Kanal Sistemleri - Termoplastik Borular - Halka Esnekliğinin Tayini.

URL-1 <http://www.firat.com/icme-suyu-boru-sistemleri/pe-boru-ve-ek-parcalari> Erişim Tarihi: 19.04.2018.

URL-2 <http://http://www.kuzeyboru.com.tr/polietilen-pe-boru> Erişim Tarihi: 07.05.2018.

URL-3 <http://www.siltas.com.tr/uretim.php> Erişim Tarihi: 19.10.2018.

URL-4 <http://www.teknikdestek.com.tr/tr/destek> Erişim Tarihi: 05.04.2019.

URL-5<https://www.serdarkorkut.com/2017/07/10/geometrik-dogrusal-olmayan-analiz/> Erişim Tarihi: 12.09.2019.

URL6<http://innomet.ttu.ee/martin/MER0070/WB/WS9/Connections/Mechanical/Intro_15.0_L06_Connections.pdf> Erişim Tarihi: 02.04.2019.

Vahapoğlu, V., 2010. Kauçuk türü malzemeler: şekil değiştirme hızı etkileri, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 16, 3.

Vaslestad, J., 1991. Load reduction on buried rigid pipes, 10th European Conference on SMFE, Florence, pp: 771-774.

Wang, N., 2002. Evaluation of flexible pipes under shallow burial depths, Ms Thesis, Florida Atlantic Univ. Florida, ABD.

Watkins, R. K ve Spangler, M. G., 1958. Some characteristics of the modulus of pasive resistance of soil: a study of similitude, Highway Research Board Proceedings, Vol. 37., pp. 576-583.

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 45th Annual Meeting.

Won, M. S., 2009. Effect of reinforcement on bearing capacity of loose sand foundation and deformation behavior of buried flexible pipes, Journal of Testing and Evaluation, 38, 2, 232-241.

Xu, Q., Feng, J. ve Zhang, S., 2017. Influence of end side displacement load on stress and deformation of “L” type large-diameter buried pipe network, Applied Thermal Engineering, 126, 245-254.

Xu, Q., Feng, J. ve Zhang, S. 2017. Combined effects of different temperature and pressure loads on the “L”-type large-diameter buried pipeline. International Journal of Heat and Mass Transfer, 111, 953-961.

Xu, Q. ve Feng, J. X., 2017. Effects of different loads on structure deformation of “L”-type large - diameter buried pipe network based on flow–heat–solid coupling, Heat Transfer-Asian Research, 46, 8, 1327-1341.

Yang, S., Lohnes, R. A. ve Kjartanson, B. H., 2002. Mechanical properties of shredded tires. Geotechnical Testing Journal, 25, 1, 44-52.

Zhang, J., Stewart, D. P. ve Randolph, M. F., 2002. Modeling of shallowly embedded offshore pipelines in calcareous sand, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 128, 5, 363–371.

Zheng, J., Zhang, Y., Hou, D., Qin, Y., Guo, W., Zhang, C. ve Shi, J., 2018. A review of nondestructive examination technology for polyethylene pipe in nuclear power plant, Frontiers of Mechanical Engineering, 1-11.

Zhou, M., Wang, F., Du, Y. J. ve Liu, M. D., 2017. Performance of buried HDPE pipes – part II: total deflection of the pipe. Geosynthetics International, 24, 4, 396-407.

Zhou, T., Tian, Y. ve Cassidy, M. J., 2018. Effect of tension on the combined loading failure envelope of a pipeline on soft clay seabed, International Journal of Geomechanics, 18, 10, 04018131.

Zolad, G.V., McGrath, T.J. ve Selig, E. T., 1996. Laboratory tests of buried pipe installation proceures, Transportation Resarch Record 1541, pp 86-96.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı **:** Can ERENSON

Adres **:** Büyükbölcek mh. 2432 sk. 4/3 Merkez / AKSARAY

E-posta adresi **:** canerenson@aksaray.edu.tr, canerenson@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans **:** Aksaray Üni. İnşaat Müh. Böl. (İÖ) 2009-2013

Yüksek Lisans **:** Aksaray Üni. İnş. Müh. ABD. (Geoteknik) 2013-2015

Doktora **:** Aksaray Üni. İnş. Müh. ABD. (Geoteknik) 2015-2020

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Aksaray Üni., İnş. Müh. Böl. Geoteknik ABD, Araştırma Görevlisi 2014-halen
2. Aksaray Üniveristesi İnşaat Müh. Bölümü (İÖ) Birinciliği

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Terzi, N. U., Erenson, C. ve Selçuk, M. E., 2015. Geotechnical properties of tire – sand mixtures as backfill material for buried pipe installations, Geomechanics and Engineering, 9(4), 447-464.

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Erenson, C., Polat, N. ve Terzi, N. U., 2019. Investigation of the deformation properties of high density polyethylene pipes under thermal effects with laboratory tests, 8. International Geotechnical Symposium.