



**GÖMÜLÜ ESNEK BORULAR ÜZERİNE ETKİYEN  
GERİLMELERİN SIKIŞABİLİR MALZEME  
KULLANILARAK AZALTILMASI**

**Sercan BOZKURT**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER  
İkinci Danışman: Doç. Dr. Havvanur KILIÇ**

**2021**

**T.C.**

**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GÖMÜLÜ ESNEK BORULAR ÜZERİNE ETKİYEN GERİLMELERİN  
SIKIŞABİLİR MALZEME KULLANILARAK AZALTILMASI**

**Sercan BOZKURT**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER**

**İkinci Danışman: Doç. Dr. Havvanur KILIÇ**

**TEKİRDAĞ-2021**

**Her hakkı saklıdır.**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GÖMÜLÜ ESNEK BORULAR ÜZERİNE ETKİYEN GERİLMELERİN SIKIŞABİLİR MALZEME KULLANILARAK AZALTILMASI

**Sercan BOZKURT**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER

Gömülü borular ve menfezler gibi yapıların tasarımında zemin – yapı etkileşiminin anlaşılması gereklidir. Gömülü borulara etkiyen yükler zemin kemerlenmesi dolayısıyla etkiyen yükten farklı olarak ölçülmektedir. Esnek borularda borunun düşeyde yaptığı esnemenin dolayısı boru üzerindeki zemin prizmasının yaptığı oturma, borunun yanlarında yer alan zemin prizmasının yaptığı oturmadan fazladır. Bundan dolayı gelişen pozitif zemin kemerlenmesi ile boru üzerine gelecek yükün bir kısmı yan zemin prizmalarına aktararak boru üzerine etkiyen yük azalmaktadır. Rijit borularda ise negatif zemin kemerlenmesi ile boru üzerine etkiyen yüklerde artış meydana gelmektedir. Rijit borulara etkiyen yükleri azaltmak için yapay hendek yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle boru üzerine sıkışabilir malzeme yerleştirilerek yapay olarak pozitif kemerlenme sağlanmış olur. Yapay hendek yönteminin esnek borularda uygulanması ile var olan kemerlenme etkisinin artması sağlanır.

Bu tez çalışmasında kalın dolgu yükleri altında yer alan geniş çaplı HDPE ve PVC boruların davranışlarını incelemek amaçlı projelendirilen Derin Gömü Projesi kapsamında gerçekleştirilen arazi deneyleri Plaxis 2D programında modellenmiştir. Oluşturulan bu modellerde borular üzerine sıkışabilir malzeme olarak EPS geofom malzeme kullanılmıştır. EPS malzemenin kalınlık, genişlik ve yoğunluk parametreleri değiştirilerek bunların boru davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. EPS geofom malzeme ile birlikte daha kalın dolgu yüklerinin kullanımı, geri dolgu malzemesi olarak kil malzemenin kullanılması ve küçük çaplı boruların kullanımı incelenen diğer durumlardır. Ayrıca EPS malzemenin boru üstünde kullanılmasının dışında boru etrafında da kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda borulara etkiyen gerilme değerleri ve borularda meydana gelen şekil değiştirme oranları belirlenmiştir. 30 m'lik dolgu yükü altında boru üstünde EPS kullanımı ile boru davranışını en fazla iyileşmenin sağlandığı durumda boru tacına etki eden gerilmelerde %60 oranında, boru yan duvarına etki eden gerilmelerde %70 oranında iyileşme sağlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Zemin kemerlenmesi, Yapay hendek yöntemi, Esnek boru, EPS Geofom, Plaxis 2D

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

### **REDUCTION OF STRESSES ON BURIED FLEXIBLE PIPES BY USING COMPRESSIBLE MATERIAL**

**Sercan BOZKURT**

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist Prof. Dr. Perihan BİÇER

The design of structures such as buried pipes and culverts requires an understanding of soil - structures interaction. The loads acting on the buried pipes are measured differently from the load acting due to the soil arching. In flexible pipes, due to the vertical deflection of the pipe, the soil prism on the pipe is more settlement than the soil prism on the sides of the pipe. Therefore, with the positive soil arching that develops, some of the load that will come on the pipe is transferred to the side soil prisms and the load on the pipe decreases. In rigid pipes, the acting loads on the pipes increases with the negative soil arching. Imperfect trench method has been developed to reduce the loads on rigid pipes. With this method, compressible material is placed on the pipe and artificially positive arching is achieved. By applying the imperfect trench method in flexible pipes, the existing arching effect is increased.

In this thesis study, field experiments carried out within the scope of the Deep Burial Project, which was designed to examine the behavior of large-scale HDPE and PVC pipes under thick filling loads, were modeled in Plaxis 2D program. In these created models, EPS geofom material was used as a compressible material on the pipes. The thickness, width and density parameters of the EPS material were changed and their effects on pipe behaviors were examined. The use of thicker filling loads, the use of clay material as back filler material and the use of small diameter pipes are other cases examined with EPS geofom material. In addition, apart from the use of EPS material on the pipe, analyzes were carried out by using it around the pipe. As a result of the performed analyses, the stress values that effected on the pipes and the deformation rates occurring in the pipes were determined. In the case of maximum improvement of pipe behavior by using EPS on pipes under 30 m filling load, 60% improvement in stresses acting on the pipe crown, 70% improvement in stresses acting on the pipe sidewall was achieved.

**Key words:** Soil arching, Imperfect trench method, Flexible pipe, EPS Geofom, Plaxis 2D

**2021, 248 pages**



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGE DİZİNİ.....</b>	<b>v</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ.....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR.....</b>	<b>xvi</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ.....</b>	<b>2</b>
2.1. Gömülü Borular Hakkında Teknik Bilgiler.....	2
2.2. Gömülme Ortamlarına Göre Boru Tipleri .....	4
2.3. Kemerlenme Mekanizması .....	7
2.4. Marston Yük Teorisi.....	10
2.4.1. Hendek Durumu.....	10
2.4.2. Pozitif Projeksiyon Durumu .....	13
2.4.3. Negatif Projeksiyon Durumu .....	17
2.5. Genleştirilmiş Polistiren (EPS) Geofoam .....	23
2.6. EPS Geofoam Malzemenin Gömülü Yapılarla Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar ve Sayısal Analiz Uygulamaları .....	32
<b>3. DERİN GÖMÜ PROJESİ.....</b>	<b>65</b>
3.1. Boru Özellikleri .....	68
3.2. Zemin Malzemelerinin Özellikleri.....	70
3.2.1. Atterberg Limitleri.....	70
3.2.2. Elek Analizleri .....	71
3.2.3. Standart Kompaksiyon Deneyleri.....	72
3.2.4. Tek Boyutlu Sıkışma Deneyleri .....	74
3.2.5. Üç Eksenli Basınç Deneyleri .....	75
3.3. Boruların ve Zeminlerin Enstrümantasyonu.....	85
3.3.1. Lineer Potansiyometreler.....	85
3.3.2. Lazer Profilometre .....	85
3.3.3. Toprak Basıncı Hücreleri.....	86
3.3.4. Gerinim Ölçerler .....	87

3.4. Geri Dolgu İşlemi ve Dolgu İnşaatı.....	88
<b>4. DERİN GÖMÜ PROJESİ’NİN PLAXIS 2D PROGRAMI İLE MODELLENMESİ.</b>	<b>94</b>
4.1. Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi .....	99
4.1.1. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi.....	99
4.1.2. Termoplastik Boru Parametrelerinin Belirlenmesi.....	103
4.1.3. EPS Geofoam Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	104
4.1.4. Arayüzey Parametrelerinin Belirlenmesi.....	107
4.2. Çözümleme Aşamaları.....	107
4.3. Plaxis 2D Programıyla Kalibre Edilmiş Verilerin Arazi Deneyi Verileri İle Karşılaştırılması .....	110
<b>5. EPS GEOFOAM MALZEMENİN ARAZİ DENEYLERİ ÜZERİNDE KULLANIMININ SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ.....</b>	<b>126</b>
5.1. EPS Geofoam Malzeme Kalınlığının Değişimi.....	126
5.2. EPS Geofoam Malzeme Genişliği .....	151
5.3. EPS Geofoam Malzemenin Yoğunluk Değişimi .....	157
<b>6. GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNDE KALIN DOLGU YÜKÜNÜN ETKİSİNİN İNCELENMESİ.....</b>	<b>163</b>
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>194</b>
7.1. EPS Malzemenin Kalınlık Değişimi.....	194
7.2. EPS Malzemenin Genişlik Değişimi .....	195
7.3. EPS Malzemenin Yoğunluk Değişimi.....	195
7.4. Kalın Dolgu Yükünün Etkisi .....	195
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>197</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>203</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>229</b>

## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı zemin türleri için Rankine katsayısı ve sürtünme katsayısı değerleri (Marston ve Anderson, 1913) .....	12
Çizelge 2.2. Farklı oturma oranları için belirlenen Cc değerleri (Moser ve Folkman, 2008) ..	17
Çizelge 2.3. Oturma oranı tasarım değerleri (Moser ve Folkman, 2008).....	17
Çizelge 2.4. Model deneylerinde incelenen faktörler ve değişkenler (Kim vd., 2010).....	42
Çizelge 3.1. Boruların malzeme özellikleri ve üretici firmaları (Sargand vd., 2002) .....	65
Çizelge 3.2. Deney planına göre kullanılan borular, boruların gömülme ortamları ve dolgu yükseklikleri (Sargand ve Masada, 2007) .....	66
Çizelge 3.3. Boruların temel mühendislik özellikleri (Sargand vd., 2002).....	69
Çizelge 3.4. Kum geri dolgu malzemesine ait elek analizi sonuçları (Sargand vd., 2002) .....	71
Çizelge 3.5. Kıırma taş geri dolgu malzemesine ait elek analizi sonuçları (Sargand vd., 2002) .....	72
Çizelge 3.6. Tek boyutlu sıkışma deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar (Sargand vd., 2002) .....	74
Çizelge 3.7. Geri dolgu işleminin borulara göre tamamlanma tarihleri (Sargand vd., 2002) ..	89
Çizelge 3.8. Dolgu inşaatı yapım aşamalarının tamamlanma tarihleri (Sargand vd., 2002) ....	91
Çizelge 4.1 Boru yan duvarına etkileyen tekil yüklerin büyüklükleri (Yüklerin büyüklükleri kN birimindedir).....	95
Çizelge 4.2. Geri dolgu malzemeleri ait proktor sıkışma yüzdeleri ve doğal birim hacim ağırlık değerleri.....	100
Çizelge 4.3. Farklı sıkışma yüzdelerindeki geri dolgu malzemelerine ait ortalama sekant modülü ve referans ortalama sekant modülü değerleri (Akınay, 2010) .....	101
Çizelge 4.4. Farklı sıkıştırma yüzdelerindeki geri dolgu malzemelerine ait kayma mukavemeti parametreleri.....	101
Çizelge 4.5. Gevşek geri dolgu malzemelerine ait parametreler (Akınay, 2010) .....	102
Çizelge 4.6. Dolgu malzemesine ait parametreler (Akınay, 2010) .....	102
Çizelge 4.7. Doğal zemin malzemesine ait parametreler (Akınay, 2010).....	103
Çizelge 4.8. Boru tiplerine ait parametreler (Akınay, 2010).....	103
Çizelge 4.9. Küçük çaplı borulara ait parametreler .....	104
Çizelge 4.10. 20 kg/m <sup>3</sup> , 30 kg/m <sup>3</sup> ve 40 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklarındaki EPS geofom malzemelerin pekleşen zemin modeli parametreleri (Tefera vd.,2010).....	106
Çizelge 4.11. Geri dolgu inşa aşamaları .....	108
Çizelge 4.12. Dolgu inşa aşamaları .....	109

Çizelge 5.1. Belirlenen oranlar ve boru çapları dikkate alınarak belirlenen EPS geofom kalınlıkları.....	126
Çizelge 6.1. Parametrik çalışmada kullanılan borular ve özellikleri.....	164
Çizelge 6.2. Geri dolgu olarak kullanılan malzemelere ait özellikler .....	165
Çizelge 6.3. Farklı rijitlikteki D-0,76.PS-650 (P3b) ve D-0,76.PS-302 (P3c) borularında meydana gelen şekil değıştirme oranları .....	188



## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Boru kesit geometrisinde kullanılan terimler (Akınay, 2010; Mada, 2005) .....	2
Şekil 2.2. Boru duvar kesitleri a) Düzgün yüzey b) Kıvrımlı (korige) yüzey (Mada, 2005) .....	3
Şekil 2.3. Boruların yük altındaki davranışı a) rijit boru b) esnek boru .....	4
Şekil 2.4. Gömülme ortamlarına göre boru tipleri a) Hendek tipi boru b) Pozitif projeksiyonlu boru c) Negatif projeksiyonlu boru (Handy ve Spangler, 2007) .....	5
Şekil 2.5. Yapay hendek yöntemi (Handy ve Spangler, 2007).....	6
Şekil 2.6. Yapay hendek yönteminin şematik gösterimi (Meguid, 2019) .....	7
Şekil 2.7. Boru üzerine etki eden kemerlenme mekanizmaları (a) rijit boru üzerine etki eden negatif kemerlenme (b) esnek boru üzerine etki eden pozitif kemerlenme (c) esnek boru üzerinde uygulanan yapay hendek yöntemi (Kang, 2019) .....	8
Şekil 2.8. Rijit menfez üzerine etki eden basınçların karşılaştırılması (Meguid vd., 2017a).....	9
Şekil 2.9. Marston hendek kesiti (Handy ve Spangler, 2007) .....	11
Şekil 2.10. Farklı zemin türleri için $H/B_d$ oranına göre $C_d$ değerleri(Moser ve Folkman,2008) .....	13
Şekil 2.11. Pozitif projeksiyonlu boruların karşılaştırılması (a) projeksiyon koşulu (rijit boru) (b) hendek koşulu (esnek boru) (Moser ve Folkman,2008). .....	14
Şekil 2.12. Pozitif projeksiyonlu borular için $C_c$ yük katsayısı diyagramı (Moser ve Folkman, 2008).....	16
Şekil 2.13. Borunun negatif projeksiyonlu olarak gömülmesi durumunda meydana gelen oturmalar (AWWA, 2008).....	18
Şekil 2.14. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için $C_n$ yük katsayısı diyagramı ( $p'=0.5$ ) (AWWA, 2008) .....	20
Şekil 2.15. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için $C_n$ yük katsayısı diyagramı ( $p'=1.0$ ) (AWWA, 2008) .....	21
Şekil 2.16. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için $C_n$ yük katsayısı diyagramı ( $p'=1.5$ ) (AWWA, 2008) .....	22
Şekil 2.17. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için $C_n$ yük katsayısı diyagramı ( $p'=2.0$ ) (AWWA, 2008) .....	23
Şekil 2.18. EPS geofom uygulama örnekleri a) hafif dolgu b) köprü ayağı arkasında (Wong ve Leo, 2006).....	24
Şekil 2.19. Üç farklı yoğunluktaki EPS numuneleri ile yapılmış deney sonuçları (Meguid ve Hussein, 2017).....	25
Şekil 2.20. Ana tasarım planı (Bartlett vd., 2014).....	26
Şekil 2.21. Hjelmgung Köprüsü EPS geofom dolgu inşaatı (Aabøe ve Frydenlund, 2011).27	
Şekil 2.22. Utah'da menfez üzerine inşa edilmiş olan hafif EPS dolgu (Bartlett vd., 2015) ...	27

Şekil 2.23. EPS geofoam yol dolgusu en kesitleri a) başlangıç en kesiti b) isale hattı müdahale kapakları bölgesi en kesiti c) yol sonu en kesiti (Özer vd., 2017).....	29
Şekil 2.24. EPS bloklar ile mevcut yol arayüzünde yapılan EPS uygulaması (Özer vd., 2017) .....	30
Şekil 2.25. Taban plakasının EPS dolgu altına yerleştirilmesi (Özer vd., 2017) .....	30
Şekil 2.26. EPS geofoam dolgu üzerine oturma plakasının yerleştirilmesi (Özer vd., 2017) ..	31
Şekil 2.27. EPS geofoam dolgunun zaman bağlı şekil değiştirme oranları (Özer ve Akınay, 2019).....	32
Şekil 2.28. Birinci uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS'de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad ve Sayd, 2019).....	33
Şekil 2.29. İkinci uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS'de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad vd., 2011) .....	34
Şekil 2.30. Üçüncü uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS'de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad ve Sayd, 2019).....	35
Şekil 2.31. Dördüncü uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS'de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad ve Sayd, 2019).....	36
Şekil 2.32. AASHTO standart yataklama geometrileri .....	37
Şekil 2.33. Yapay hendek yönteminde kullanılan yumuşak bölge geometrileri a) genel gösterim b) yumuşak bölge geometrisi I (önerilen geometri) c) yumuşak bölge geometrisi II (Spangler (1950) ve Vaslestad vd. (1993) tarafından denenilen geometri) (Kang, 2007) .....	38
Şekil 2.34. Yumuşak bölge I geometrisinin belirlenmesi a) Hs/D oranının belirlenmesi (W/D=1,25 - Bs/D=0,125) b) W/D oranını belirlenmesi (Hs/D=0,25 - Bs/D=0,125) c) Bs/D oranının belirlenmesi (Hs/D=0,25 - W/D=1,25) (Kang, 2007) .....	38
Şekil 2.35. Yan dolgu malzemeleri değişiminin kemerlenme faktörleri üzerindeki etkileri a) düşey kemerlenme faktörünün H/D oranına göre değişimi b) yatay kemerlenme faktörünün H/D oranına göre değişimi (Kang, 2007) .....	40
Şekil 2.36. Yumuşak bölge kullanılmayan duruma göre yumuşak bölge kullanılan durumlarda boru yüzeyinde oluşan radyal gerilmelerin değişimi (Kang, 2007) .....	41
Şekil 2.37. Gömülü boruların tek kat ve çift kat sıkışabilir bölge içeren durumlarda toprak yükü dağılımı (Kim vd., 2010) .....	42
Şekil 2.38. Toprak basınçlarındaki yüzde azalma oranları a) Normalize edilmiş düşey toprak basıncı b) Normalize edilmiş yatay toprak basıncı (Kim vd. 2010).....	43
Şekil 2.39. Tam ölçekli deney planlarının görünüşleri a) üstten görünüş b) yandan görünüş (Kim vd., 2010).....	44
Şekil 2.40. Tam ölçekli deneylerde boru üzerine etki eden toprak basınçları a) Düşey toprak basıncı b) Yatay toprak basıncı (Kim vd., 2010).....	44
Şekil 2.41. EPS panel kalınlığının etkileri (EPS panel genişliği 1,5D olarak sabit tutulmuştur) a) boru tacındaki düşey gerilme b) $\sigma_{hs} / \sigma_{vc}$ oranı (Witthoef ve Kim, 2016) .....	46
Şekil 2.42. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Meguid vd., 2017a).....	47

Şekil 2.43. Gömülü yapı üzerine yerleştirilen EPS geofoamın incelenen parametrelerindeki geometrilerindeki değişimler a) EPS genişliği değişimi b) EPS kalınlığı değişimi c)EPS konum değişimi (Meguid vd., 2017a) .....	48
Şekil 2.44. Gömülü yapı duvarlarına etkiyen toprak basıncına EPS yoğunluğunun etkisi a) Üst duvar b) Alt duvar c) Yan duvar (Meguid ve Hussein, 2017).....	50
Şekil 2.45. Yapay hendek yöntemi geometrileri a) Yumuşak bölge geometrisi I: gömülü yapı üzerine EPS yerleştirilmesi b)Yumuşak bölge geometrisi II: Gömülü yapı etrafına EPS yerleştirilmesi (Meguid vd. 2017b) .....	51
Şekil 2.46. EPS'siz durum, yumuşak bölge geometrisi I ve II durumlarında gömülü yapı etrafında oluşan gerilme dağılımları (Meguid vd. 2017b).....	52
Şekil 2.47. Deney düzeneğinin genel görünümü.....	53
Şekil 2.48. EPS genişlik değişiminin düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi (Söylemez, 2017) .....	54
Şekil 2.49. Farklı yoğunluklardaki EPS geofoamların düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi (Söylemez, 2017).....	54
Şekil 2.50. EPS kalınlık değişiminin düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi (Söylemez, 2017) .....	55
Şekil 2.51. Deney düzeneğinin teknik görünümü (Akınay, 2017) .....	56
Şekil 2.52. Gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde kullanılan EPS malzemenin boru etrafındaki konumları (çap ölçüleri mm cinsinden diğer ölçüler ise m cinsindedir) (Kılıç ve Akınay, 2019).....	57
Şekil 2.53. Laboratuvar deneylerinde boru tacında ölçülen düşey gerilmeler a) 10 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu EPS kullanılan deneyler b) 15 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu EPS kullanılan deneyler (Akınay, 2017).....	57
Şekil 2.54. Laboratuvar deneyleri sonucunda boru tacında belirlenen düşey kemerlenme faktörleri a) 10 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu EPS kullanılan deneyler b) 15 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu EPS kullanılan deneyler (Akınay, 2017).....	58
Şekil 2.55. 15 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu EPS malzeme kullanımında ölçülen şekil değiştirmeler a) Düşey şekil değiştirme b) Yatay şekil değiştirme (Akınay, 2017).....	59
Şekil 2.56. Plaxis 2D sayısal analizde kullanılan model geometrileri a) Referans, b) Konfigürasyon 1 c) Konfigürasyon 2 (Akyelken, 2020).....	60
Şekil 2.57. 300 mm çaplı SR32 ve SR4 boruları konfigürasyon 1 ve 2 durumlarında analiz edildiğinde oluşan düşey gerilme dağılımı diyagramı (Akyelken, 2020) .....	61
Şekil 2.58. Farklı EPS konfigürasyonları ve farklı boru çapları kullanımında zemin içerisinde meydana gelen oturmalar (Akyelken, 2020) .....	62
Şekil 2.59. Arazi deneyinin Plaxis 2D programında oluşturulmuş modeli (Akyelken, 2020) .	63
Şekil 2.60. Geri dolgu malzemesi değişimi oluşan a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi (Akyelken, 2020) .....	64
Şekil 3.1. Deney boruları üzerindeki dolgu yükseklikleri (Sargand ve Masada, 2007) .....	67

Şekil 3.2. Dolgu inşaatı planı ve boruların dolgu içindeki konumları (Sargand vd., 2002).....	67
Şekil 3.3. Şekil 3.2’de verilen dolgu inşaat planına göre (a) Dolgu inşaatının önden görünümü (b) Dolgu inşaatının yandan görünümü (Sargand vd., 2002) .....	68
Şekil 3.4. Proje kapsamında kullanılan boruların duvar profilleri (Sargand vd., 2002).....	69
Şekil 3.5.Dolgu inşaatında kullanılan zemine ait likit limit deney sonuçları (Sargand vd., 2002) .....	70
Şekil 3.6. Kum geri dolgu malzemesinin granülometri eğrisi (Sargand vd., 2002) .....	71
Şekil 3.7. Kırma taş geri dolgu malzemesinin granülometri eğrisi (Sargand vd., 2002) .....	72
Şekil 3.8. Kum geri dolgu malzemesi için elde edilen kompaksiyon eğrisi (Sargand vd., 2002) .....	73
Şekil 3.9. Kırma taş geri dolgu malzemesi için elde edilen kompaksiyon eğrisi (Sargand vd., 2002).....	73
Şekil 3.10. Kil numuneler üzerinde yapılan CU üç eksenli basınç deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) .....	76
Şekil 3.11. Kil numuneler üzerinde yapılan CU üç eksenli basınç deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002) .....	76
Şekil 3.12. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) ....	78
Şekil 3.13. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002).....	78
Şekil 3.14. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) ....	79
Şekil 3.15. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002).....	79
Şekil 3.16. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) ....	80
Şekil 3.17. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002).....	80
Şekil 3.18. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) ....	81
Şekil 3.19. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002) .....	82
Şekil 3.20. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) ....	83
Şekil 3.21. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002) .....	83
Şekil 3.22. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002) ....	84



Şekil 3.23. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002) .....	84
Şekil 3.24. Lineer potansiyometrelerin yerleşim planı (Sargand vd., 2002).....	86
Şekil 3.25. Boru içerisindeki lazer profilometrenin görünümü (Sargand ve Masada, 2007) ...	86
Şekil 3.26. Basınç hücrelerinin yerleşim planı (Moran, 2001).....	87
Şekil 3.27. Gerinim ölçerlerin koruge kesitlerindeki yerleşimi (Sargand vd., 2002).....	88
Şekil 3.28. Gerinim ölçerlerin boru üzerindeki konumları (Sargand vd., 2002).....	88
Şekil 3.29. Deney sonuçlarında verilen boru üzerine etki eden gerilmeler .....	90
Şekil 3.30. Farklı rölatif kompaksiyon değerlerinde kum zemin malzemesinin kullanımı ile arazide ölçülen ve sayısal analizlerden belirlenen şekil değiştirme oranları a) %96 rölatif kompaksiyon b) %90 rölatif kompaksiyon (Kılıç ve Akınay, 2019) .....	93
Şekil 3.31. Farklı rölatif kompaksiyon değerlerinde kırmataş zemin malzemesinin kullanımı ile arazide ölçülen ve sayısal analizlerden belirlenen şekil değiştirme oranları a) %96 rölatif kompaksiyon b) %90 - %86 rölatif kompaksiyon (Kılıç ve Akınay, 2019).....	93
Şekil 4.1. A-A' kesitinin model geometrisi a) Kesitin genel görünümü b) Hendek geometrilerinin yakınlaştırılmış görünümü (Soldan sağa doğru sırasıyla Boru 16, Boru 13, Boru 10, Boru 7, Boru 4 ve Boru 1 yer almaktadır.).....	96
Şekil 4.2. B-B' kesitinin model geometrisi a) Kesitin genel görünümü b) Hendek geometrilerinin yakınlaştırılmış görünümü (Soldan sağa doğru sırasıyla Boru 17, Boru 14, Boru 11, Boru 8, Boru 5 ve Boru 2 yer almaktadır.).....	97
Şekil 4.3. C-C' kesitinin model geometrisi a) Kesitin genel görünümü b) Hendek geometrilerinin yakınlaştırılmış görünümü (Soldan sağa doğru sırasıyla Boru 18, Boru 15, Boru 12, Boru 9, Boru 6 ve Boru 3 yer almaktadır.).....	98
Şekil 4.4. 15 kg/m <sup>3</sup> yoğunluğundaki EPS geofom malzeme için a) eksenel gerilme – eksenel şekil değiştirme b) hacimsel şekil değiştirme – eksenel şekil değiştirme grafikleri (Akınay, 2017).....	105
Şekil 4.5. 20 kg/m <sup>3</sup> , 30 kg/m <sup>3</sup> ve 40 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklarındaki EPS geofom malzemelere ait gerilme şekil değiştirme grafiği (Tefera vd.,2010).....	106
Şekil 4.6. Boru 1'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	111
Şekil 4.7. Boru 2'ye ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	112
Şekil 4.8. Boru 4'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	114
Şekil 4.9. Boru 5'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	115

Şekil 4.10. Boru 7'ye ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	117
Şekil 4.11. Boru 8'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	118
Şekil 4.12. Boru 13'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	120
Şekil 4.13. Boru 14'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	121
Şekil 4.14. Boru 16'ya ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	123
Şekil 4.15. Boru 18'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler .....	124
Şekil 5.1. EPS geofom kalınlık değişiminin şematik gösterimi .....	127
Şekil 5.2. Boru 1 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	128
Şekil 5.3. Boru 2 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	129
Şekil 5.4. Boru 4 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	131
Şekil 5.5. Boru 5 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	132
Şekil 5.6. Boru 7 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	134
Şekil 5.7. Boru 8 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	135
Şekil 5.8. Boru 13 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	137

Şekil 5.9. Boru 14 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	138
Şekil 5.10. Boru 16 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	139
Şekil 5.11. Boru 18 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	140
Şekil 5.12. A tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler .....	142
Şekil 5.13. B tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler .....	144
Şekil 5.14. C tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler .....	145
Şekil 5.15. E tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler .....	147
Şekil 5.16. F tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler .....	148
Şekil 5.17. A-A' ekseninde yer alan borularda dolgu inşaatından kaynaklanan şekil değiştirmelerin referans ve EPS'li durumlara göre incelenmesi a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	150
Şekil 5.18. B-B' ekseninde yer alan borularda dolgu inşaatından kaynaklanan şekil değiştirmelerin referans ve EPS'li durumlara göre incelenmesi a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	150
Şekil 5.19. EPS geofoam malzemenin genişlik değişiminin şematik gösterimi .....	151
Şekil 5.20. Boru 1 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	152
Şekil 5.21. Boru 4 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	153
Şekil 5.22. Boru 7 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	154
Şekil 5.23. Boru 13 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	155
Şekil 5.24. Boru 16 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi .....	156

Şekil 5.25. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 2'ye etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme .....	158
Şekil 5.26. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 5'e etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme .....	158
Şekil 5.27. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 8'e etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme .....	159
Şekil 5.28. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 14'e etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme .....	159
Şekil 5.29. EPS geofoam yoğunluk değişiminin B-B' ekseninde yer alan borularda oluşan şekil değiştirmelere etkisi.....	162
Şekil 6.1. Yüksek dolgu yükünün incelendiği analizlerde kullanılan modeller .....	163
Şekil 6.2. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P1'de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi .....	167
Şekil 6.3. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P1'de meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	168
Şekil 6.4. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P2'de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi .....	170
Şekil 6.5. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P2'de meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	171
Şekil 6.6. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3a'da elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi.....	173
Şekil 6.7. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3a'da meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	174
Şekil 6.8. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3b'de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi.....	176
Şekil 6.9. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3b'de meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	177
Şekil 6.10. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3c'de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi.....	179
Şekil 6.11. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile Boru P3c'de meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme.....	180
Şekil 6.12. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P4'de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi.....	182
Şekil 6.13. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P4'te meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	183
Şekil 6.14. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P5'te elde edilen grafikler a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Düşey kemerlenme faktörü değişimi .....	185
Şekil 6.15. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P5'te meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme .....	186

Şekil 6.16. Farklı rijitlikteki D-0,76.PS-650 (P3b) ve D-0,76.PS-302 (P3c) borularına etki eden gerilmeler a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme .....	189
Şekil 6.17. Kırmataş geri dolguda farklı borulara ait kemerlenme değerlerinin birlikte gösterilmesi a) Düşey kemerlenme faktörü değerleri b) Yatay kemerlenme faktörü değerleri .....	191
Şekil 6.18. Kum geri dolguda farklı borulara ait kemerlenme değerlerinin birlikte gösterilmesi a) Düşey kemerlenme faktörü değerleri b) Yatay kemerlenme faktörü değerleri.....	192
Şekil 6.19. Kil geri dolguda farklı borulara ait kemerlenme değerlerinin birlikte gösterilmesi a) Düşey kemerlenme faktörü değerleri b) Yatay kemerlenme faktörü değerleri .....	193



## SİMGELER VE KISALTMALAR

E	: Boru malzemesinin Young Modülü
$\nu$	: Boru malzemesinin Poisson Oranı
I	: Boru malzemesinin birim uzunluktaki atalet momenti
A	: Boru duvarının birim uzunluktaki kesit alanı
EPS	: Expanded Polystyrene - Genleştirilmiş Polistiren
V	: Diferansiyel zemin elemanı üzerindeki düşey yük
$\gamma$	: Zemin malzemesinin birim hacim ağırlığı
$B_d$	: Hendek genişliği
h	: Diferansiyel zemin elemanı ile doğal zemin arasındaki mesafe
$K_a$	: Aktif yanal toprak basıncı
$\mu$	: Geri dolgu malzemesinin içsel sürtünme katsayısı
$\mu'$	: Geri dolgu malzemesi ile doğal zemin arasındaki içsel sürtünme katsayısı
$\phi$	: Geri dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı
$\phi'$	: Geri dolgu malzemesi ile doğal zemin arasındaki içsel sürtünme açısı
$C_d$	: Hendek yük katsayısı
AWWA	: American Water Work Association – Ameriakan Su İşleri Dairesi
$r_{sd}$	: Oturma oranı
$s_m$	: $p_{B_c}$ kalınlığındaki yan dolgu zeminin oturması
$p_{B_c}$	: Yatak düzeyinden boru taç düzeyine kadar olan mesafe
p	: Projeksiyon oranı
$s_g$	: Yatak düzeyinin oturması
$s_f$	: Borunun yatak içerisine oturması
$d_c$	: Boruda düşey ekseninde meydana gelen şekil değişimi
$C_c$	: Pozitif projeksiyon yük katsayısı
$B_c$	: Boru dış çapı
$s_d$	: Boru tacı üzerindeki $p'B_d$ kalınlığındaki zeminin oturması
$p'$	: İkincil projeksiyon oranı
$C_n$	: Negatif projeksiyon yük katsayısı

$H'$	: Negatif projeksiyonlu boru için doğal zemin yüzeyi ile dolgu yüzeyi arasındaki mesafe
$H'_e$	: Negatif projeksiyonlu boru için doğal zemin yüzeyi ile eşit oturma düzlemi arasındaki mesafe
PVC	: Polyvinyl Chloride – Polivinil Klorür
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials – Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
VAF	: Vertical Arching Factor – Düşey Kemerlenme Faktörü
HAF	: Horizontal Arching Factor – Yatay Kemerlenme Faktörü
$W_e$	: Düşeydeki toplam zemin yükü
$W_h$	: Yataydaki toplam zemin yükü
PL	: Prizma yükü
$N_{sp}$	: Boru yatay eksenine gelen zemin gerilmesi
$N_c$	: Boru tacındaki toplam zemin gerilmesi
$N_i$	: Boru tabanındaki toplam zemin gerilmesi
ACPA	: American Concrete Pipe Association – Amerikan Beton Boru Birliği
ORITE	: Ohio Research Institute for Transportation and the Environment – Ohio Ulaştırma ve Çevre Araştırma Enstitüsü
ODOT	: Ohio Department of Transportation – Ohio Ulaştırma Bakanlığı
ASTM Topluluğu	: American Society for Testing and Materials – Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
$c$	: Kohezyon
$\sigma_{vc}$	: Borunun taç bölgesine etkiyen düşey gerilme
$\sigma_{hs}$	: Borunun yan duvarına etkiyen yanıl gerilme
$w$	: Su muhtevası
$\gamma_k$	: Kuru birim hacim ağırlık
$\gamma_n$	: Doğal birim hacim ağırlık
$E_{50}^{ref}$	: Referans ortalama sekant modülü
$E_{50}$	: Ortalama sekant modülü
$E_{oed}^{ref}$	: Referans tanjant ödometre modülü
$E_{ur}^{ref}$	: Referans yük boşaltma – geri yükleme modülü

$\varphi$	: Kayma mukavemeti açısı
$\psi$	: Genleşme açısı
EA	: Normal rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
d	: Eşdeğer kalınlık
$\sigma_1$	: Eksenel gerilme
$\varepsilon_v$	: Hacimsel şekil değiştirme
$\varepsilon_a$	: Eksenel şekil değiştirme
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
$p^{\text{ref}}$	: Referans gerilme
$R_{\text{int}}$	: Arayüzey azaltma faktörü
$\Delta y$	: Düşey şekil değiştirme
$\Delta x$	: Yatay şekil değiştirme
D	: Boru çapı
r	: Boru yarıçapı
I	: Boru duvarının birim uzunluktaki eylemsizlik momenti
E	: Elastisite modülü
m	: Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet



## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca kıymetli bilgi birikimi ve tecrübesiyle tez çalıőmamı yönlendiren ikinci danışmanım Doç. Dr. Havvanur KILIÇ'a, anlayıő ve sabır göstererek destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER'e teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalıőmam kapsamında ihtiyacım olan her durumda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Furkan AKYELKEN'e içten bir teşekkürü borç bilirim.

Ekim, 2021

Sercan BOZKURT

İnşaat Mühendisi



## 1. GİRİŞ

Tarih boyunca gömülü borular birçok uygarlık tarafından kullanılmıştır. Genel olarak su ve kanalizasyon projelerinde kullanılan gömülü boruların kalıntıları dünyanın farklı yerlerinde görülmüştür (Moser ve Folkman, 2008). Gömülü borular günümüzde ise kamunun ihtiyaçlarını karşılamak için birçok alanda kullanılmaktadır. Petrol ve doğalgaz gibi birçok enerji maddesinin taşınması, buharlaşma ve kirlenmenin önlenmesi gibi amaçlarla su iletimini, kanalizasyon hatları, elektrik ve telefon hatlarının yer altından taşınması gibi alanlar gömülü boruların kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir (Terzi ve Yıldırım, 2009). Bu belirtilen alanlar şehirlerin vazgeçilmez ihtiyaçlarındandır. Bu ihtiyaçlar uzun süre boyunca rijit borular ile giderilmiştir. Ancak 20. yüzyılın ortalarından itibaren plastik sanayisindeki gelişmelerle birlikte esnek boruların kullanım oranı artmıştır. Esnek boruların rijit borulara göre kullanım oranının artmasında daha hafif olması, maliyetinin düşük olması, kimyasal direncinin yüksek olması ve korozyona uğramaması gibi sebepler etkilidir (Masada ve Sargand, 2011).

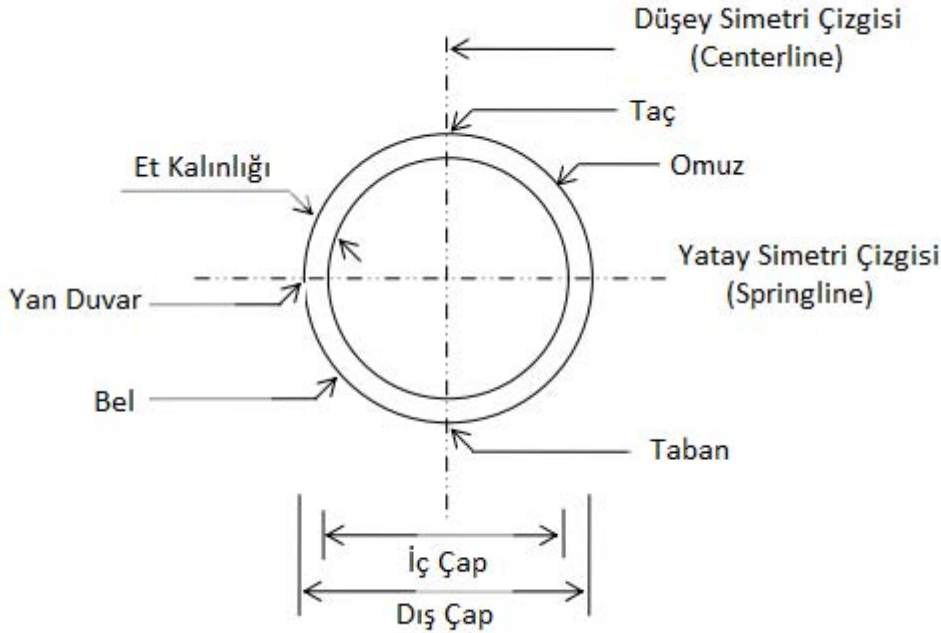
Gömülü esnek boruların sahip olduğu bir diğer avantaj ise boru – zemin ilişkisi sonucu meydana gelen kemerlenme mekanizmasıdır. Esnek boruların gömülü olduğu zemin içerisinde görülen pozitif kemerlenme mekanizması ile boru üzerine etkiyen yüklerde azalma meydana gelmektedir. Rijit borularda da pozitif kemerlenmenin gelişmesini sağlamak için yapay hendek yöntemine geliştirilmiştir. Bu yöntemde göre boru üzerinde oluşturulan yumuşak bölge ile pozitif kemerlenme sağlanıp boruya etki eden yük azaltılmaktadır. EPS geofom malzemede yumuşak bölgede kullanılan malzemelerden birisidir. Bu çalışma kapsamında ise EPS geofom malzemenin kalın dolgular altında yer alan termoplastik borular üzerinde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler ile EPS geofom malzemenin esnek borularda meydana gelen pozitif kemerlenme mekanizmasını artırıp artıramayacağı incelenmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

20. yüzyılın başlarında Marston tarafında gömülü rijit borular üzerinde ilk çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda borular üzerine etkiyen zemin gerilmeleri analiz edilmiş ve bunların azaltılması için çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde ise gömülü yapıların korunması ve üzerine etkiyen gerilmeleri azaltılması için EPS geofom, geomembran, geocell gibi farklı ürünler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

### 2.1. Gömülü Borular Hakkında Teknik Bilgiler

Literatürde kullanılan ifadelerle boru kesit geometrisi Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Boru kesit geometrisinde kullanılan terimler (Akınay, 2010; Mada, 2005)

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi boru kesitini düşey olarak ikiye ayıran çizgiye düşey simetri çizgisi, yatay olarak ikiye ayıran çizgiye ise yatay simetri çizgisi denir. Borunun üst noktası taç (crown), alt noktası taban (invert) olarak adlandırılır. Borunun yanlarında kalan yatay simetri çizgisinin kestiği noktalara da yan duvarlar denir. Taç ile yan duvarlar arasında kalan kısım omuz (shoulder), yan duvarlar ile taban arasında kalan kısım ise bel (haunch) olarak ifade edilir. Şekil 2.1’de verilen boru kesitine ait olan mühendislik özellikleri aşağıda verilmiştir. Bu özellikler;

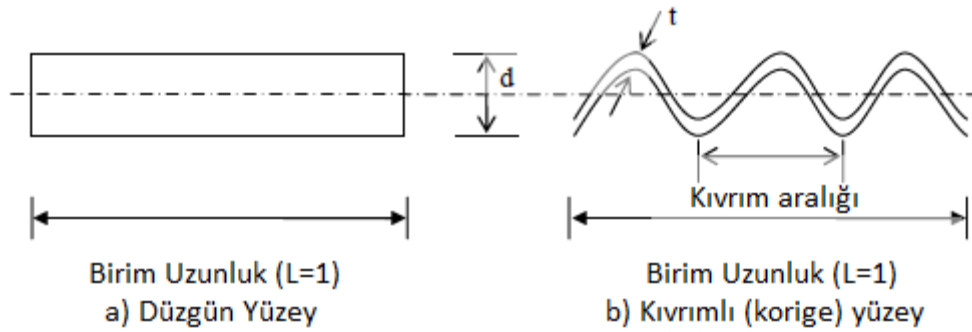
$E$  = Boru malzemesinin Young Modülü

$\nu$  = Boru malzemesinin Poisson Oranı

$I$  = Boru malzemesinin birim uzunluktaki atalet momenti

$A$  = Boru duvarının birim uzunluktaki kesit alanıdır (Bashir, 2000).

Yarıçapı  $r$  olan bir borunun yük altındaki davranışını belirlemede iki önemli rijitlik parametresi mevcuttur. Bu parametreler çember rijitliği ( $EI/r^3$ ) ve eğilme rijitliği ( $EI/r^2$ )' dir. Boru yarıçapı, malzeme ve duvar tipi bu rijitlik parametrelerini etkiler. Örnek olarak boru duvarı  $t$  kalınlığına sahip düzgün kesitli bir borunun birim uzunluktaki kesit alanı  $A = t$  ve atalet momenti  $I = t^3/12$  olur. Eğer  $t$  kalınlığı 1 cm' den daha küçük olursa eğilme rijitliği değerleri çok küçük olur. Ancak  $h$  yüksekliğinde kıvrıma sahip bir boru duvarı kullanılması durumunda eğilme rijitliği  $(h/t)^2$  kadar artar. Bu şekilde kıvrımlı duvar kesitleri kullanılıp küçük kalınlıklarda eğilme rijitliği artırılarak borunun dayanımı artırılır (Bashir, 2000; Terzi, 2007). Şekil 2.2'de düzgün kesit ve kıvrımlı (korige) kesitler verilmiştir.



Şekil 2.2. Boru duvar kesitleri a) Düzgün yüzey b) Kıvrımlı (korige) yüzey (Mada, 2005)

Gömülü borular yapıldıkları malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirence göre rijit veya esnek boru olarak isimlendirilir. Yük altında çok az şekil değiştirme yaptığı veya hiç yapmadığı kabul edilen borular rijit boru olarak ifade edilirken, yük altında yapısal hasar olmadan %2'den daha fazla şekil değişimine uğrayan borular esnek boru olarak tanımlanır. Rijit borular üzerine uygulanan tüm yükler boru tarafından taşınırken esnek borularda ise esneyebildikleri için üzerlerine uygulanan yükün bir kısmını çevresindeki zemine aktarabilir

(Moser ve Folkman, 2008). Rijit ve esnek boruların yük altındaki davranışı Şekil 2.3'te verilmiştir.



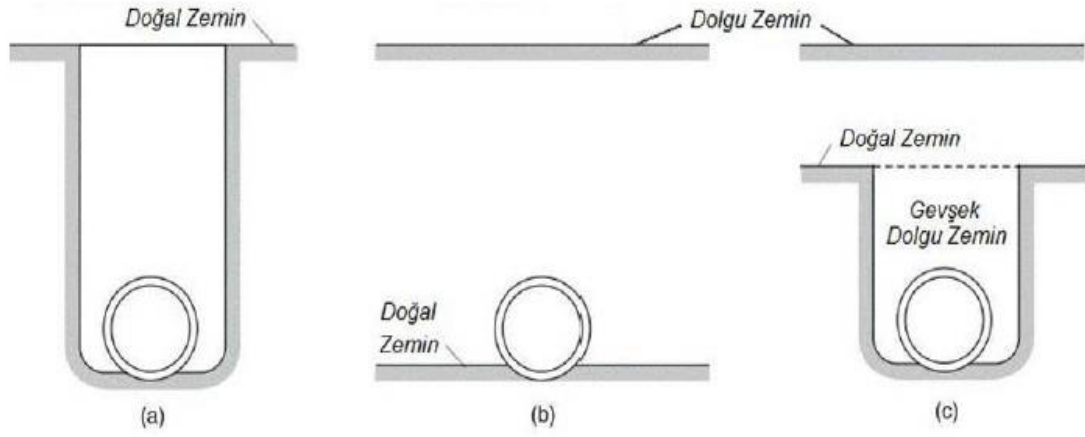
Şekil 2.3. Boruların yük altındaki davranışı a) rijit boru b) esnek boru

## 2.2. Gömülme Ortamlarına Göre Boru Tipleri

Marston yaptığı çalışmalarda boruları gömülme ortamlarına göre iki ana sınıfa ayırmıştır. Bu sınıflar hendek tipi borular ve dolgu tipi borulardır. Dolgu tipi borular da pozitif projeksiyonlu ve negatif projeksiyonlu olarak iki gruba ayrılır (Handy ve Spangler, 2007).

1. Hendek tipi borular göreceli olarak dar bir hendek içerisine yerleştirilip ardından geri dolgu ile doğal zemin seviyesine kadar üzeri kapatılan boru tipidir. Genel olarak kanalizasyon, su ve gaz hatları bu şekilde yerleştirilir.
2. Dolgu tipi borular doğal zemin seviyesinde veya sığ bir hendeğe yerleştirilen boru tipidir. Borunun yerleştirilmesinin ardından belirlenen seviyeye kadar borunun üzeri dolgu ile kapatılır.
  - a) Pozitif projeksiyonlu borular doğal zemin seviyesinde sığ bir yatağa yerleştirilen boru tipi olarak tanımlanır.
  - b) Negatif projeksiyonlu borular dar ve sığ bir hendek içerisine yerleştirilen boru tipidir. Borunun taç seviyesi doğal zemin seviyesinin altında yer alır (Handy ve Spangler, 2007).

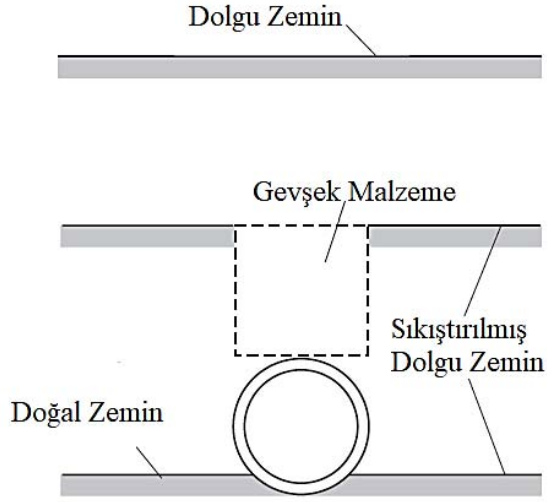
Gömülme durumlarına göre boru tipleri Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Gömülme ortamlarına göre boru tipleri a) Hendek tipi boru b) Pozitif projeksiyonlu boru c) Negatif projeksiyonlu boru (Handy ve Spangler, 2007)

Belirtilen boru tiplerinin yanı sıra yapay hendek borusu olarak belirtilen bir boru tipi daha mevcuttur. Yapay hendek yöntemi (imperfect ditch – induced trench conduit) pozitif projeksiyonlu olarak yerleştirilen rijit boru üzerine etki eden yükün mevcut zemin yükünden daha fazla olduğunun görülmesi üzerine geliştirilerek boru üzerine etki eden yükün azaltılması sağlanmıştır. Bu yöntem boru tacı üzerinde açılan hendek içerisine gevşek malzemenin yerleştirilmesi ile uygulanır. Sağlamer ve Balkaya (2005) Türkçe bir ifadesi olmayan bu yöntemi eksik hendek yöntemi olarak ifade etmişlerdir. Ancak Akınay (2017) boru üzerinde yapay bir hendek durumu oluşturulduğu için bu yöntemin adının “yapay hendek yöntemi” veya “uyarılmış hendek yöntemi” olarak ifade edilmesinin daha doğru olacağını belirtmiştir. Şekil 2.5’te yapay hendek yöntemini ifade eden şekil verilmiştir.

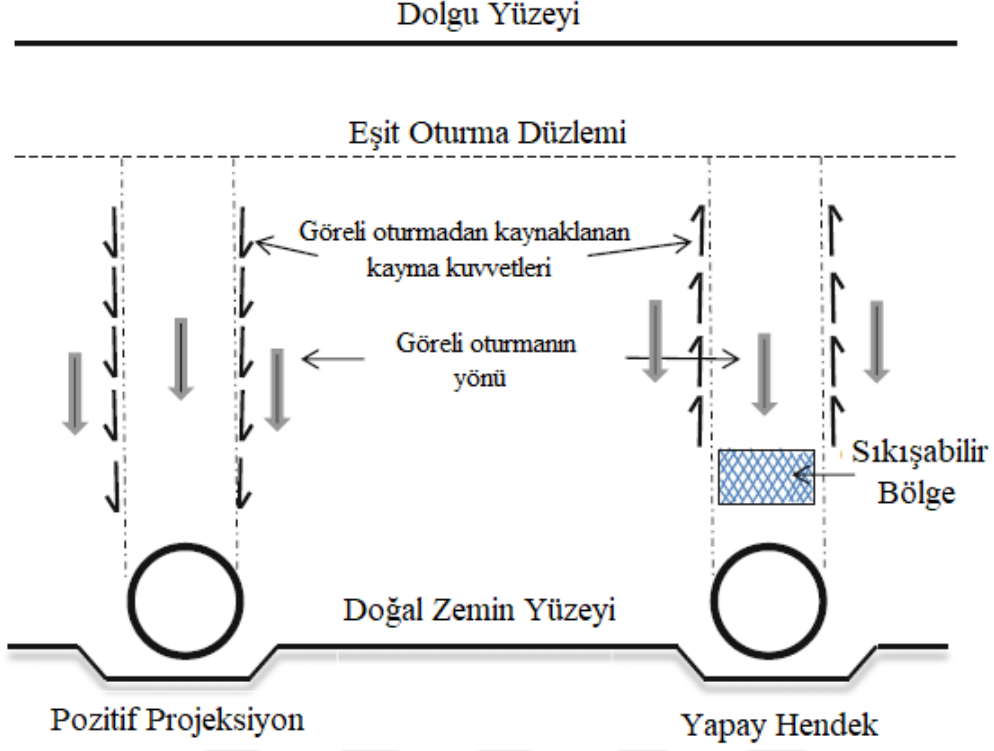
Yapay hendek yönteminde gömülü boru üzerinde oluşturulacak yumuşak bölgede farklı malzemeler kullanılmıştır. Sladen ve Oswel (1988) arazi çalışmasında rijit boruların üzerine gelecek 11 m’lik dolgu yükünü güvenli bir şekilde taşıyabilmesi için boruların üstüne balyalanmış saman ve polistiren tanecikleri yerleştirmiştir. McAfee ve Valsangkar (2005) yapay hendek uygulamasında rijit boru üzerinde hızar tozu ile sıkışabilir bölge oluşturmuştur. Ayrıca boru üzerinde oluşturulacak olan yumuşak bölge için balyalanmış saman, yaprak, gevşek zemin ve genişletilmiş polistiren (EPS) blok gibi hafif ve sıkışabilir malzemelerin kullanıldığı belirtilmiştir (Handy ve Spangler, 2007; Placido ve Portelina, 2019). Ancak Horvath (1997) organik malzemelerin gerilme – şekil değiştirme davranışının belirlenmesinin zor olacağını ve bu malzemelerin anaerobik ayrışma ile oluşan metan gazının patlamaya neden olabileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.5. Yapay hendek yöntemi (Handy ve Spangler, 2007)

Sladen ve Oswel (1988) yapay hendek yönteminin uygulanmasını saman balyası ve polistiren tanecikler için farklı şekilde yapmıştır. Balyalanmış saman kullanıldığı durumda dolgu malzemesi borunun taç seviyesine kadar yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Ardından balyalanmış saman boru üstüne yerleştirildikten sonra dolgu malzemesi sıkışabilir malzemenin yanlarına yerleştirilmiştir. Son olarak da istenilen seviyeye kadar dolgu yapılmıştır. Polistiren boncuk kullanıldığı durumda ise dolgu taç seviyesinin üstüne kadar devam ettirilmiştir. Daha sonra dolgu içinde taç seviyesine kadar inilerek bir hendek oluşturulmuş ve polistiren boncuk bu hendek içerisine yerleştirilmiştir. Yine son olarak istenilen seviyeye kadar dolgu yerleştirilmiştir.

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi yapay hendek yönteminde boru üstüne yerleştirilen sıkışabilir bölge ile kemerlenme mekanizması desteklenerek boru etrafındaki yüklerin dağıtıldığı gösterilmiştir (Meguid, 2019).



Şekil 2.6. Yapay hendek yönteminin şematik gösterimi (Meguid, 2019)

### 2.3. Kemerlenme Mekanizması

Marston (1930) çalışmasında kemerlenme mekanizmasının gömülü borular üzerindeki etkisinden bahsetmiştir. Çalışmasında gömülü borulara etki eden yükün büyüklüğünün boru üstündeki ve bitişiğindeki zemin prizmaları arasındaki göreceli oturmadan etkilendiğini belirtmiştir. Bu göreceli oturma boru üzerindeki yükü arttıracak veya azaltabilecek kayma gerilmelerini harekete geçirerek boru davranışı üzerinde pozitif veya negatif bir etkiye sahip olabilecektir.

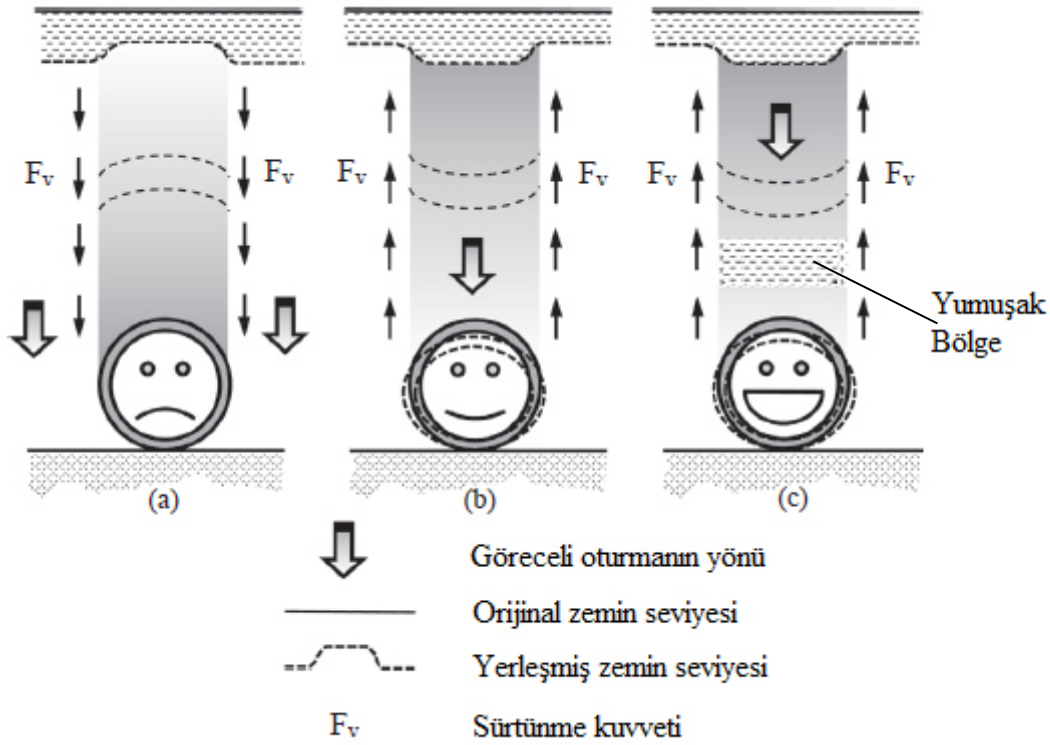
Terzaghi (1943) ise kemerlenme davranışını hem arazi hem de laboratuvarında görülen bir olay olarak belirterek hareketli zemin kütesinden durağan zemin kütesine yük aktarımı olarak tanımlamıştır. Zemin içerisinde oluşan bağıl hareket ile durağan ve hareketli zemin kütleleri arasında kayma direnci meydana getirecektir. Kayma direnci hareketli zemin kütesini orijinal konumunda tutma eğiliminde olduğundan hareketli kısım üzerine etki eden yük durağan zemin kütesine aktaracaktır.

Tafreshi vd. (2020) rijit veya esnek boru kullanımı durumunda kemerlenme mekanizmasının nasıl geliştiğini belirtmiştir.



- Rijit borularda borunun deformasyonu genellikle önemsizdir ve bu nedenle boru üzerindeki zemin prizmasının oturması bitişik zemin prizmalarından azdır. Zemin prizmaları arasında meydana gelen bu farklı oturma zemin prizmaları arayüzeyinde aşağı yönlü kayma gerilmesi oluşturur. Bu durumda boru üzerine etkiyen yükte artış meydana gelirken bu durum negatif kemerlenme olarak ifade edilir.
- Esnek borularda ise boru tacının deplasmanı nedeniyle boru üzerindeki zemin prizmasının oturması bitişik zemin prizmalarından daha büyüktür. Bundan dolayı zemin prizmaları arayüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri yukarı yönlü oluşur. Bu durumda boru üzerine etki eden yükün bir kısmı bitişik zemin prizmalarına aktarılır. Pozitif kemerlenme olarak ifade edilen bu durumda boru üzerine etkiyen yükte azalma meydana gelir.

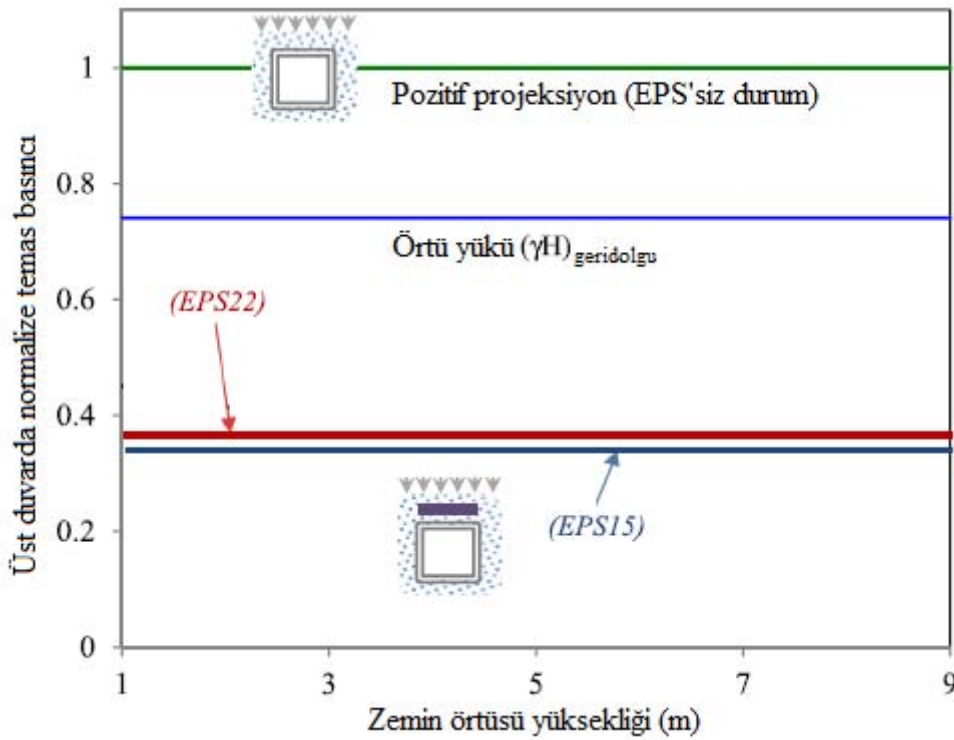
Şekil 2.7’de rijit ve esnek borulara oluşan kemerlenme mekanizmaları belirtilmiştir.



Şekil 2.7. Boru üzerine etki eden kemerlenme mekanizmaları (a) rijit boru üzerine etki eden negatif kemerlenme (b) esnek boru üzerine etki eden pozitif kemerlenme (c) esnek boru üzerinde uygulanan yapay hendek yöntemi (Kang, 2019)

Şekil 2.7a'da rijit boru üzerine etki eden negatif kemerlenme, Şekil 2.7b'de esnek boru üzerine etki eden pozitif kemerlenme ve Şekil 2.7c' de ise yapay hendek yöntemi uygulanmış esnek boruyu göstermektedir. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere yapay hendek yöntemi ile boru üzerine sıkışabilir malzeme ekleyerek boru üzerindeki zemin prizmasının bitişik zemin prizmalarına göre oturması arttırılarak boru üzerine etki eden gerilmelerin bir kısmı bitişik zemin prizmalarına aktarılır. Bundan dolayı yapay hendek yöntemi ile kemerlenme mekanizması birlikte düşünülmelidir.

Meguid vd. (2017a) laboratuvar ortamında rijit menfez üzerinde gerçekleştirdiği deneylerle ve sayısal analizlerle EPS malzemenin yapay hendek yönteminde kullanılması durumunda rijit menfez üzerinde etkilerine belirlemiştir. Bu çalışma içerisinde rijit menfez üzerine etki eden pozitif projeksiyon basıncı deneylerle ölçülmüştür, EPS malzeme ile belirlenen basınçlar ise sayısal analizlerle belirlenmiştir. Şekil 2.8'de elde edilen basınçların karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.8. Rijit menfez üzerine etki eden basınçların karşılaştırılması (Meguid vd., 2017a)

Şekil 2.8'de pozitif projeksiyon durumunda yerleştirilen rijit menfez üzerine etki eden basınç negatif kemerlenmenin etkisi ile zeminin kendi ağırlığından kaynaklanan örtü yükünden %25 daha fazla olduğu görülmektedir. Yapay hendek yönteminde 22 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki

EPS22 malzemesi kullanıldığında %35, 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki EPS15 malzemesi kullanıldığında %38 oranında basınçta azalma meydana geldiği ifade edilmiştir.

## 2.4. Marston Yük Teorisi

Marston gömülü rijit borular üzerine etki eden yükleri belirlemek için 1900' lü yılların başında çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar gömülü borulara etki eden yükleri hesaplama yöntemlerinin başlangıcı olmuştur. Marston' ın gömülü borular üzerinde yaptığı çalışmalar Marston Yük Teorisi olarak bilinmektedir. Teoride boru üzerine etki eden yükün belirlenmesi boru üzerindeki zemin prizmasının ağırlığına ve boru üzerindeki zemin prizması ile bitişik zemin prizmaları arasında oluşan kayma gerilmelerine dayanmaktadır (Moser ve Folkman, 2008).

Teoride kohezyonun gelişmesi için önemli bir zamanın geçmesi gerektiğinden ve kohezyonsuz durumda boru üzerindeki maksimum yükü sağlayacağı için kohezyonun ihmal edilebilir olduğu varsayılmıştır (Moser ve Folkman, 2008). Ayrıca hendek kenarlarındaki zeminin yanal gerilmesinin düşey gerilmeye oranı olarak Rankine Aktif Toprak Basıncı Katsayısı kullanılmıştır (Handy ve Spangler, 2007).

### 2.4.1. Hendek Durumu

Şekil 2.9'da verilen hendek kesitinde herhangi bir diferansiyel zemin elemanı (dh) için düşeyde kuvvetler dengesi oluşturulur ( $\Sigma F_v=0$ ).

$$V + dV + \frac{2K_a V}{B_d} \mu' dh = V + \gamma B_d dh \quad (2.1)$$

Diferansiyel zemin elemanı üzerindeki yük 2.2 eşitliği ile verilmiştir.

$$V = \frac{\gamma B_d^2}{2K_a \mu'} \left(1 - e^{-2K_a \mu' \left(\frac{h}{B_d}\right)}\right) \quad (2.2)$$

2.1 ve 2.2 eşitliği ile verilen ifadeler:

$V$  = Diferansiyel zemin elemanı üzerindeki düşey yük (kN/m)

$\gamma$  = Geri dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (kN/m<sup>3</sup>)

$B_d$  = Hendek genişliği (m)

$h$  = Diferansiyel zemin elemanı ile doğal zemin arasındaki mesafe (m)

$$K_a = \frac{\sqrt{\mu^2+1-\mu}}{\sqrt{\mu^2+1+\mu}} = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} = \text{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \text{ (Aktif yanal toprak basıncı)} \quad (2.3)$$

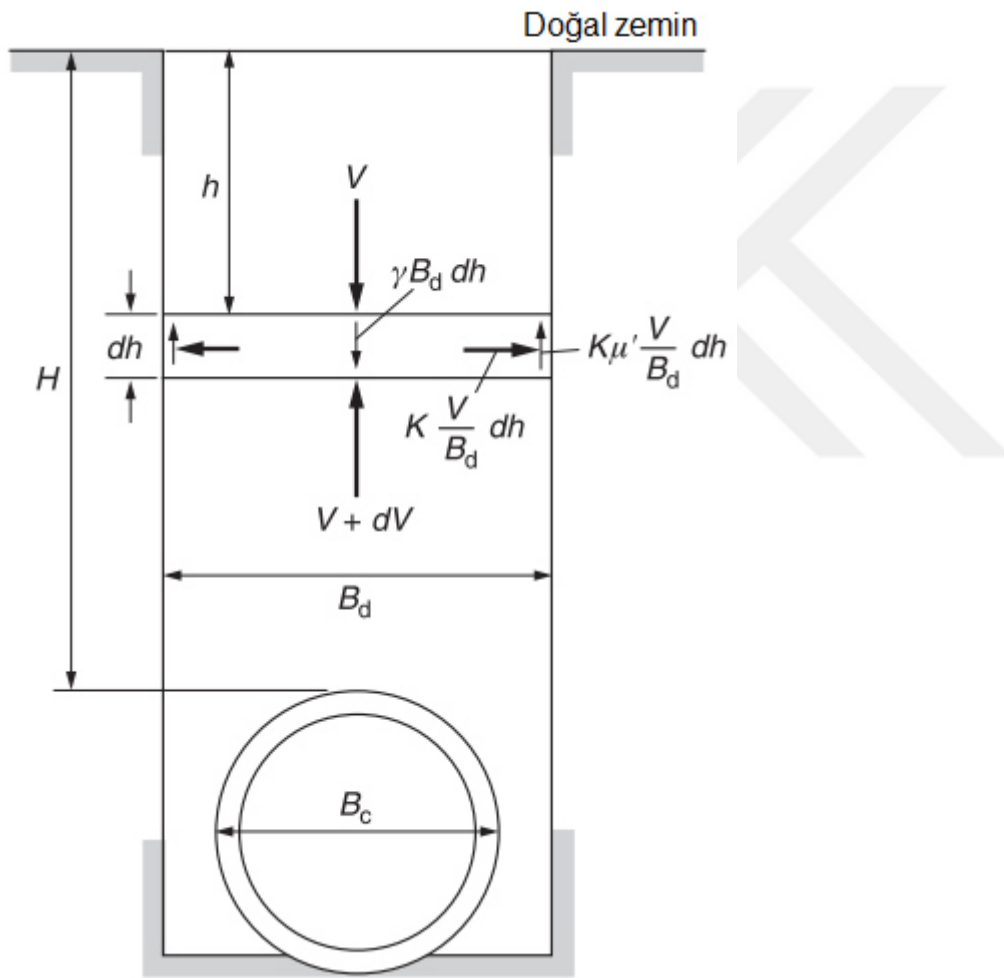
2.3 eşitliğinde verilen ifadeler:

$\mu$  = Geri dolgu malzemesinin içsel sürtünme katsayısı ( $\text{tg}\varphi$ )

$\mu'$  = Geri dolgu malzemesi ile doğal zemin arasındaki içsel sürtünme katsayısı ( $\text{tg}\varphi'$ )

$\varphi$  = Geri dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı ( $^\circ$ )

$\varphi'$  = Geri dolgu malzemesi ile doğal zemin arasındaki içsel sürtünme açısı ( $^\circ$ )



Şekil 2.9. Marston hendek kesiti (Handy ve Spangler, 2007)

2.2 eşitliğinde  $h=H$  yapılarak boru tacı üzerine etkiyecek yük belirlenir bununla birlikte 2.2 eşitliğinde hesabı kolaylaştırmak için yük katsayısı ( $C_d$ ) belirlenmiştir.

$$C_d = \frac{1 - e^{-2K_a \mu' \left(\frac{H}{B_d}\right)}}{2K_a \mu'} \quad (2.4)$$

Bu değişlikle 2.2 eşitliği aşağıdaki gibi olur.

$$W_d = C_d \gamma B_d^2 \quad (2.5)$$

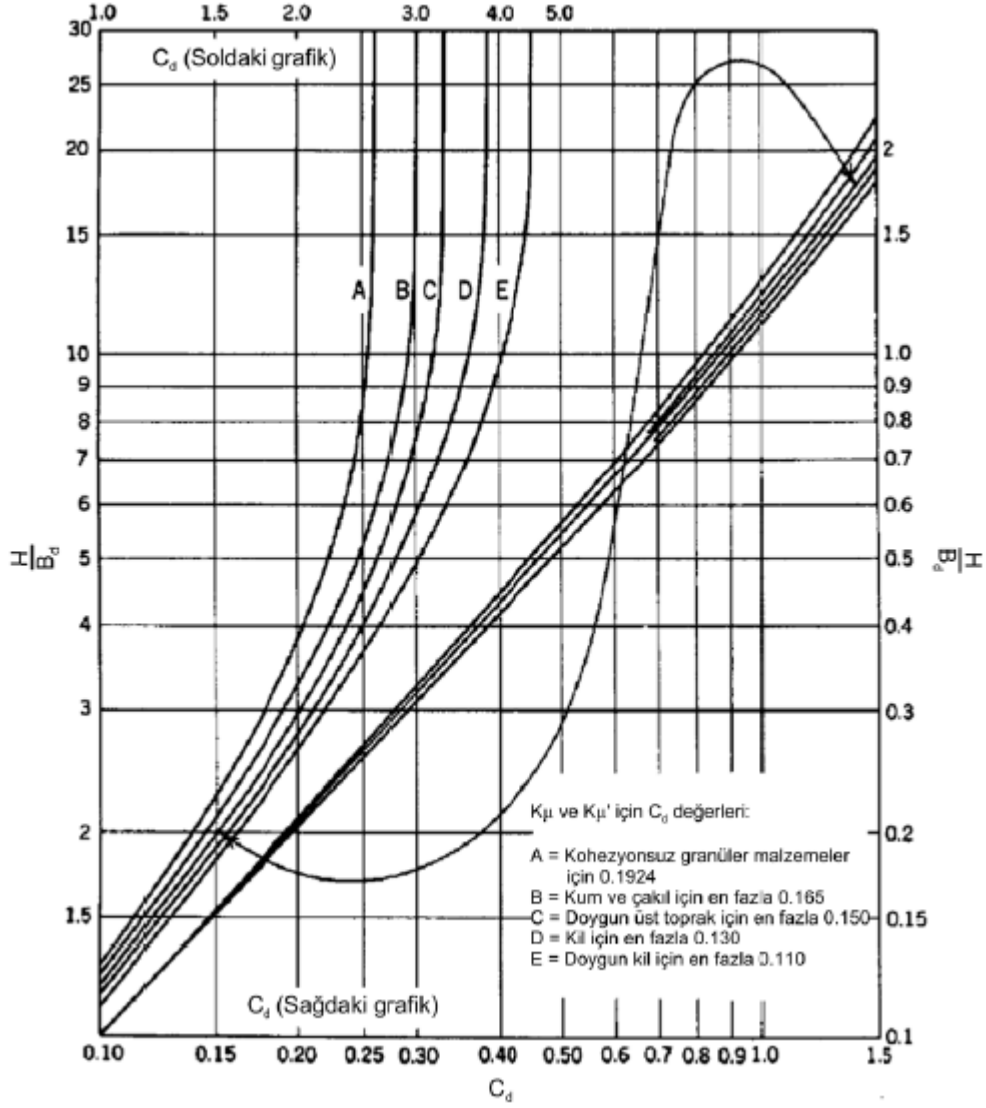
2.4 ve 2.5 eşitliklerinde verilen;

$C_d$  = Hendek yük katsayısı

Farklı zemin türleri için Marston ve Anderson (1913) tarafından belirlenen Rankine katsayısı ve sürtünme katsayısı değerleri izelge 2.1’de verilmiştir. Diğer yandan  $H/B_d$  oranına göre  $C_d$  değerleri Şekil 2.10’da verilen diyagram yardımı ile belirlenir (Moser ve Folkman, 2008).

Çizelge 2.1. Farklı zemin türleri için Rankine katsayısı ve sürtünme katsayısı değerleri (Marston ve Anderson, 1913)

Zemin Türü	Birim Hacim Ağırlığı $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Rankine Katsayısı $K_a$	Sürtünme Katsayısı $\mu'$
Kısmen sıkıştırılmış nemli bitkisel zemin	15	0,33	0,50
Suya doygun bitkisel zemin	18	0,37	0,40
Kısmen sıkıştırılmış nemli zemin	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

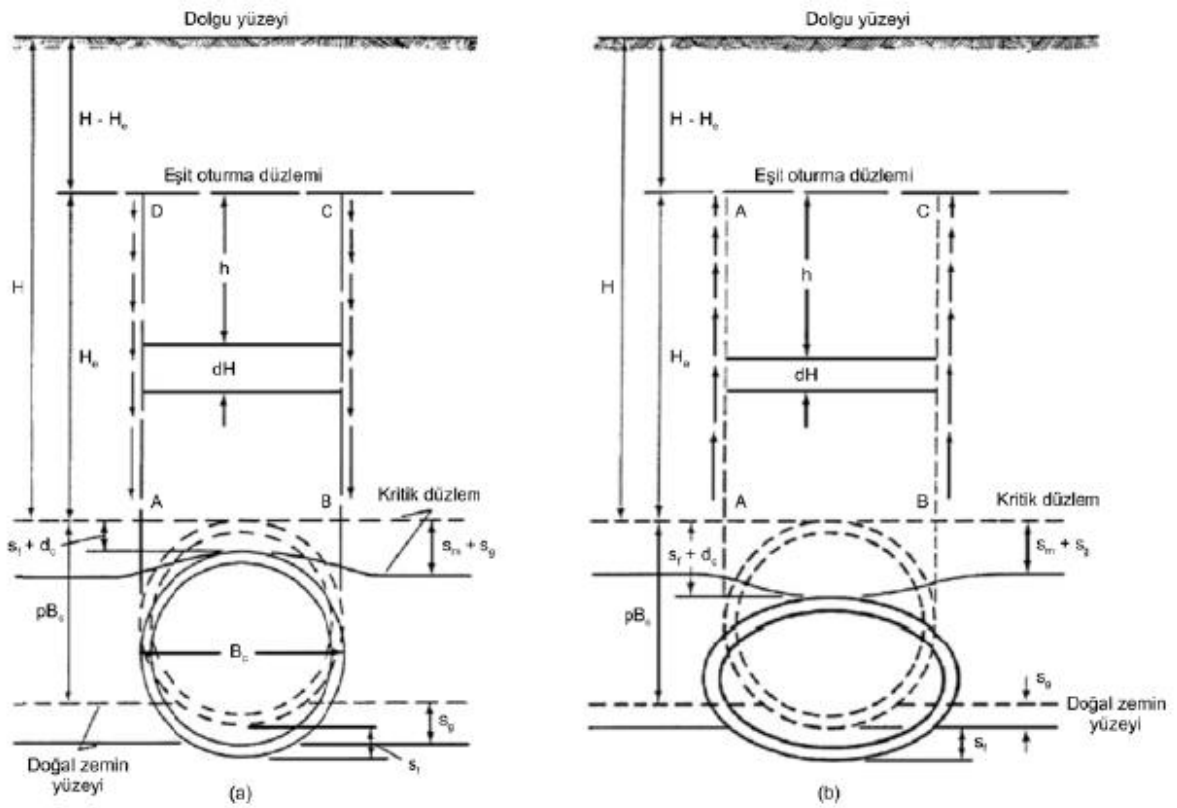


Şekil 2.10. Farklı zemin türleri için  $H/B_d$  oranına göre  $C_d$  değerleri(Moser ve Folkman,2008)

#### 2.4.2. Pozitif Projeksiyon Durumu

Pozitif projeksiyonlu borular taç seviyesi doğal zemin seviyesinin üstünde kalan boru tipi olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.11'de iki farklı pozitif projeksiyonlu boru örneği gösterilmektedir. Her iki görselde de görüldüğü gibi boru üzerindeki yatay düzlem kritik düzlem olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.11a'da borunun yanlarındaki zemin prizmaları boru üstündeki zemin prizmasına göre daha fazla oturur ve kritik düzlem bitişik zemin prizmalarında aşağı yönlü deforme olur. İfade edilen bu durum projeksiyon koşulu olarak tanımlanır. Şekil 2.11b'de ise boru tacının deplasmanı borunun yanlarındaki zemin prizmalarından daha fazla gerçekleşir ve kritik düzlem boru üzerinde aşağı yönlü deforme olur. İfade edilen bu durum hendek koşulu olarak tanımlanır. Pozitif projeksiyonlu borularda yükün hesaplanabilmesi ise

oturma oranı ( $r_{sd}$ ) geliştirilmiştir. Projeksiyon koşulu pozitif oturma oranı ile karakterize edilirken hendek koşulu negatif oturma oranı ile karakterize edilmiştir (AWWA, 2008).



Şekil 2.11. Pozitif projeksiyonlu boruların karşılaştırılması (a) projeksiyon koşulu (rijit boru) (b) hendek koşulu (esnek boru) (Moser ve Folkman,2008).

$$r_{sd} = \frac{(s_m + s_g) - (s_f + d_c)}{s_m} \quad (2.6)$$

2.6 eşitliğinde verilen ifadeler:

$r_{sd}$  = Oturma oranı

$s_m$  =  $pB_c$  kalınlığındaki yan dolgu zemininin oturması

$pB_c$  = Yatak düzeyinden boru tacı düzeyine kadar olan mesafe

$p$  = Projeksiyon oranı

$s_g$  = Yatak düzeyinin oturması

$s_f$  = Borunun yatak içerisine oturması

$d_c$  = Boruda düşey ekseninde meydana gelen şekil değişimi

Pozitif projeksiyonlu borularda kayma kuvvetlerinin sıfır olduğu borunun üzerinde yatay bir düzlem Marston tarafından belirlendi. Bu düzlem eşit oturma düzlemi olarak ifade edilir. Bu düzlemin üzerinde oturmalar eşdeğerdir. Eşit oturma düzleminin var olduğu durum (dolgu içinde yer aldığı) tamamlanmamış projeksiyon koşulu veya tamamlanmamış hendek koşulu olarak ifade edilir. Eşit oturma düzleminin sanal olduğu durum (kayma kuvvetleri dolgu üst seviyesine kadar uzanır) tamamlanmış projeksiyon koşulu veya tamamlanmış hendek koşulu olarak ifade edilir (Moser ve Folkman,2008).

Pozitif projeksiyonlu boruların üzerine gelen yükü hesaplamak için kullanılan formül Eşitlik 2.7’de verilmiştir. Yük katsayılarını belirlemek için kullanılan formüller ise Eşitlik 2.8 ve Eşitlik 2.9’da verilmiştir.

$$W_c = C_c \gamma B_c^2 \quad (2.7)$$

$$C_c = \frac{e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H}{B_c}\right)} - 1}{\pm 2K_a \mu}, \quad H \leq H_e \quad (2.8)$$

$$C_c = \frac{e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H}{B_c}\right)} - 1}{\pm 2K_a \mu} + \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c}\right) e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H}{B_c}\right)}, \quad H > H_e \quad (2.9)$$

2.7, 2.8 ve 2.5 eşitliklerinde verilen;

$C_c$  = Pozitif projeksiyon yük katsayısı

$B_c$  = Boru dış çapı (m)

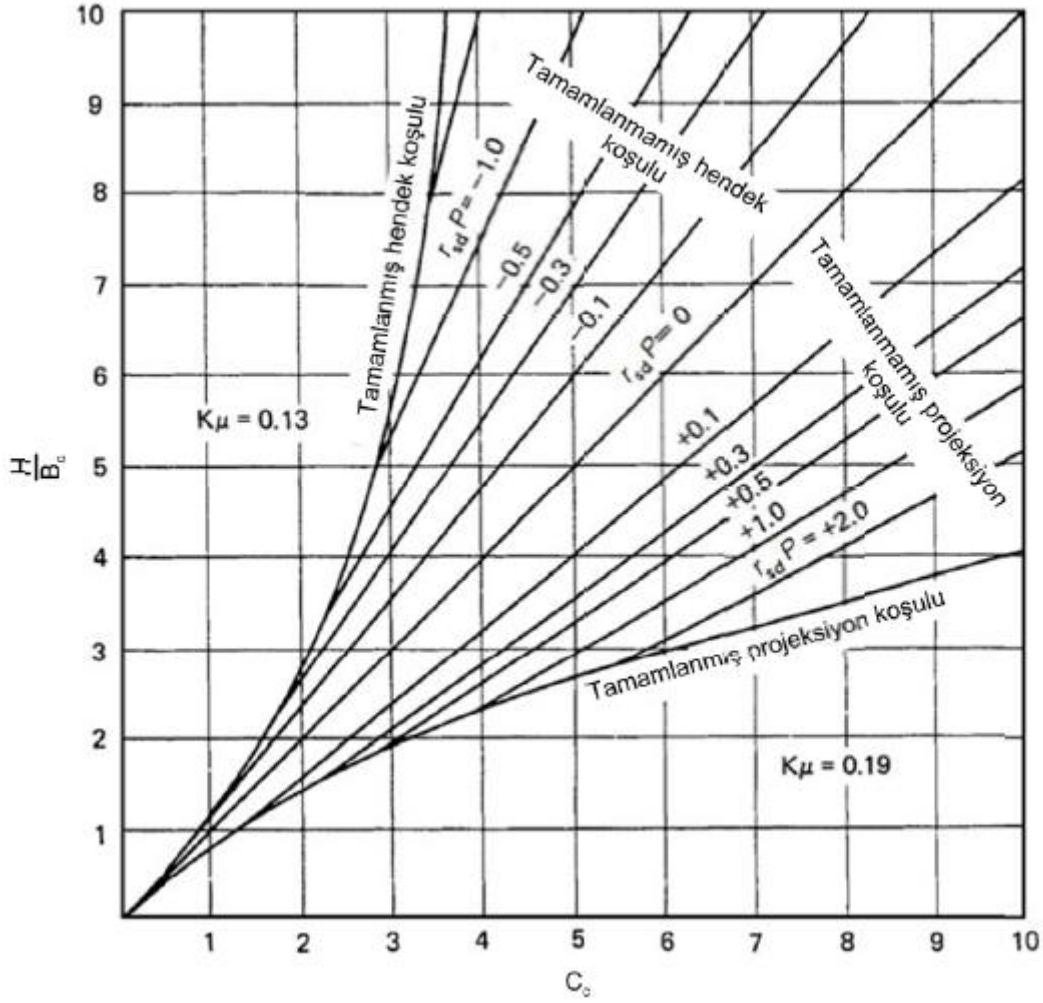
Eşitlik 2.8 tamamlanmış koşullar içindir. Eksi işaretler tamamlanmış hendek koşulu için, pozitif işaretler ise tamamlanmış projeksiyon koşulu içindir. Eşitlik 2.9 tamamlanmamış koşullar için geçerlidir, burada eksi işaretler tamamlanmamış hendek koşulu için ve artı işaretler tamamlanmamış projeksiyon koşulu içindir.  $H_e = H$  olması durumunda tamamlanmamış koşullar tamamlanmış koşullara dönüşür ve  $C_c$  yük katsayısının hesaplanmasında Eşitlik 2.8 kullanılır (Moser ve Folkman, 2008).

Eşit oturma düzleminin yüksekliğini belirlemek için kullanılan formül Eşitlik 2.10’ da verilmiştir.

$$\left[ \frac{1}{2K\mu} \pm \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c}\right) \pm \frac{r_{sd}P}{3} \right] \frac{e^{\pm 2K\mu \left(\frac{H_e}{B_c}\right)} - 1}{\pm 2K\mu} \pm \frac{1}{2} \left(\frac{H_e}{B_c}\right)^2 \pm \frac{r_{sd}P}{3} \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c}\right) e^{\pm 2K\mu \left(\frac{H_e}{B_c}\right)} - \frac{1}{2K\mu} X \frac{H_e}{B_c} \pm \frac{H}{B_c} X \frac{H_e}{B_c} = \pm r_{sd}P \frac{H}{B_c} \quad (2.10)$$



$K_\mu$  değeri genellikle projeksiyon koşulu için 0.19 ve hendek koşulu için 0.13 olarak alınır.  $H/B_c$  oranına göre  $C_c$  parametresi farklı oturma oranlarına göre Şekil 2.12’de verilen diyagram ile belirlenir. Çizelge 2.2’de çeşitli  $r_{sdP}$  ve  $K_\mu$  değerleri için  $H / B_c$ 'nin bir fonksiyonu olarak  $C_c$  denklemlerini vermektedir. Oturma oranı  $r_{sd}$  değerleri olarak Çizelge 2.3’teki değerler kullanılabilir (Moser ve Folkman, 2008).



Şekil 2.12. Pozitif projeksiyonlu borular için  $C_c$  yük katsayısı diyagramı (Moser ve Folkman, 2008)

Çizelge 2.2. Farklı oturma oranları için belirlenen  $C_c$  değerleri (Moser ve Folkman, 2008)

Tamamlanmamış Projeksiyon Durumu ( $K_{a\mu} = 0,19$ )		Tamamlanmamış Hendek Durumu ( $K_{a\mu} = 0,13$ )	
$r_{sd}P$	Eşitlik	$r_{sd}P$	Eşitlik
+0.1	$C_c = 1.23H/B_c - 0.02$	-0.1	$C_c = 0,82H/B_c + 0.05$
+0.3	$C_c = 1.39H/B_c - 0.05$	-0.3	$C_c = 0,69H/B_c + 0.11$
+0.5	$C_c = 1.50H/B_c - 0.07$	-0.5	$C_c = 0,61H/B_c + 0.20$
+0.7	$C_c = 1.59H/B_c - 0.09$	-0.7	$C_c = 0,55H/B_c + 0.25$
+1.0	$C_c = 1.69H/B_c - 0.12$	-1.0	$C_c = 0,47H/B_c + 0.40$
+2.0	$C_c = 1.93H/B_c - 0.17$		

Çizelge 2.3. Oturma oranı tasarım değerleri (Moser ve Folkman, 2008)

Yerleşim durumu	Oturma Oranı ( $r_{sd}$ )
Rijit borunun kaya veya göçmeyecek bir zemin üzerine yerleşimi	+1.0
Rijit borunun sıradan bir zemin üzerine yerleşimi	+0.5 ila +0.8
Rijit borunun doğal zemine oranla zayıf bir malzeme üzerine yerleşimi	0 ila +0.5
Esnek borunun yanlarında yer alan dolgunun yetersiz kompaksiyonu	-0.4 ila 0
Esnek borunun yanlarında yer alan dolgunun yeterli kompaksiyonu	-0.2 ila +0.8

### 2.4.3. Negatif Projeksiyon Durumu

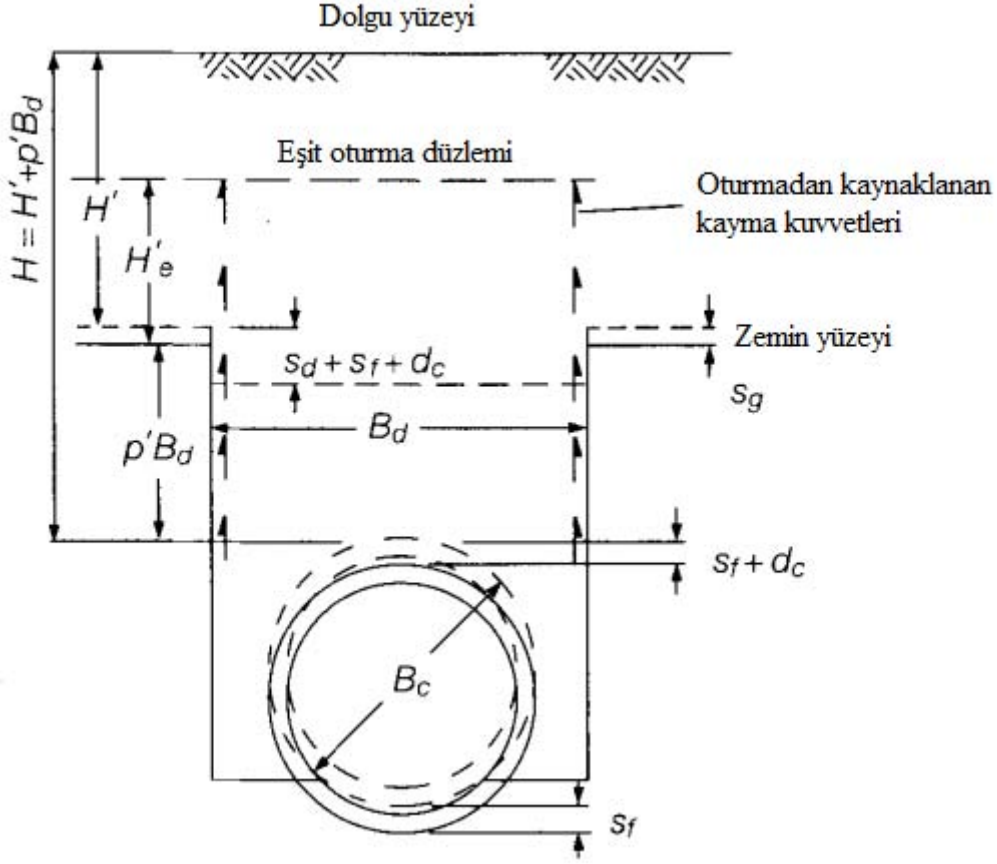
Şekil 2.12’de görüldüğü gibi negatif projeksiyonlu borular taç seviyesi doğal zemin yüzeyinin altında olacak şekilde sığ hendeklere yerleştirilen borulardır. Negatif projeksiyonlu boru üzerine etki eden yük boru üzerindeki zemin prizmasının ağırlığından ve bu zemin prizmasının kenarları boyunca oluşan yukarı yönlü oluşan kayma kuvvetlerinin etkisi ile oluşmaktadır (AWWA, 2008). Negatif projeksiyonlu bir boru için oturma oranı ( $r'_{sd}$ ) Eşitlik 2.11’de verilmiştir.

$$r'_{sd} = \frac{s_g - (s_f + d_c + s_d)}{s_d} \quad (2.11)$$

2.11 eşitliğinde verilen;

$s_d$  = Boru tacı üzerindeki  $p'B_d$  kalınlığındaki zeminin oturması

$p'$  = İkincil projeksiyon oranı



Şekil 2.13. Borunun negatif projeksiyonlu olarak gömülmesi durumunda meydana gelen oturmalar (AWWA, 2008)

Negatif projeksiyonlu boru üzerine etki eden yükü belirlemek için kullanılan formül Eşitlik 2.11 ile yük katsayılarını belirlemek için kullanılan formüller ise Eşitlik 2.13 ve Eşitlik 2.14 ile verilmiştir.

$$W_n = C_n \gamma B_d^2 \quad (2.12)$$

$$C_n = \frac{e^{-2K\mu(H/B_d)} - 1}{-2K\mu}, \quad H \leq H_e \quad (2.13)$$

$$C_n = \frac{e^{-2K\mu(H/B_d)} - 1}{-2K\mu} + [(H/B_d) - (H_e/B_d)]e^{-2K\mu(H_e/B_d)}, \quad H > H_e \quad (2.14)$$

2.12, 2.13 ve 2.14 eşitliklerinde verilen;

$C_n$  = Negatif projeksiyon yük katsayısı

Negatif projeksiyon durumu için eşit oturma düzleminin yüksekliğini belirlemek için kullanılan formül Eşitlik 2.10' da verilmiştir.

$$\frac{e^{-2K\mu(H'e/B_d)-1}}{-2K\mu} \left( \frac{H'}{B_d} - \frac{H'_e}{B_d} - \frac{1}{2K\mu} \right) - \frac{H'_e}{B_d} \left[ \left( \frac{H'}{B_d} - \frac{H'_e}{B_d} \right) + \frac{1}{2} \frac{H'_e}{B_d} - \frac{1}{2K\mu} \right] = \frac{2}{3} r_{sd} P' \left[ \frac{e^{-2K\mu(H'e/B_d)-1}}{-2K\mu} + \left( \frac{H'}{B_d} - \frac{H'_e}{B_d} \right) e^{-2K\mu(H'e/B_d)} \right] \quad (2.15)$$

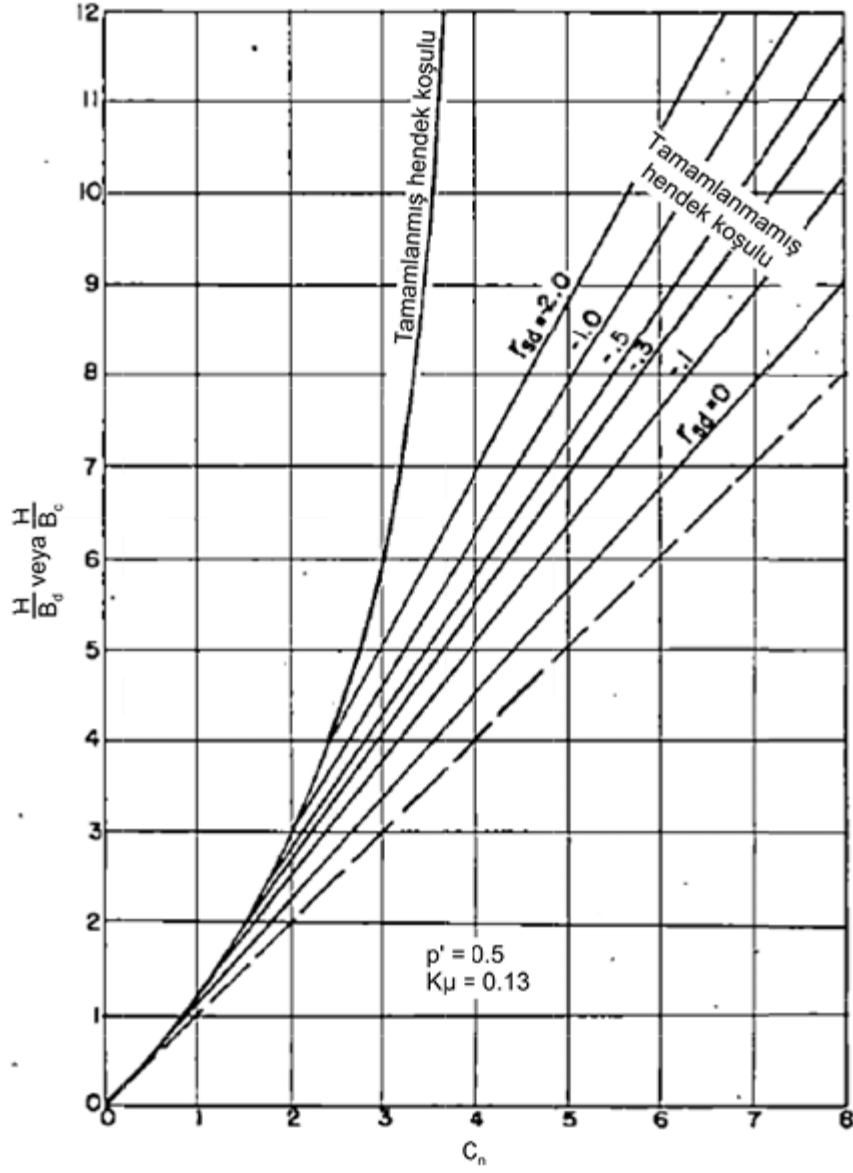
2.15 eşitliğinde verilen;

$H'$  = Doğal zemin yüzeyi ile dolgu yüzeyi arasındaki mesafe

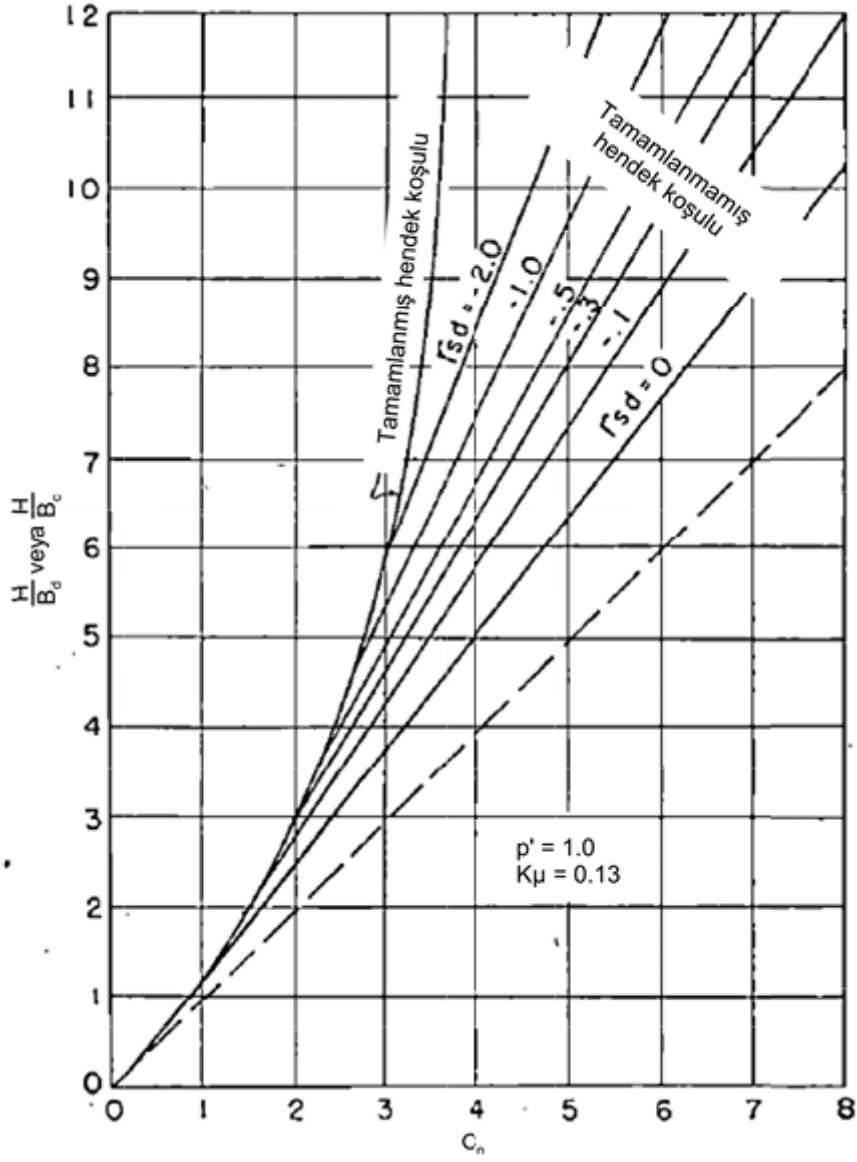
$H'_e$  = Doğal zemin yüzeyi ile eşit oturma düzlemi arasındaki mesafe

Negatif projeksiyonlu borularda  $C_n$  yük katsayısını belirlemek için kullanılan diyagramlar Şekil 2.14 – Şekil 2.17 arasında verilmiştir.

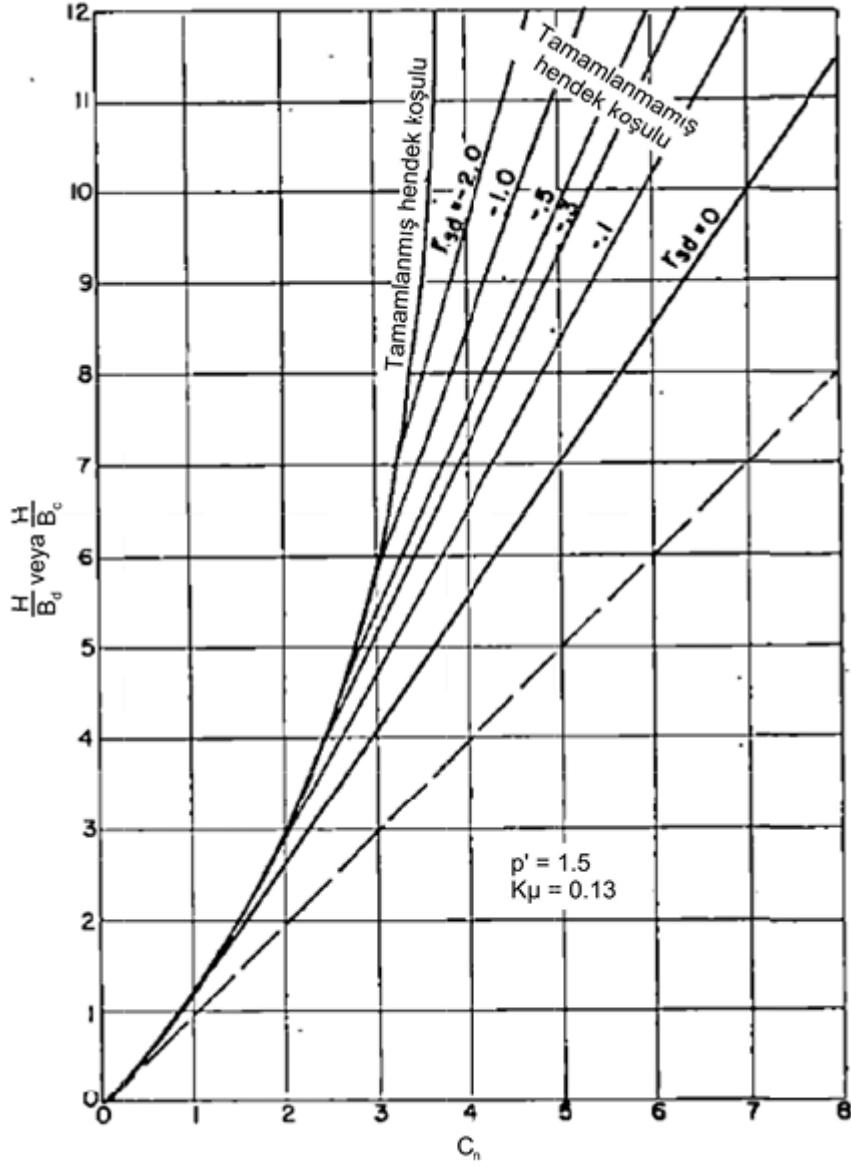
Yapay hendek boruları üzerine etki eden yükü belirlemek için negatif projeksiyonlu borular için kullanılan formüller ve diyagramlar kullanılır. Yapay hendek borularında farklı olarak hendek genişliği yerine boru çapı kullanılır.



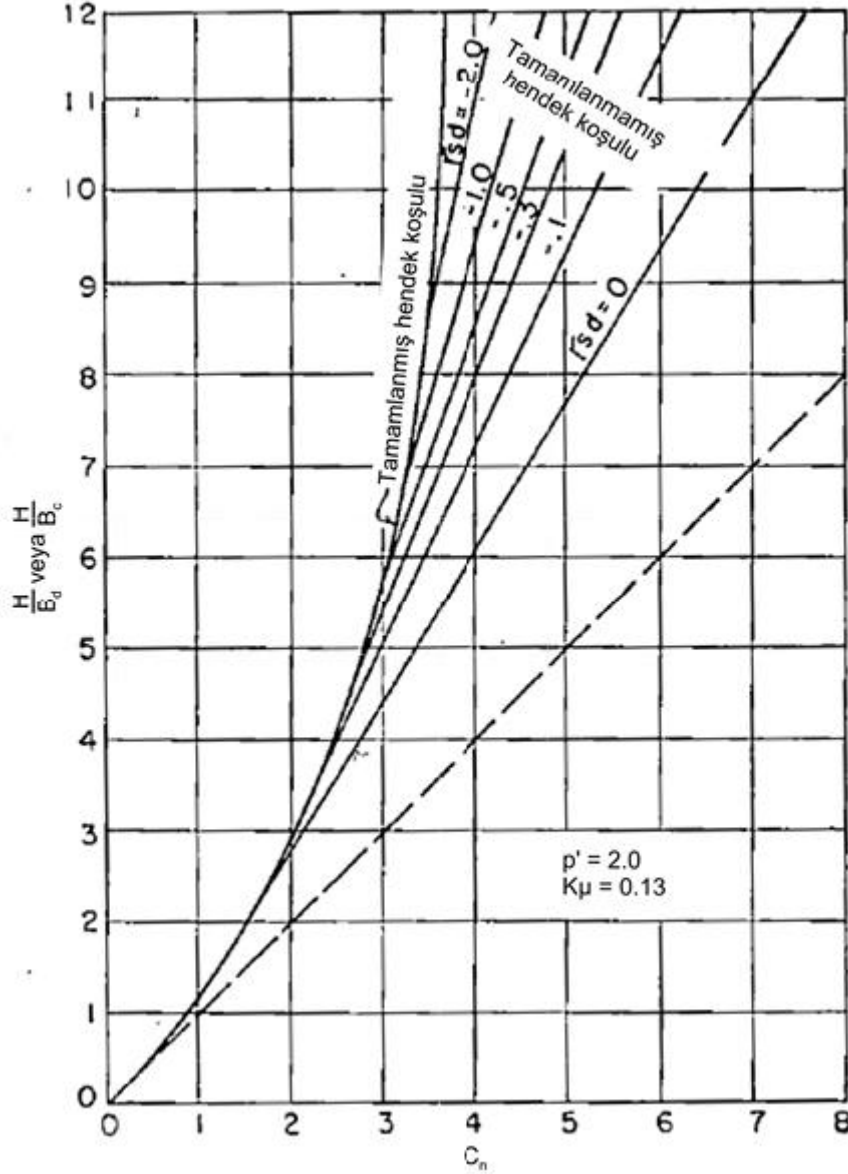
Şekil 2.14. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için  $C_n$  yük katsayısı diyagramı ( $p'=0.5$ ) (AWWA, 2008)



Şekil 2.15. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için  $C_n$  yük katsayısı diyagramı ( $p'=1.0$ ) (AWWA, 2008)



Şekil 2.16. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için  $C_n$  yük katsayısı diyagramı ( $p'=1.5$ ) (AWWA, 2008)



Şekil 2.17. Negatif projeksiyonlu ve yapay hendek boruları için  $C_n$  yük katsayısı diyagramı ( $p'=2.0$ ) (AWWA, 2008)

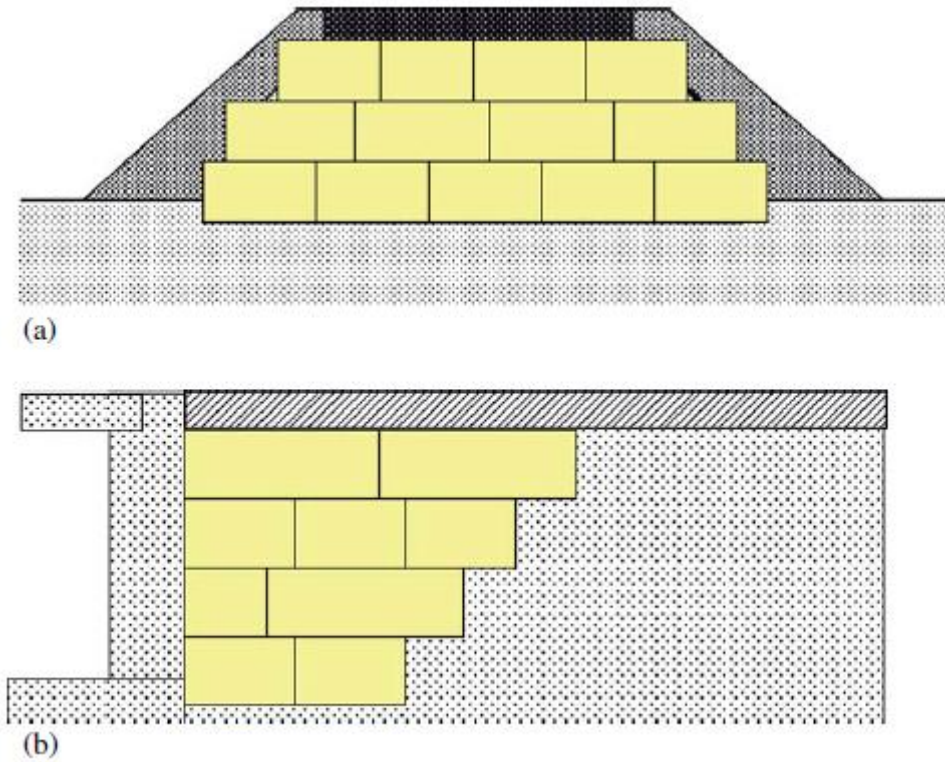
## 2.5. Genleştirilmiş Polistiren (EPS) Gefoam

Genleştirilmiş polistiren (EPS) gefoam geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan gözenekli bir yapıya sahip bir tür geosentetiktir. EPS gefoamın kullanımı Norveç Karayolları Araştırma Laboratuvarı'nın yumuşak zeminler üzerinde yol dolgusu inşa etmek için EPS'nin hafif dolgu işlevinin incelendiği 1960'lardaki çalışmalarına dayanmaktadır (Trandafir vd., 2010).



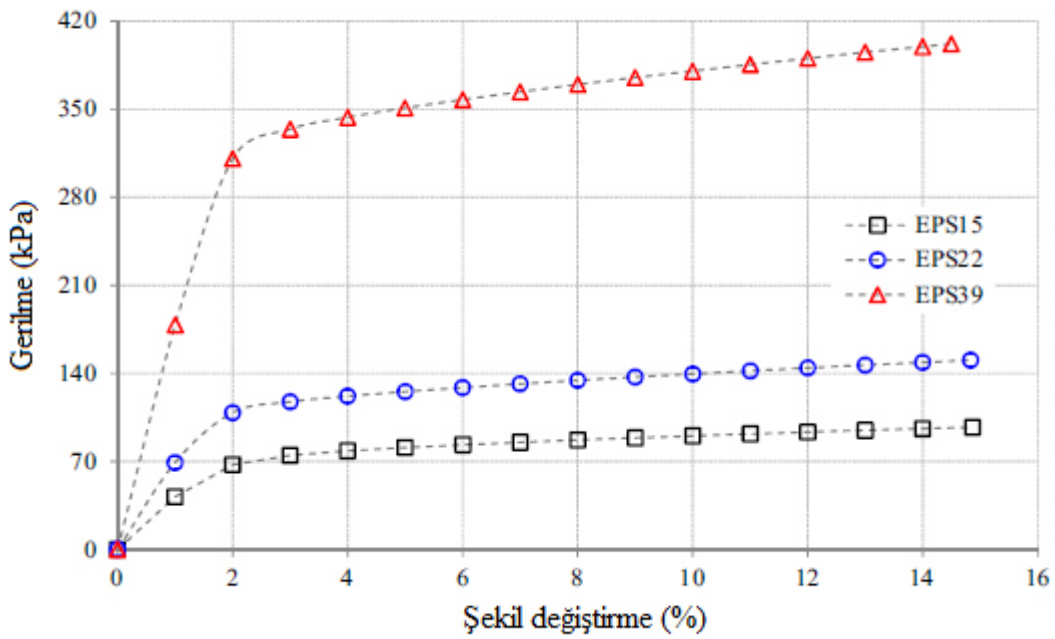
EPS'nin ana bileşeni petrol veya doğal gazdan elde edilen ve etilen ile benzen arasındaki reaksiyonla oluşan stirendir. Stirenin polimerizasyon işlemi ile polistiren tanecikleri elde edilir. Polistiren tanecikler üzerinde yapılan işlemlerle elde edilen genişletilmiş polistiren (EPS) kalıplama işlemi sonucu blok şeklini alır (Awol, 2012). Horvath (1994) EPS bloklarının  $10 \text{ kg/m}^3$  ile  $40 \text{ kg/m}^3$  yoğunluk aralığında üretildiğini belirtmiştir.

Geoteknik projelerde yaygın olarak kullanılan EPS blokları hafif olması sebebi ile oturmaları en aza indirmek ve stabilite problemlerinden kaçınmak için yumuşak zeminlerde dolgu olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte istinat duvarlarına ve köprü ayaklarına gelen yanal yüklerin azaltılmasında EPS blokları kullanılır. Ayrıca EPS şev stabilitesi ve gömülü boru uygulamalarında da kullanılır (Horvath, 1994; Horvath, 1997; Ossa ve Romo, 2011; Elragi vd., 2001). EPS geofomun dolgu içinde kullanılması örneği Şekil 2.18a'da, köprü ayağı arkasında kullanılması örneği ise Şekil 2.18b'de gösterilmiştir (Wong ve Leo, 2006).



Şekil 2.18. EPS geofom uygulama örnekleri a) hafif dolgu b) köprü ayağı arkasında (Wong ve Leo, 2006)

Hazarika (2006), Ertuğrul vd. (2011), Akınay (2017) ve Meguid ve Hussein (2017) EPS geofoam malzemenin davranışını belirlemek için EPS üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Akınay (2017) 10 kg/m<sup>3</sup> ve 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarındaki, Meguid ve Hussein (2017) 15 kg/m<sup>3</sup>, 22 kg/m<sup>3</sup> ve 39 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarındaki EPS numuneleri üzerinde serbest basınç deneyleri uygulamıştır. Bu deneylerde farklı EPS yoğunlukları kullanılmasına rağmen tüm yoğunluk tipleri için gerilme – şekil değiştirme davranışları birbirlerine benzemektedir. Meguid ve Hussein (2017) farklı EPS yoğunlukları ile yaptığı deneyler sonucunda elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 2.19’da verilmiştir.



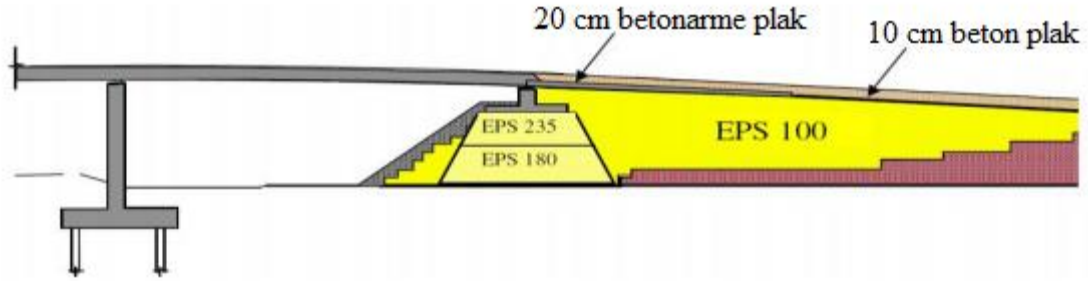
Şekil 2.19. Üç farklı yoğunluktaki EPS numuneleri ile yapılmış deney sonuçları (Meguid ve Hussein, 2017)

Şekil 2.19’da ki grafiğe göre Meguid ve Hussein (2017) EPS geofoamın genellikle doğrusal olmayan elasto-plastik pekleşme davranışı gösteren bir malzeme olduğunu ifade etmişlerdir.

EPS geofoam malzeme inşaat mühendisliği uygulamalarında birçok ülkede farklı amaçlar için genel bir uygulama olarak benimsenmiştir. Avrupa ülkeleri başta olmak üzere birçok ülkede EPS geofoam malzemenin kullanıldığı projeler tamamlanmıştır (Aabøe vd., 2019). Hjelmungen Köprüsü de EPS’nin kullanıldığı ilk projelerden birisidir. Köprü 1992 yılında inşa edilmiş ve kısmen hafif lekabloklar ( $\gamma = 8 \text{ kg/m}^3$ ) ve yaygın olarak kullanılan dolgu

malzemesi ( $\gamma = 20 \text{ kg/m}^3$ ) ile oluşturulmuş 5 m yüksekliğindeki yaklaşım dolgusu ile birlikte beton kazıklar üzerine kurulmuştur. Temel zemini esas olarak 11-14 m arasında değişen kalınlığı ile son derece zayıf bir kilden oluşmaktadır. Köprü inşaatı tamamlandıktan yaklaşık 2 yıl sonra, köprü kenar ayaklarının altındaki zeminin taşıma kapasitesinin aşılması sonucu yüksek oturmalar meydana geldiği belirlenmiştir. Oturma miktarı yaklaşık 600 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumun köprü tabliyesine zarar verdiği görülmüş ve acil bir şekilde köprü'nün tadilatının yapılmasına karar verilmiştir.

Üç açıklıklı ve 54 m uzunluğunki köprü'nün tamirâtı 1995 yılında başlayıp 1996 yılında tamamlanmıştır. Dolgu kazılarak yerine EPS geofom blokları yerleştirilmiştir. İnşaatta üç farklı EPS malzeme kullanılmıştır. Köprü kenar ayağı altındaki dolgunun üsteki 3 sırasında EPS235 ( $40 \text{ kg/m}^3$ ) malzeme, bunun altında ise EPS180 ( $30 \text{ kg/m}^3$ ) malzeme kullanılmıştır. Geriye kalan yerlerde de dolgu malzemesi olarak EPS100 ( $20 \text{ kg/m}^3$ ) malzeme kullanılmıştır. Köprü kenar ayağı üzerindeki yatay kuvvetlere karşı EPS dolgunun üzerine sürtünme levhası olarak dökülmek üzere 10 m uzunluğunda ve 20 cm kalınlığında bir betonarme geçiş levhası inşa edilmiştir. EPS dolgunun geri kalanında 10 cm kalınlığında bir beton levha inşa edilmiştir. Hjelmungen Köprü'sü'nün tekrar inşası sırasında kullanılan ana taslak Şekil 2.20'de verilmiştir.



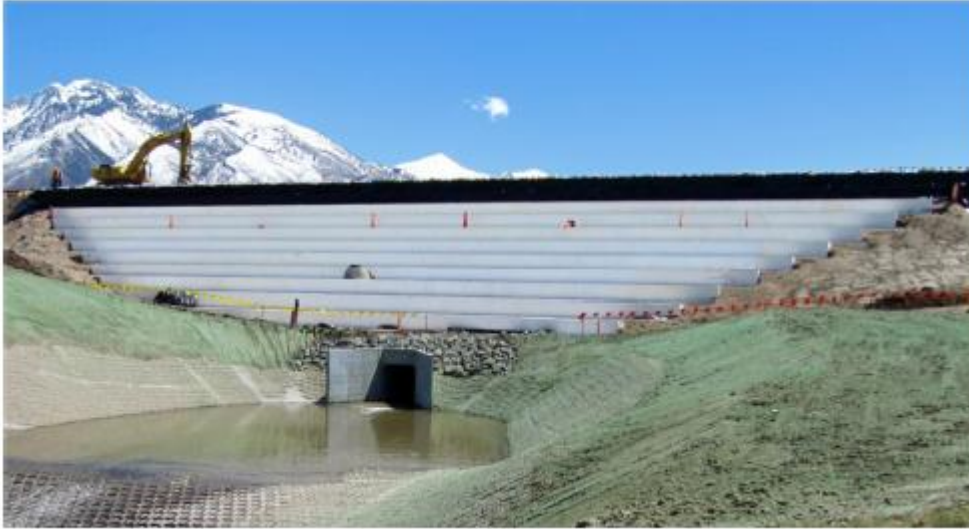
Şekil 2.20. Ana tasarım planı (Bartlett vd., 2014)

Köprü tabliyesinin destekler üzerine alınıp köprü ayağı altında kalacak olan EPS geofom dolgunun inşası Şekil 2.21'deki görsel ile verilmiştir. Köprü kenar ayakları altındaki dolguda 10 yıllık süreç sonunda 3,5 cm oturma ölçülmüştür. Bu oturma miktarı dolgu yüksekliğinin %0,7'sini oluşturmaktadır. Bu sonuçla EPS geofom dolgu tatmin edici performans göstermiştir (Aabøe ve Frydenlund, 2011; Bartlett vd., 2014; Vaslestad vd., 2019).



Şekil 2.21. Hjelmungen Köprüsü EPS geofom dolgu inşaatı (Aabø ve Frydenlund, 2011)

Bir diğerk çalışma Utah'da, demiryolu hattının geçeceği güzergahta yer alan beton menfez üzerine inşa edilecek olan dolguda hafif dolgu malzemesi olarak EPS geofom malzeme kullanılmıştır. Bu şekilde menfez altındaki temel zemininde meydana gelecek oturmalarından kaynaklanan menfeze ve dolguya gelecek zararlar engellenirken aynı zamanda dolgunun hafif olmasıyla menfeze ve zemine aktarılan gerilmeler azaltılmış olacaktır. Menfez üzerine inşa edilmiş olan hafif EPS dolgu Şekil 2.22'de verilmiştir (Bartlett vd., 2015).

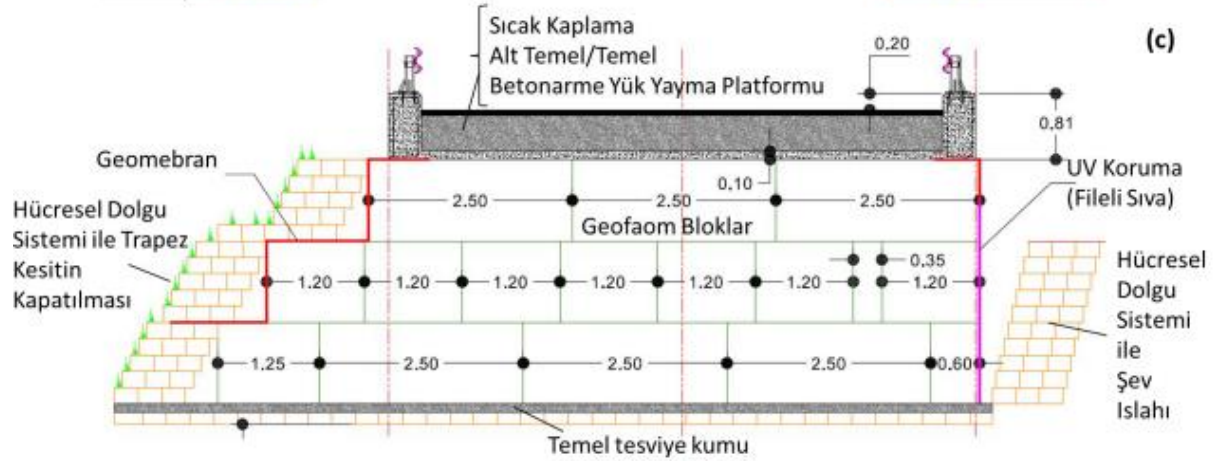
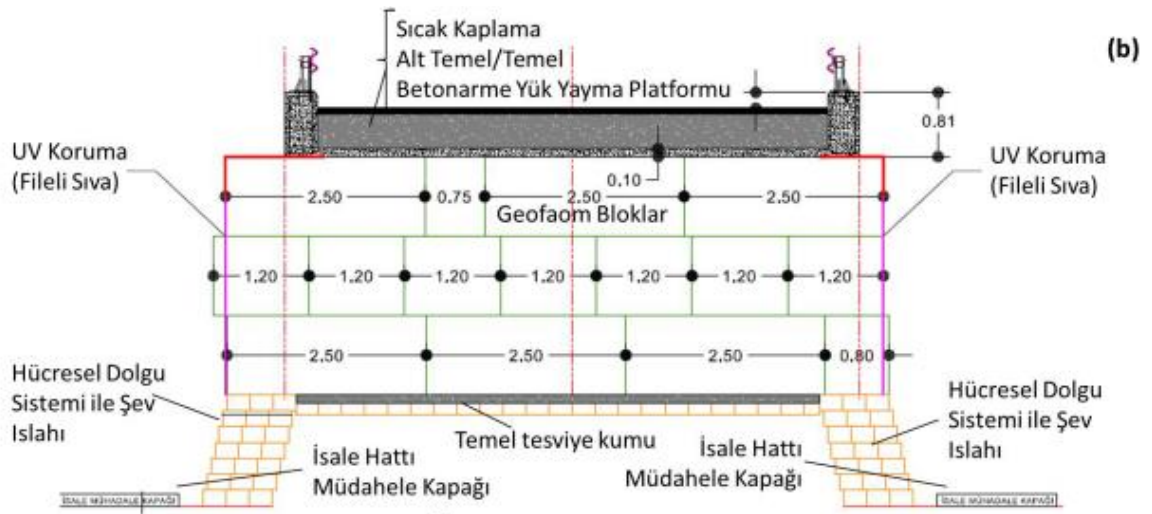
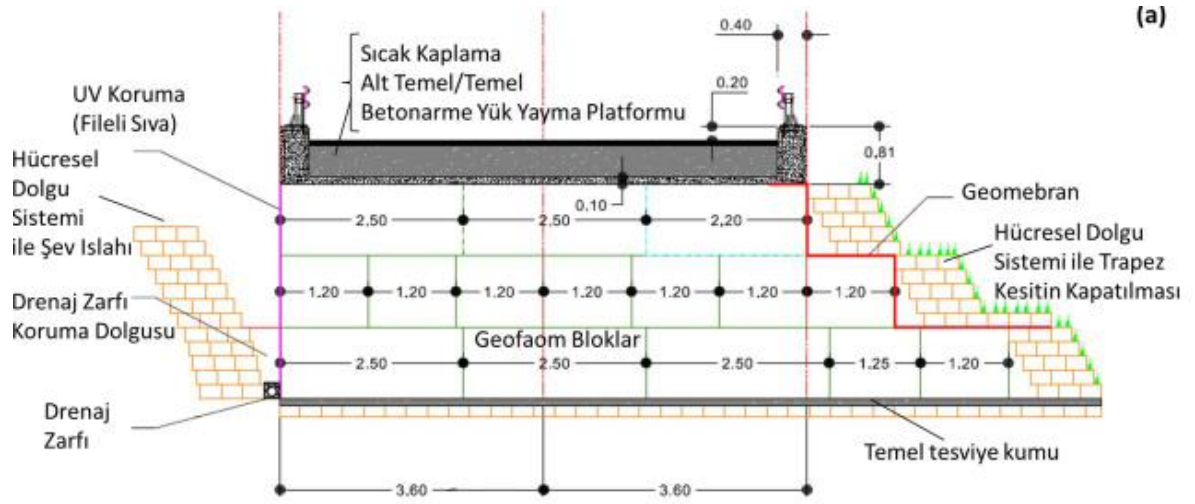


Şekil 2.22. Utah'da menfez üzerine inşa edilmiş olan hafif EPS dolgu (Bartlett vd., 2015)

EPS geofom blokların kullanıldığı bir proje de ülkemizde gerçekleştirilmiştir. Bu proje Türkiye’de EPS geofom blokların yol dolgusu olarak kullanıldığı ilk proje olarak literatürde yer almaktadır. Proje 2017 yılında İstanbul’da tamamlanmıştır. Planlanan yol dolgusu temel seviyesinin yaklaşık 3,8 m ve 5,6 m altından 2 adet su hattı geçmektedir. Su hatlarında meydana gelebilecek yapısal hasarlar önemli hizmet kesintilerine yol açacaktır. Bununla birlikte su hatlarının taşınması ise oldukça zor olacaktır. Bu nedenlerin bir araya gelmesi ile dolgu inşaatında EPS geofom blokların kullanılmasına karar verilmiştir. Projede yoğunluğu 22 kg/m<sup>3</sup> olan yaklaşık 720 m<sup>3</sup> EPS geofom blok kullanılmıştır. Yol dolgusunun en kesit görünümleri şekil 2.23’de verilmiştir (zer vd., 2017).







Şekil 2.23. EPS geofaom yol dolgusu en kesitleri a) başlangıç en kesiti b) isale hattı müdahale kapakları bölgesi en kesiti c) yol sonu en kesiti (Özer vd., 2017)

EPS geofom dolgu inŖaatı tamamlandıktan sonra EPS blokların petrol ve türevlerinden korumak için mevcut yol ile EPS geofom blok arayüzünde geomembran uygulaması yapılmıŖtır (Ŗekil 2.24). EPS geofom dolgunun performansını izlemek amacıyla mıknatıslı oturma plakaları kullanılmıŖtır. EPS dolgu altına yerleŖtirilen taban plakası Ŗekil 2.25'te ve EPS dolgu üstüne yerleŖtirilen oturma plakası Ŗekil 2.26'da verilmiŖtir.



Ŗekil 2.24. EPS bloklar ile mevcut yol arayüzünde yapılan EPS uygulaması (zer vd., 2017)



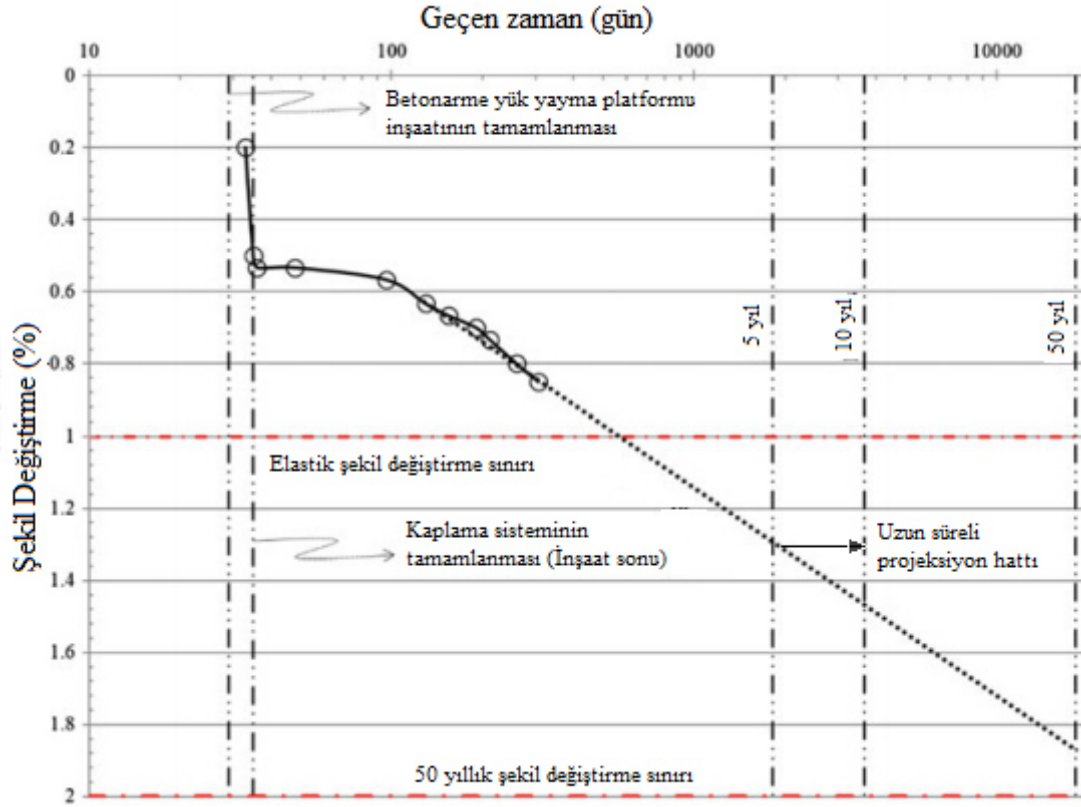
Ŗekil 2.25. Taban plakasının EPS dolgu altına yerleŖtirilmesi (zer vd., 2017)



Şekil 2.26. EPS geof foam dolgu üzerine oturma plakasının yerleştirilmesi (Özer vd., 2017)

Yol inşaatının tamamlanmasının ardından dolguda 16 mm oturma meydana gelmiştir, bu oturma miktarı dolgu yüksekliğinin %0,55'ini oluşturmaktadır. Yolun trafiğe açılmasının ardından 270 günlük bir süreç sonunda şekil değiştirme oranı %0,85 olmuştur. Elde edilen bu kısa süreli veriler kullanılarak uzun süreli performans değerlendirilmiştir. Buna göre uzun süreli şekil değiştirme oranı %2 limitinin altında kalacağı belirtilmiştir. Şekil 2.27'de verilen grafikte EPS geof foam dolguda meydana gelen kısa süreli şekil değiştirme oranları ve beklenen uzun süreli şekil değiştirme oranları görülmektedir (Özer ve Akınay, 2019).



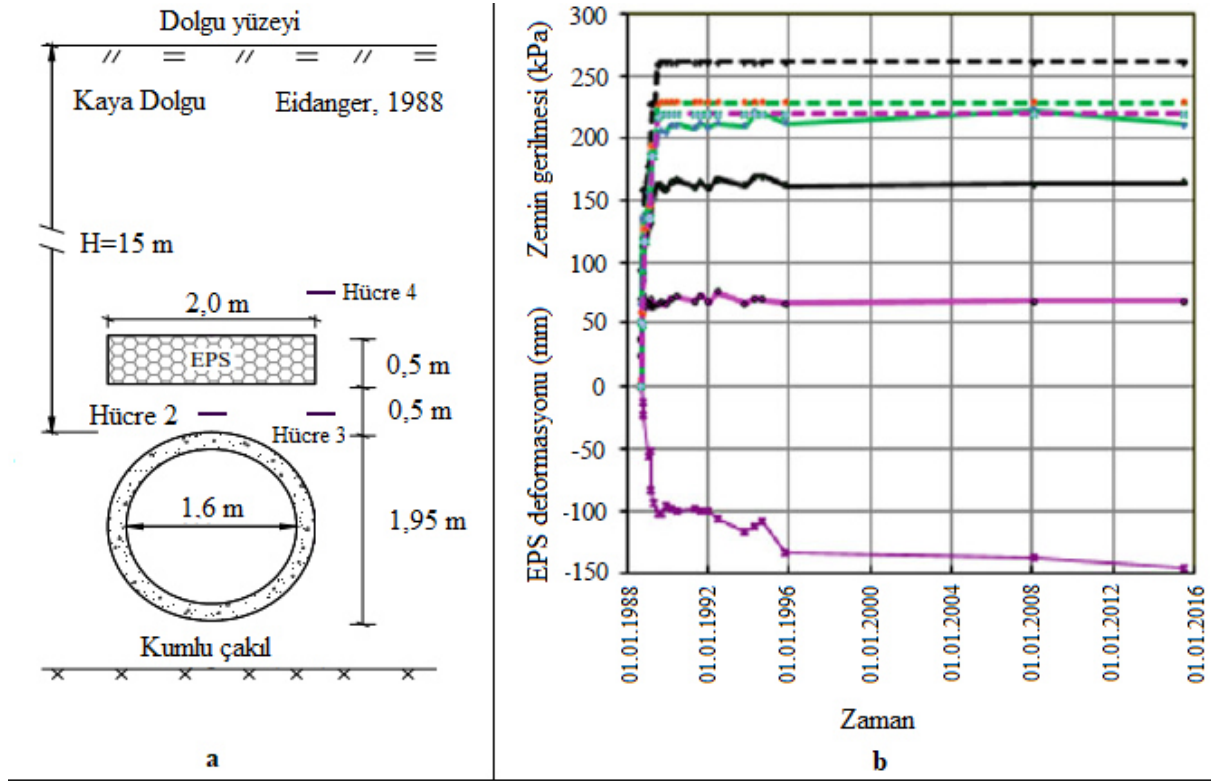


Şekil 2.27. EPS geofoam dolgunun zaman bağılı şekil değiştirme oranları (Özer ve Akınay, 2019)

## 2.6. EPS Geofoam Malzemenin Gömülü Yapılarla Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar ve Sayısal Analiz Uygulamaları

EPS geofoam bloklar Norveç'te 1988 yılından beri kalın dolgu tabakaları altında gömülü rijit borular üzerine etkiyen yükleri azaltmak için kullanılmaktadır. Vaslestad vd. (2011) çalışmalarında 1988-1992 yılları arasında Norveç'te inşa edilen beton menfezler üzerinde EPS geofoam blok kullanımının boru üzerinde oluşan gerilmelere etkisini incelemiştir. Arazi çalışmalarında kullanılan menfezlerden üç tanesi beton boru bir tanesi ise yerinde dökme kutu menfezdür. Sıkışabilir malzeme olarak kullanılan EPS'nin yoğunluğu  $20 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Menfezler üzerine etki eden yatay ve düşey gerilmeleri ölçmek için hidrolik toprak basıncı hücreleri, EPS geofoam bloklarda meydana gelen deformasyonu ölçmek için ise oturma plakaları kullanılmıştır. Arazi çalışmalarından uzun yıllar boyunca veri toplanmaya devam edilmiştir. Sunulan grafiklerde zemin gerilmelerinin ve EPS deformasyonunun yıllar boyunca yapılan ölçümlere göre değişimleri verilmiştir.

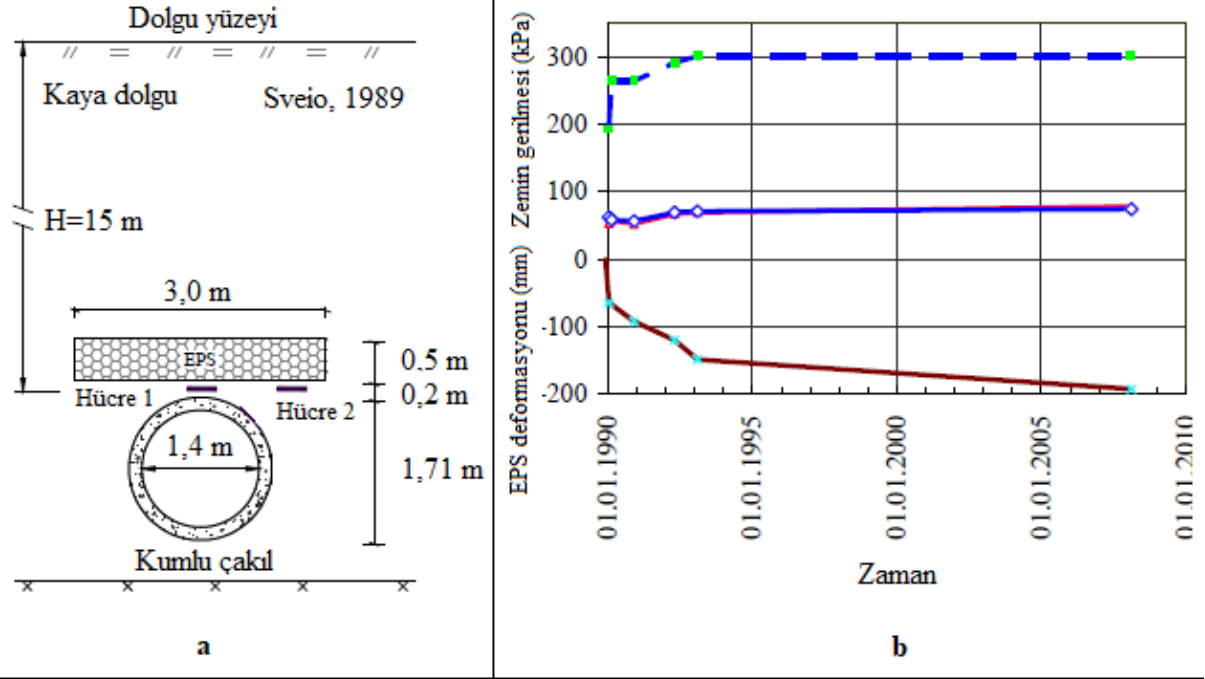
İlk çalışmada kullanılan 1,6 m iç çaplı beton boru kumlu çakıl yatak üzerine yerleştirilmiştir. Yatak olarak kullanılan kumlu çakıl zemin geri dolgu malzemesi olarak da kullanılmıştır. Geri dolgu yatay simetri çizgisinden 1 m dışarıya, boru tacından ise 0,5 m yukarıya kadar devam etmiştir. Geri dolgunun ardından da 14 m yüksekliğinde kaya dolgu inşaatı tamamlanmıştır. Birinci çalışmaya ait tasarım detayları Şekil 2.28a'da, boru üzerine etkileyen gerilme değişimleri ile EPS'de meydana gelen deformasyon Şekil 2.28b'de verilmiştir.



- \*— Hücre 2 - Ölçülen zemin gerilmesi
- \*— Hücre 2 - Hesaplanan zemin gerilmesi
- \*— Hücre 3 - Ölçülen zemin gerilmesi
- \*— Hücre 3 - Hesaplanan zemin gerilmesi
- \*— Hücre 4 - Ölçülen zemin gerilmesi
- \*— Hücre 4 - Hesaplanan zemin gerilmesi
- \*— Ölçülen EPS deformasyonu

Şekil 2.28. Birinci uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS'de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad ve Sayd, 2019)

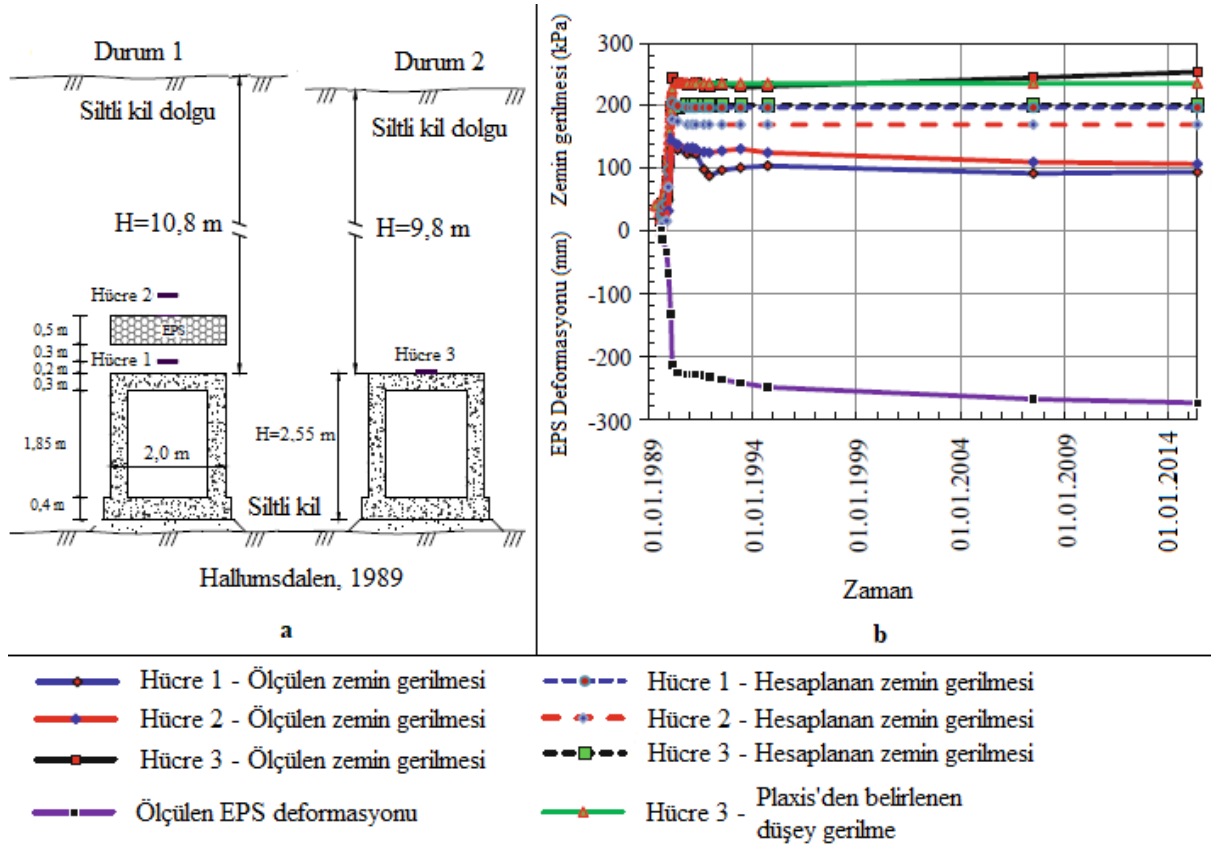
İkinci uygulamada 1,4 m iç çaplı beton boru kumlu çakıl yatak üzerine yerleştirilip ilk uygulamadaki belirtilen sınırlarda geri dolgu uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bunların ardından boru üzerine 15 m yüksekliğinde kaya dolgu inşaatı tamamlanmıştır. İkinci uygulamaya ait tasarım detayları Şekil 2.29a'da, boru üzerine etkileyen gerilme değişimleri ile EPS'de meydana gelen deformasyon Şekil 2.29b'de verilmiştir.



- Hücre 1 - Ölçülen zemin gerilmesi      —◇— Hücre 2 - Ölçülen zemin gerilmesi  
—■— Hücre 1,2 - Hesaplanan zemin gerilmesi      —■— Ölçülen EPS deformasyonu

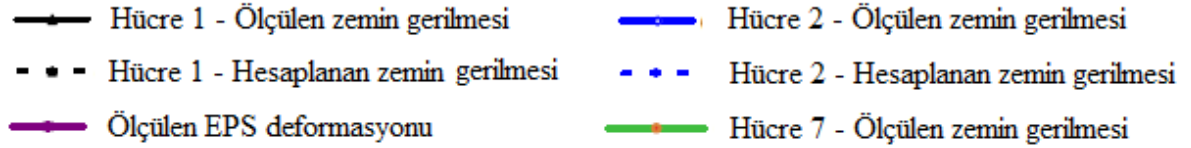
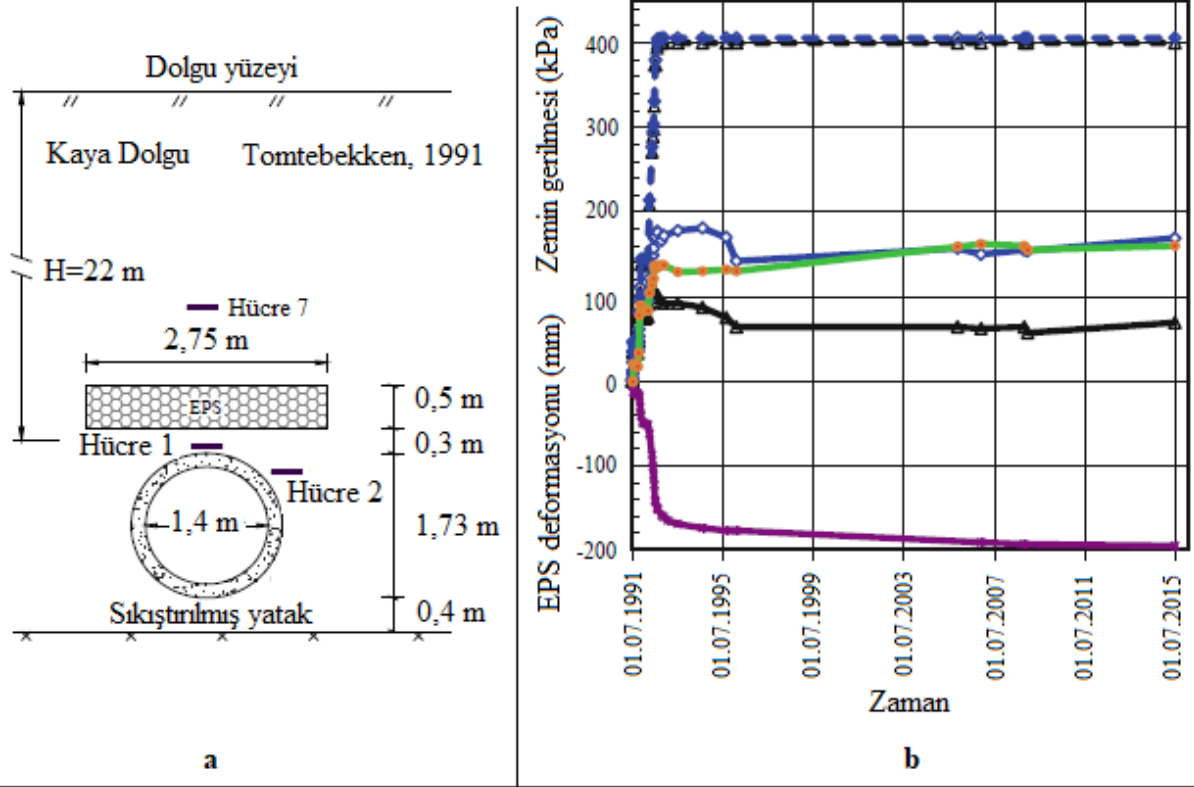
Şekil 2.29. İkinci uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS’de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad vd., 2011)

Üçüncü uygulamada kullanılan kutu menfez siltli kil zemine yerleştirildikten sonra siltli kil malzeme ile dolgu inşası tamamlanmıştır. Menfez üzerine etki eden gerilmelerin karşılaştırılabilmesi için çalışmada menfez üzerine EPS’nin yerleştirildiği ve yerleştirilmediği durumlar oluşturulmuştur. Üçüncü uygulamanın tasarım detayları Şekil 2.30a’da, boru üzerine etkileyen gerilme değişimleri ile EPS geofoamda meydana gelen deformasyonlar Şekil 2.30b’de verilmiştir.



Şekil 2.30. Üçüncü uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkiyen gerilmedeki ve EPS’de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad ve Sayd, 2019)

Son uygulamada ise 1,4 m iç çaplı boru sıkıştırılmış yatak üzerine yerleştirilmiştir. Boru üzerine 22 m yüksekliğinde dolgu inşası yapılmıştır. Bu uygulamaya ait tasarım detayları Şekil 2.31a’da, boru üzerine etkiyen gerilme değişimleri ile EPS’de meydana gelen deformasyon Şekil 2.31b’de verilmiştir.

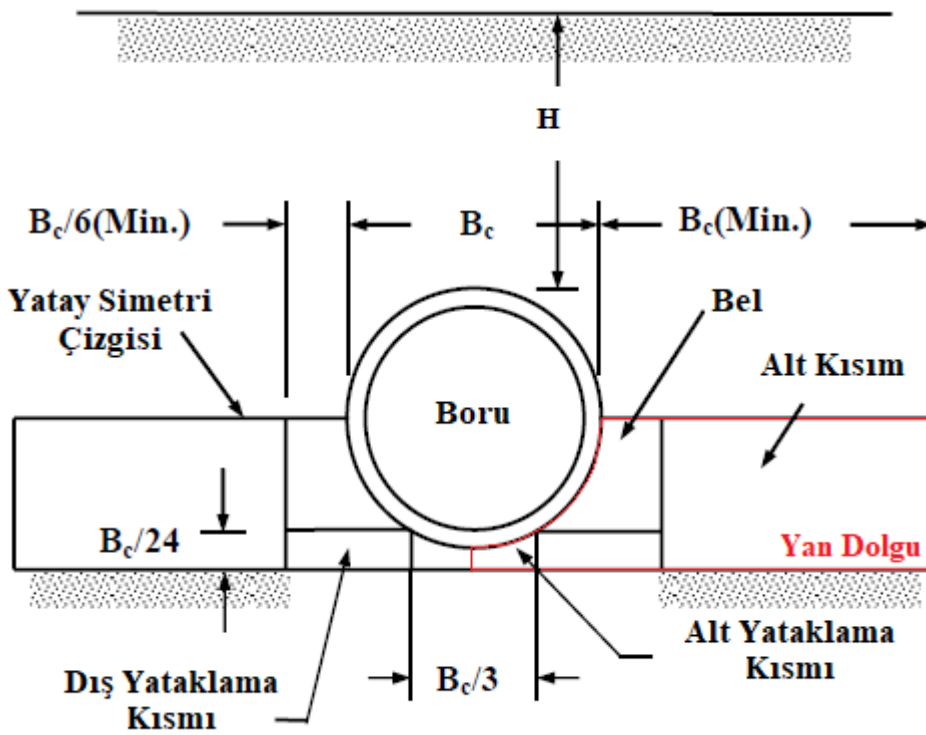


Şekil 2.31. Dördüncü uygulamaya ait a) tasarım detayları b) boruya etkileyen gerilmedeki ve EPS’de meydana gelen deformasyondaki değişim (Vaslestad ve Sayd, 2019)

Uzun süreli gözlem sonunda boru tacına etki eden düşey gerilme granüler malzemenin geri dolgu malzemesi olarak kullanıldığı durumda örtü yükünün %23-25’i, kohezyonlu malzemenin geri dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda ise %45’i olarak belirlenmiştir. EPS geofoam malzemedeki meydana gelen deformasyon granüler malzemenin kullanıldığı rijit borularda %28-38, kohezyonlu malzemenin kullanıldığı kutu menfezlerde ise %54 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar yapay hendek yönteminde yüksek kaliteli, iyi sıkıştırılmış granüler malzemenin geri dolgu inşasında kullanımının önemini göstermektedir. Arazi çalışmalarının uzun süreli gözlemleri gömülü menfezlerde dolgu inşaatı sonrasında zemin gerilmesinde artış olmadığını göstermiştir. Ayrıca EPS geofoam malzemedeki meydana gelen deformasyonların çoğunun inşaat aşamasında meydana geldiği belirtilmiştir (Vaslestad vd., 2011).

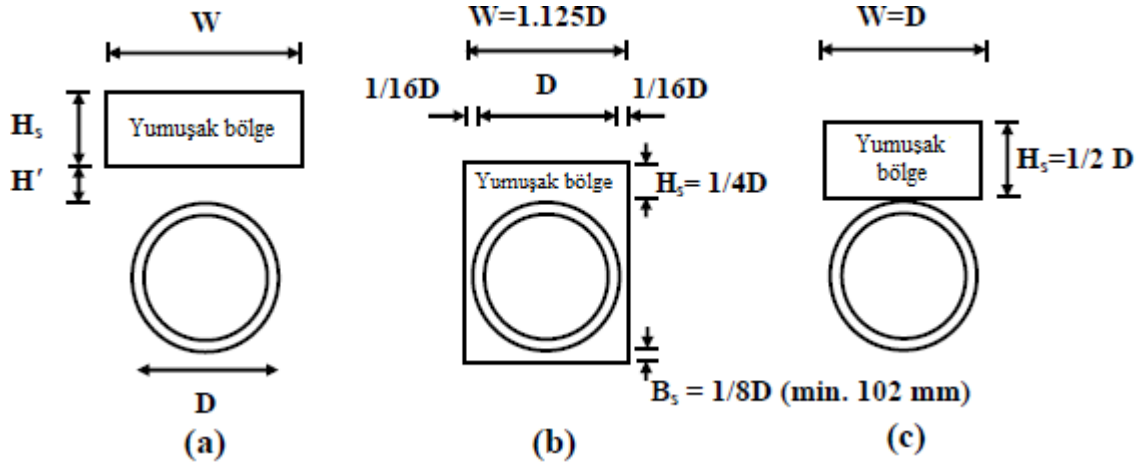
Kang (2007) yapay hendek yönteminin kullanıldığı rijit boru, esnek (PVC) boru, çelik boru ve kutu menfez uygulamalarında oluşturulan yumuşak bölgenin optimum geometrisini belirlemek için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmada genel amaçlı sonlu elemanlar programı olan ABAQUS ve MSC/NASTRAN programları ile zemin yapı etkileşimi için yaygın olarak kullanılan SPIDA ve CANDE-89 programları kullanılmıştır.

Kang (2007) yumuşak bölgenin olmadığı modellerde Şekil 2.32’de verilen AASHTO’nun (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği) yayınladığı gömülü borular için standart yataklama geometrilerini kullanmıştır.



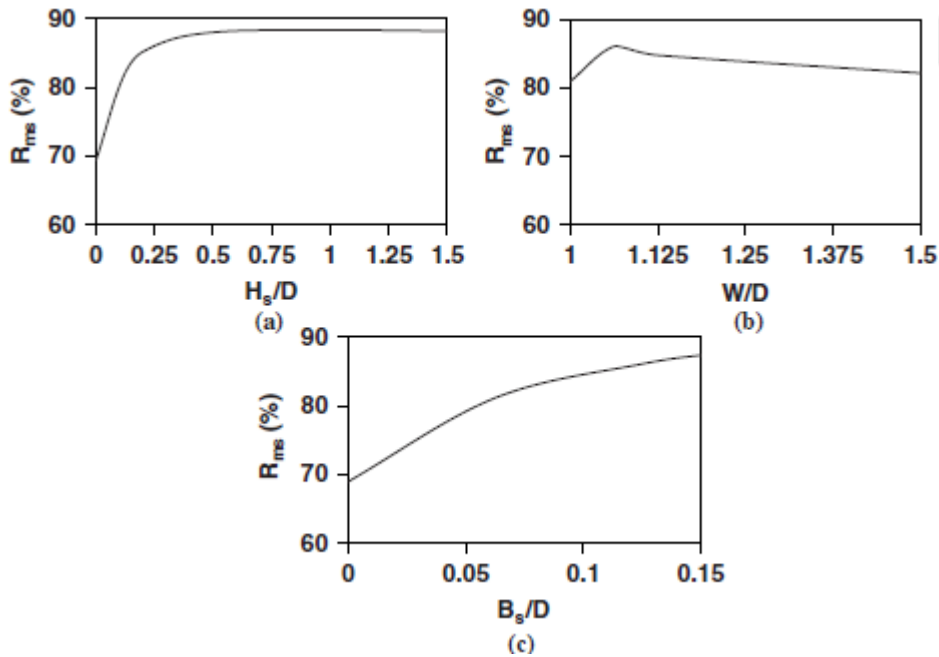
Şekil 2.32. AASHTO standart yataklama geometrileri

Yumuşak bölgenin kullanıldığı esnek boru modellerinde ise Şekil 2.33’de verilen üç ayrı geometri kullanılmıştır. Şekil 2.33’de görülen yumuşak bölge geometrisini tanımlayan parametrelerden  $W$  yumuşak bölgenin genişliğini,  $H_s$  boru üstünde yumuşak bölgenin yüksekliğini,  $B_s$  boru altında yumuşak bölgenin kalınlığını,  $H'$  ise boru tacı ile yumuşak bölge arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.



Şekil 2.33. Yapay hendek yönteminde kullanılan yumuşak bölge geometrileri a) genel gösterim b) yumuşak bölge geometrisi I (önerilen geometri) c) yumuşak bölge geometrisi II (Spangler (1950) ve Vaslestad vd. (1993) tarafından denenilen geometri) (Kang, 2007)

Şekil 2.33b'de verilen yumuşak bölge geometrisi I'in oluşturulması Şekil 2.34'de verilen grafiklerle açıklanabilir. Bu grafiklerde gerilme azaltma oranı  $R_{rms}$ 'nin yumuşak bölge geometrisini belirleyen parametrelere göre oranı verilmiştir.



Şekil 2.34. Yumuşak bölge I geometrisinin belirlenmesi a)  $H_s/D$  oranının belirlenmesi ( $W/D=1,25 - B_s/D=0,125$ ) b)  $W/D$  oranını belirlenmesi ( $H_s/D=0,25 - B_s/D=0,125$ ) c)  $B_s/D$  oranının belirlenmesi ( $H_s/D=0,25 - W/D=1,25$ ) (Kang, 2007)

Şekil 2.34a'da görüldüğü gibi  $H_s/D$  oranı 0,125 değerine ulaştıktan sonra hemen hemen değişmeden kalır. Şekil 2.34b'de yumuşak bölge genişliği boru çapından biraz daha geniş

olduğunda maksimum azalma meydana gelir. Şekil 2.34c’de ise  $B_s/D$  oranının  $1/8$  değerinden büyük olduğu durumda gerilmede meydana gelen azalmada çok az artış görülmektedir. Bundan dolayı  $B_s/D$  oranının  $1/8$  değerine eşit alınması önerilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) değerleri de belirlenmiştir. Düşey kemerlenme faktörü ve yatay kemerlenme faktörü sırasıyla boru üzerindeki toplam düşey ve yatay yükleri temsil eden boyutsuz katsayılardır. Bu katsayıları hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılabilir (Amerikan Beton Boru Birliği (ACPA), 2011).

$$VAF = \frac{W_e}{PL} = \frac{2N_{sp}}{PL} \quad (2.16)$$

$$HAF = \frac{W_h}{PL} = \frac{N_c + N_i}{PL} \quad (2.17)$$

2.16 ve 2.17 eşitliklerinde verilen;

$W_e$  = düşeydeki toplam zemin yükü

$W_h$  = yataydaki toplam zemin yükü

$PL$  = Prizma yükü

$N_{sp}$  = boru yatay eksenine gelen zemin gerilmesi

$N_c$  = boru tacındaki toplam zemin gerilmesi

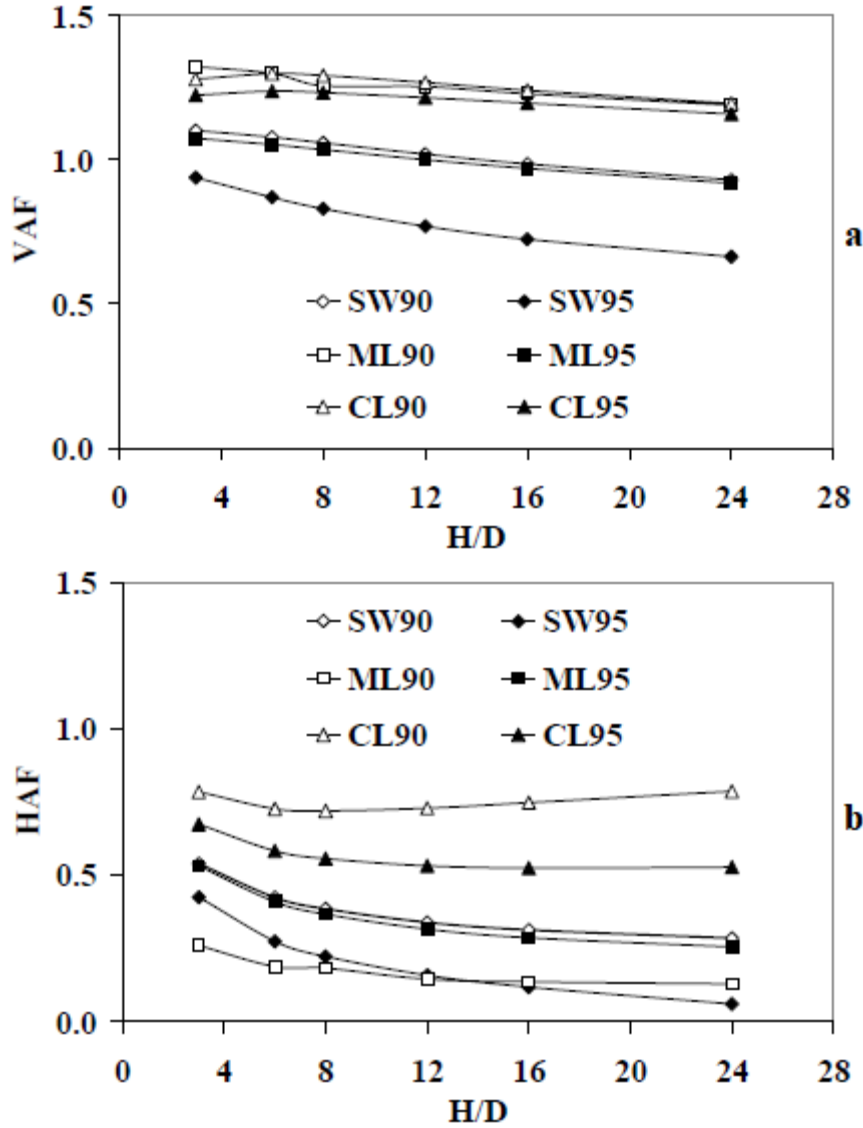
$N_i$  = boru tabanındaki toplam zemin gerilmesini ifade etmektedir.

Düşey kemerlenme faktörü düşeyde meydana gelen gerilmelerin zemine aktarılma oranını ve yatay zemin gerilmelerine dönüştüğünü ifade eder. Yatay kemerlenme faktörü ise düşey kemerlenme faktörüne zıt olarak boru tacında ve tabanında oluşan gerilmelerdeki değişimin prizma yüküne oranı olarak ifade edilir. Kemerlenme faktörleri 1 değerinin üzerinde olması durumunda gerilmelerin artarak boruya iletildiğini, 1 değerinin altında olduğunda ise gerilmelerin azalarak zemine iletildiğini ifade eder (Akyelken, 2020).

Kang (2007) esnek boruyu çevreleyen yan dolgunun kemerlenme davranışı üzerinde etkisini incelemek için yan dolgu malzemesini değiştirerek incelemelerde bulunmuştur. Yan dolgu olarak çakıllı kum (SW90 – SW95, %90 - %95 oranında sıkıştırılmış), siltli kum (ML90-ML95, %90-%95 oranında sıkıştırılmış) ve siltli kil (CL90-CL95, %90-%95 oranında



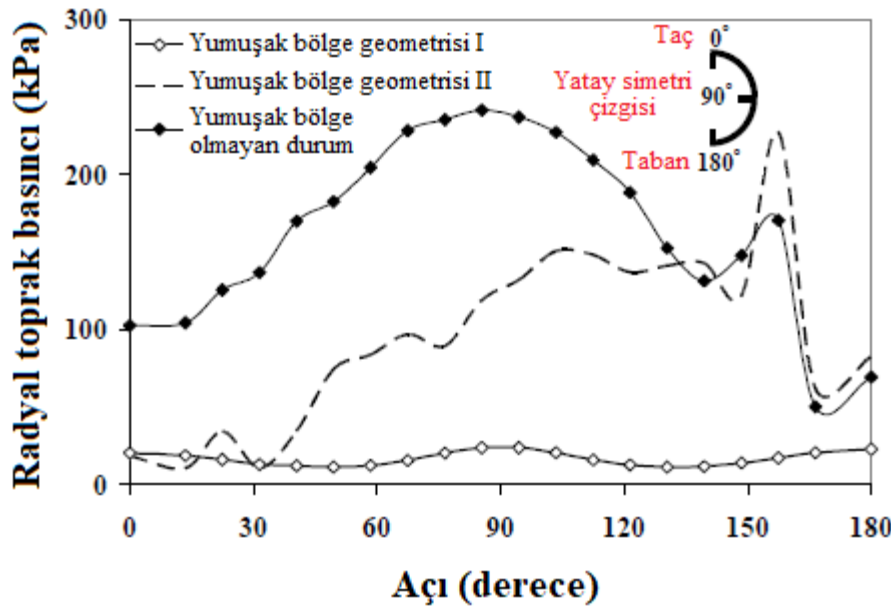
sıkıştırılmış) malzemeleri kullanılmıştır. Belirtilen zemin türlerinin değişimi ile yatay ve düşey kemerlenme faktörleri belirlenmiştir. Kemerlenme faktörlerinin dolgu yüksekliğinin (H), boru çapına (D) olan oranına (H/D) göre değişimi Şekil 2.35’de verilmiştir. Bu grafiklerden boru üzerine gelen yükün azaltılmasında çakıllı kumun diğer zemin türlerine göre daha etkin olduğu söylenebilir.



Şekil 2.35. Yan dolgu malzemeleri değişiminin kemerlenme faktörleri üzerindeki etkileri a) düşey kemerlenme faktörünün H/D oranına göre değişimi b) yatay kemerlenme faktörünün H/D oranına göre değişimi (Kang, 2007)

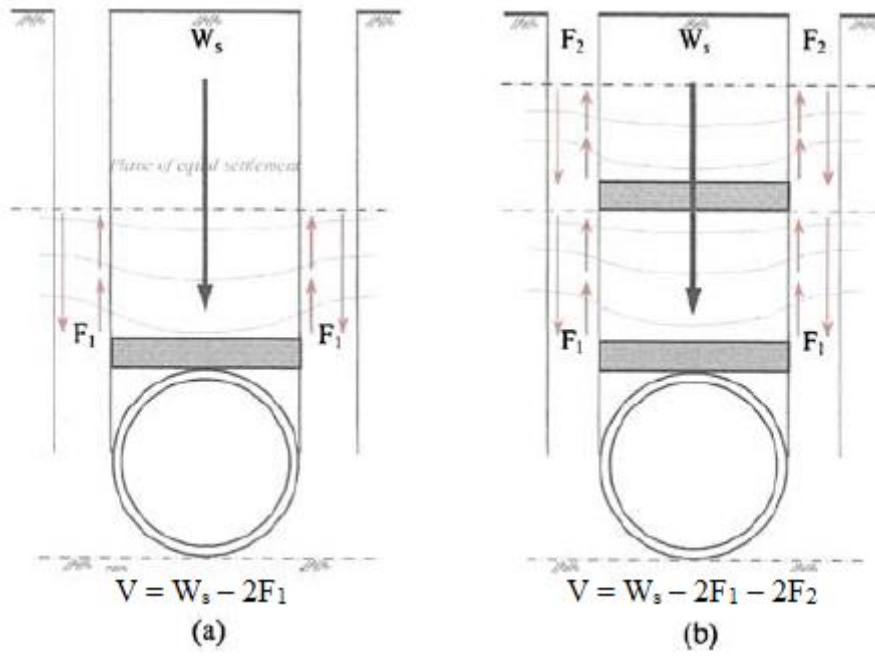
Şekil 2.36’da verilen grafikte esnek boru yüzeyi boyunca radyal toprak basıncı değişimi gösterilmektedir. Grafikte yumuşak bölge oluşturulmadığında elde edilen verilerle, yumuşak bölge geometrisi I ve II durumları kullanıldığında elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. II nolu

geometride yumuşak bölgenin borunun alt seviyelerine kadar uzatılması boru yüzeyinin tamamında radyal toprak basıncının azaltılmasında etkili olmuştur.



Şekil 2.36. Yumuşak bölge kullanılmayan duruma göre yumuşak bölge kullanılan durumlarda boru yüzeyinde oluşan radyal gerilmelerin değişimini (Kang, 2007)

Kim vd. (2010) yapay hendek yönteminde EPS geofoam ile oluşturulan sıkışabilir bölgelerin optimal geometrisini belirlemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Deneylerde tek katmanlı ve çift katmanlı EPS geofoam için oluşturulan yumuşak bölgenin boru üzerindeki zemin yükünü azaltması incelenmiştir. Model deneylerinde 10 cm çaplı elik boru ve kum (SP) zemin kullanılmıştır. Deneyler EPS kullanılmadan, tek katmalı EPS ve çift katmanlı EPS kullanıldığı durumlar için yapılmıştır. Kullanılan EPS malzemenin yoğunluğu  $15 \text{ kg/m}^3$ , kalınlığı ise 5 cm'dir. Şekil 2.37'de gömülü borular üzerinde tek ve çift kat sıkışabilir bölge içeren durumları gösterilmiştir. Şekil 2.37b'de gösterildiği gibi, eşit oturma düzleminin üzerine ek bir sıkışabilir bölge yerleştirildiğinde, Kim vd. (2010) boru üzerindeki düşey yükün azaltılmasını destekleyen ek kayma kuvvetlerinin üretileceğini belirtmişlerdir. Çizelge 2.5'te ise gerçekleştirilen model deneyleri özetlenmiştir.



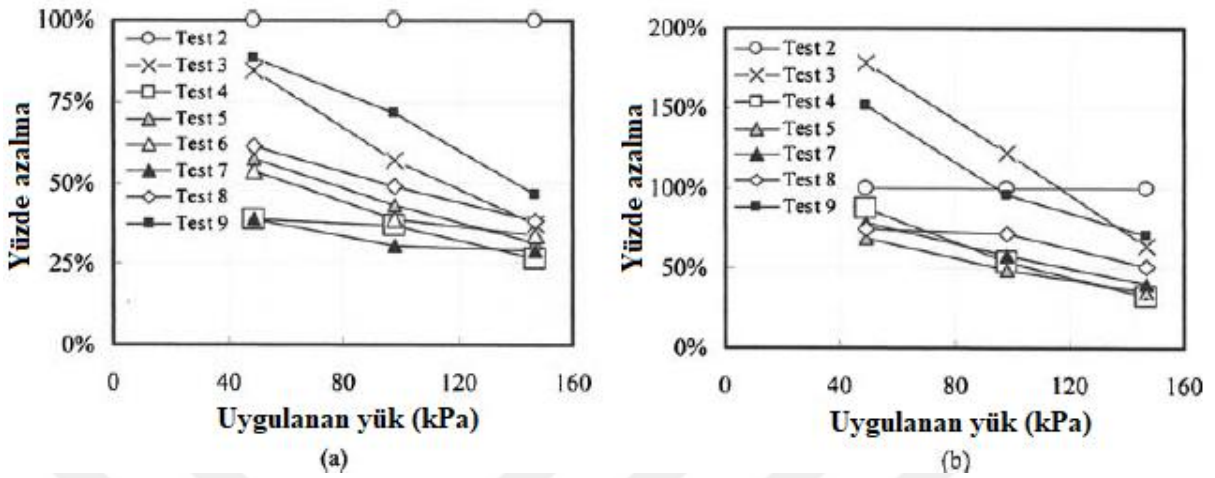
Şekil 2.37. Gömülü boruların tek kat ve çift kat sıkışabilir bölge içeren durumlarda toprak yükü dağılımı (Kim vd., 2010)

Çizelge 2.4. Model deneylerinde incelenen faktörler ve değişkenler (Kim vd., 2010)

EPS Geofom Durumu	İncelenen Faktörler	Değişkenler	Test No.
EPS yok	Dolgu zemini içerisindeki gerilme dağılımı	Borusuz kum dolgu	Test 1
		Borulu kum dolgu	Test 2
Tek katmanlı EPS	EPS genişliği	$B_E = 1.0D$	Test 3
		$B_E = 1.5D$	Test 4
		$B_E = 2.1D$	Test 5
Çift katmanlı EPS	EPS panelleri arasındaki mesafe	$S_E = 0.5D$	Test 6
		$S_E = 1.0D$	Test 7
		$S_E = 1.2D$	Test 8
		$S_E = 1.5D$	Test 9

Şekil 2.38 Test 2'ye kıyasla tüm testler için toprak basınçlarındaki azalmayı göstermektedir. Başka bir ifadeyle grafikte, boru üzerinde EPS bulunmayan Test 2'nin toprak basınçları ile normalize edilen diğer testlere ait toprak basınçlarındaki değişim gösterilmektedir.

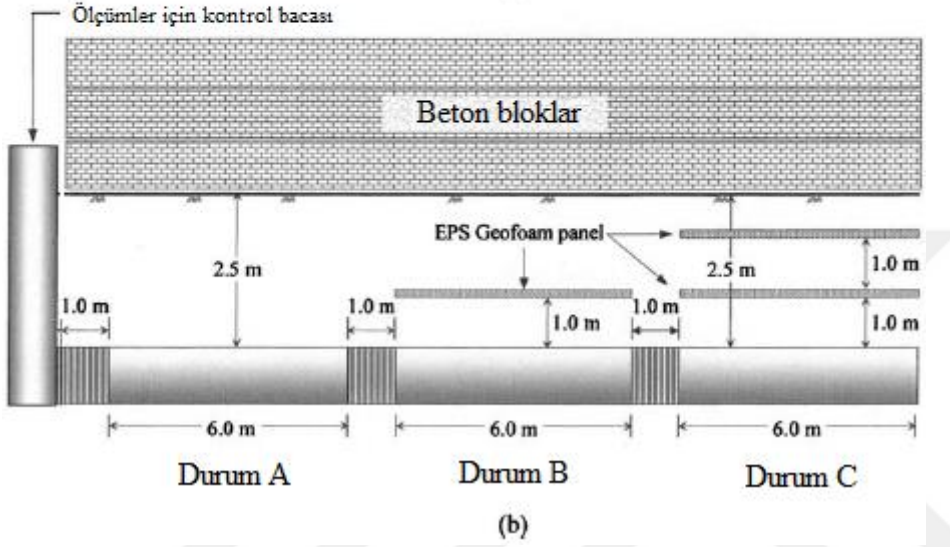
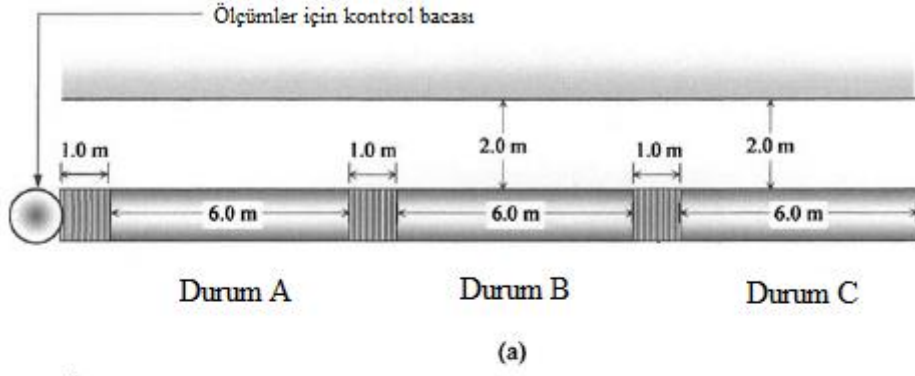
Verilen grafikler hem Test 4'ün hem de Test 7'nin diğer test durumlarına kıyasla toprak basınçlarını en aza indirdiğini göstermektedir.



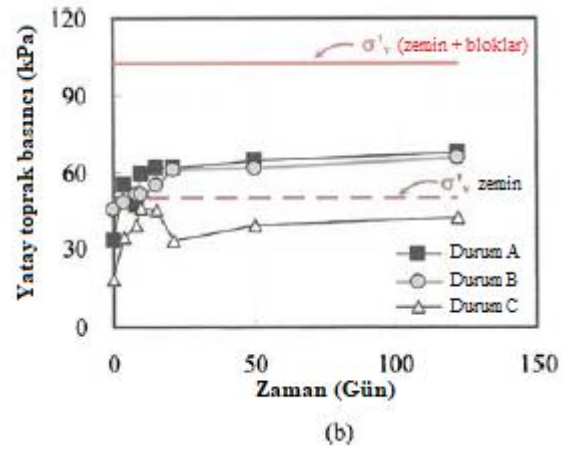
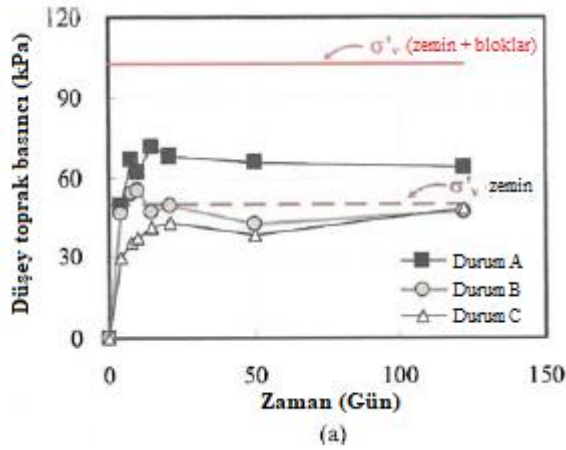
Şekil 2.38. Toprak basınçlarındaki yüzde azalma oranları a) Normalize edilmiş düşey toprak basıncı b) Normalize edilmiş yatay toprak basıncı (Kim vd. 2010)

Çalışmada model deneylerin ardından tam ölçekli deneylerle tek katmanlı ve çift katmanlı EPS durumlarının etkinliği incelenmeye devam edilmiştir. Deneyde 1 m çapındaki çelik borular üzerine tek ve çift katmanlı 1 m genişliğindeki EPS paneller yerleştirilmiştir. Zemin malzemesi olarak kum (SW) kullanılmıştır. Gerekli yükleme durumunu sağlayabilmek için ise beton bloklardan yararlanılmıştır. Tam ölçekli deneye ait plan görünümü Şekil 2.39'da verilmiştir. Şekil 2.40'ta ise boruya etki eden toprak basınçları verilmiştir. Düşey toprak basıncı incelendiğinde tek katmanlı ve çift katmanlı EPS durumları birbirine benzerdir ancak yanal toprak basıncında çift katmanlı durum tek katmanlı durumdan daha iyi sonuç göstermiştir.

Model deney sonuçlarına göre Test 4'te ve Test 7'de düşey toprak basıncı yaklaşık %70 oranında, yatay toprak basıncı ise yaklaşık %60 oranında azalmıştır. Tam ölçekli deneylerde ise hem tek katmanlı hem de çift katmanlı EPS durumlarında düşey toprak basıncı yaklaşık %30 oranında azalmıştır. Yatay toprak basıncında meydana gelen azalma tek katmanlı EPS durumu için %5 seviyesindeyken çift katmanlı EPS durumu için %36 oranını bulmuştur. Durum B'de EPS genişliği 1,5D boyutunda alınsaydı yanal toprak basıncında meydana gelen azalma Durum C'ye benzer olabilirdi. Bu çalışmanın sonuçlarına göre Kim vd. (2010) çift katmanlı EPS'nin boru üzerine etkiyen toprak basınçlarını azaltmada etkili bir yöntem olabileceğini ifade etmişlerdir.

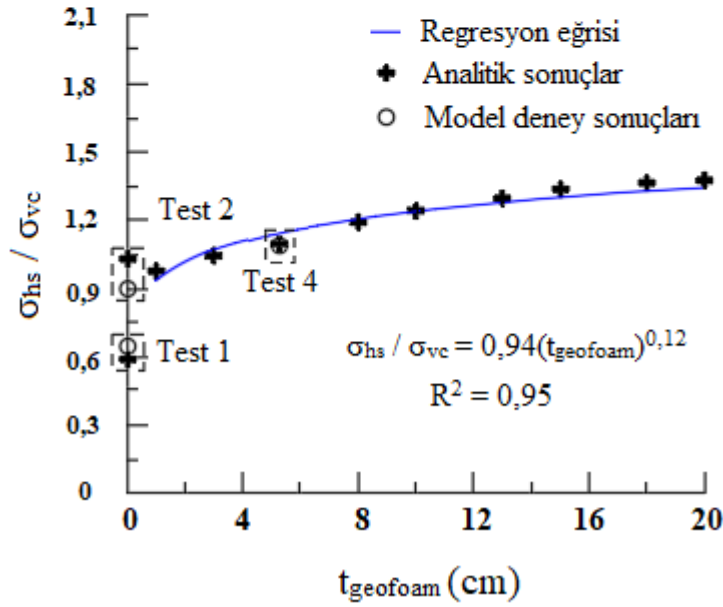
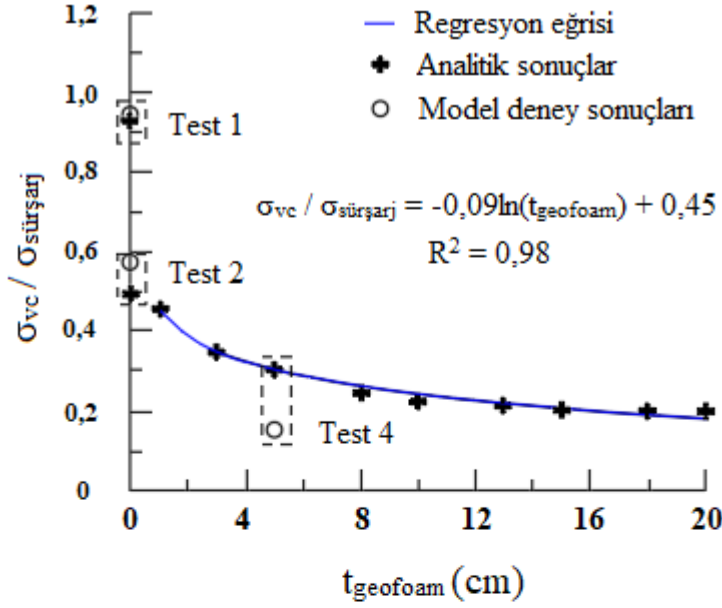


Şekil 2.39. Tam ölçekli deney planlarının görünüşleri a) üstten görünüş b) yandan görünüş (Kim vd., 2010)



Şekil 2.40. Tam ölçekli deneylerde boru üzerine etki eden toprak basınçları a) Düşey toprak basıncı b) Yatay toprak basıncı (Kim vd., 2010)

Witthoef ve Kim (2016) sayısal analizlerle gömülü boru uygulamalarında kullanılan EPS geoföamın optimum boyutlarını belirlemişlerdir. Sayısal analiz uygulamalarında Kim vd. (2010)'nin yaptığı model deney verileri kullanılmıştır. Model deney verilerinin kalibre edilmesinin ardından parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki temel tasarım kriteri belirlenmiştir: İlk kriter boru tacındaki düşey gerilmenin ( $\sigma_{vc}$ ) mümkün olduğunca azaltılması, ikinci kriter ise boru yan duvarına etki eden yanal gerilme ( $\sigma_{hs}$ ) ile boru tacındaki düşey gerilme ( $\sigma_{vc}$ ) arasında kabul edilebilir bir oran sağlanmasıdır ve  $\sigma_{hs}/\sigma_{vc} = 1 \pm 0,1$  oranı kabul edilebilir bir hedef olarak belirlenmiştir. EPS genişliği üzerine yapılan analizlerde, model deneylerde olduğu gibi yine 1,5D boyutu en uygun boyut olarak belirtilmiştir. Model deneylerde üzerinde çalışılmayan bir parametre olan EPS kalınlığı üzerine de incelemeler yapılmıştır. EPS kalınlığının değişimine göre sayısal analizlerden elde edilen gerilmeler Şekil 2.41'de verilmiştir. Şekil 2.41a'da görüldüğü gibi EPS kalınlığı arttıkça  $\sigma_{vc}$  değeri azalmaktadır ve böylece ilk tasarım kriteri sağlanmıştır. Şekil 2.41b'de ise  $\sigma_{hs} / \sigma_{vc}$  oranı EPS kalınlığının küçük olduğu durumlarda 1 değerine yakındır ancak EPS kalınlığı arttıkça oran artmaktadır. Bu durumda ikinci tasarım kriterinin sağlanması için EPS kalınlığının 5 cm'den büyük olmaması gerekmektedir. Her iki tasarım kriteri birlikte değerlendirilirse EPS kalınlığı  $t_{\text{geoföam}} = 5$  cm olarak belirlenmiştir. Çift katmanlı EPS durumlarının incelendiği nümerik çalışmalarda ikinci EPS katmanı eşit oturma düzlemi üzerine yerleştirilemediği için tasarım kriterlerini sağlamadığı ifade edilmiştir.

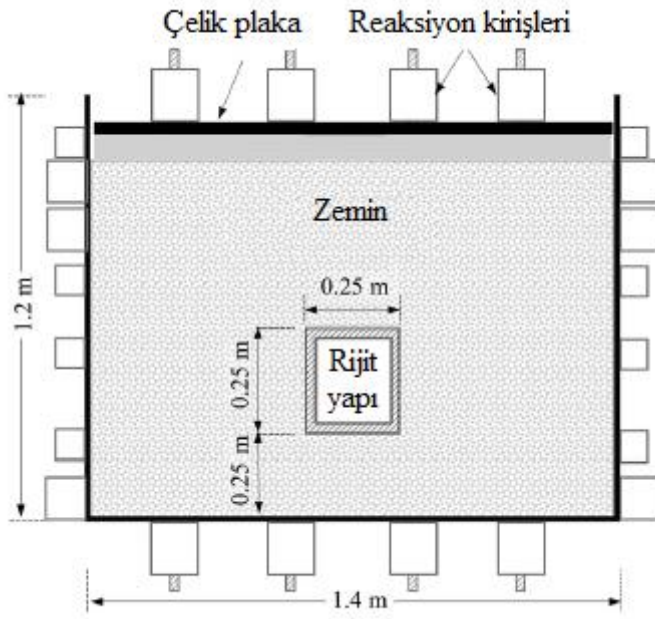


Şekil 2.41. EPS panel kalınlığının etkileri (EPS panel genişliği 1,5D olarak sabit tutulmuştur) a) boru tacındaki düşey gerilme b)  $\sigma_{hs} / \sigma_{vc}$  oranı (Witthoef ve Kim, 2016)

Meguid vd. (2017a) granüler zemin içerisine gömülmüş ve üzerine EPS geofoam yerleştirilmiş rijit kutu şeklindeki bir yapı üzerindeki toprak basınçları dağılımını araştırmak için hem deneysel hem de nümerik modeller hazırlamışlardır. Deneysel çalışmalar boyunca 0.25m x 0.25m x 0.435m boyutlarındaki menfez kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan yoğunlukları 14,4 kg/m<sup>3</sup> (EPS15), 21,6 kg/m<sup>3</sup> (EPS22), 38,4 kg/m<sup>3</sup> (EPS39) olan EPS geofoam malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışını belirlemek için tek eksenli basınç deneyi



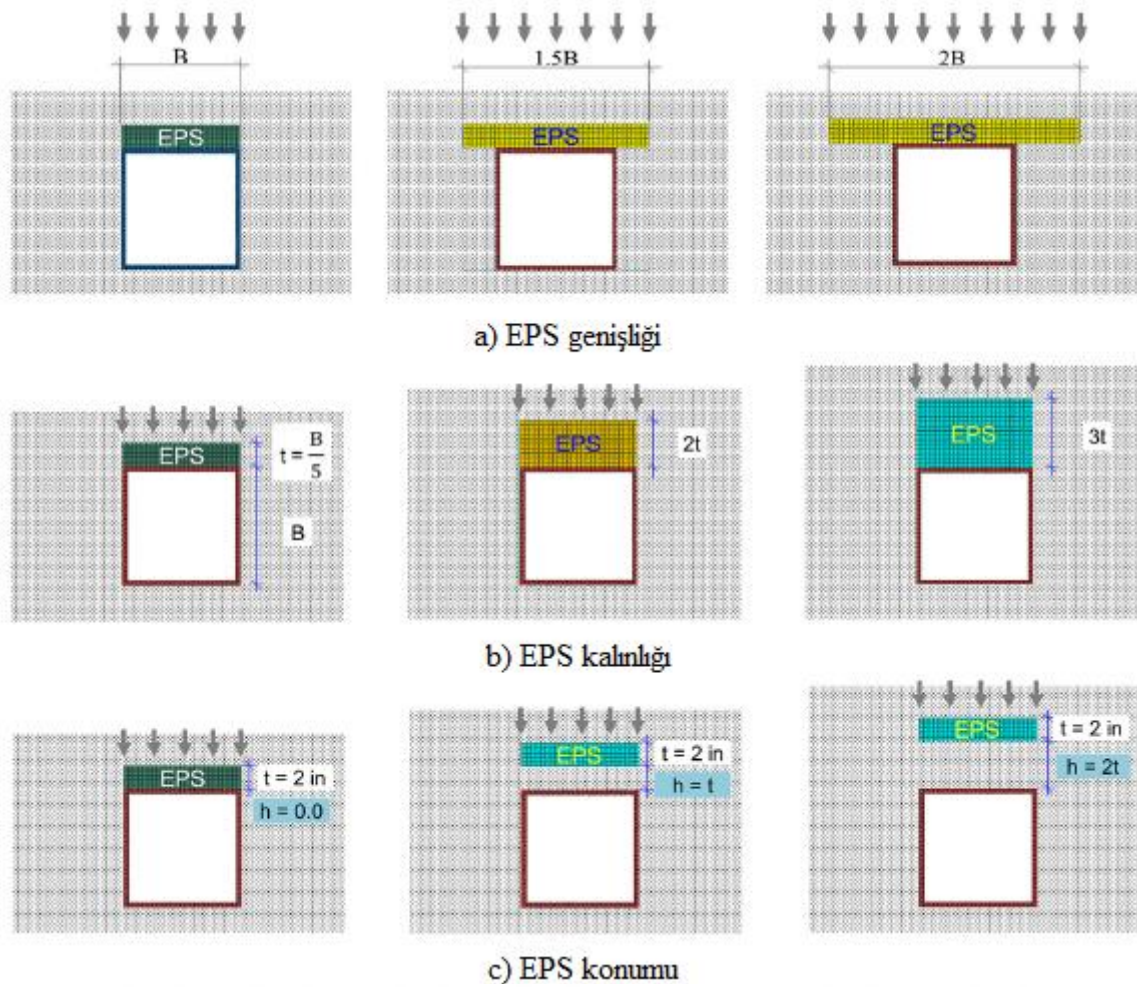
gerçekleştirilmiştir. Deneylede kumlu çakıl zemin kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği Şekil 2.42’de gösterilmiştir.



Şekil 2.42. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Meguid vd., 2017a)

Deneysel çalışmalar kullanılarak hazırlanan modellerin kalibrasyonu yapılarak çalışmalara devam edilmiştir. ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapı üzerine yerleştirilen EPS panelin yoğunluğunun, genişliğinin, kalınlığının ve konumunun gömülü yapı üzerine etkileyen zemin gerilmelerinde meydana gelen değişmelerdeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.43’de EPS geofom panelin incelenen farklı durumları verilmiştir. Şekil 2.43 a) EPS panelin genişlik değişimini, b) EPS panelin kalınlık değişimini, c) EPS panelin boru üstündeki konum değişimini göstermektedir.





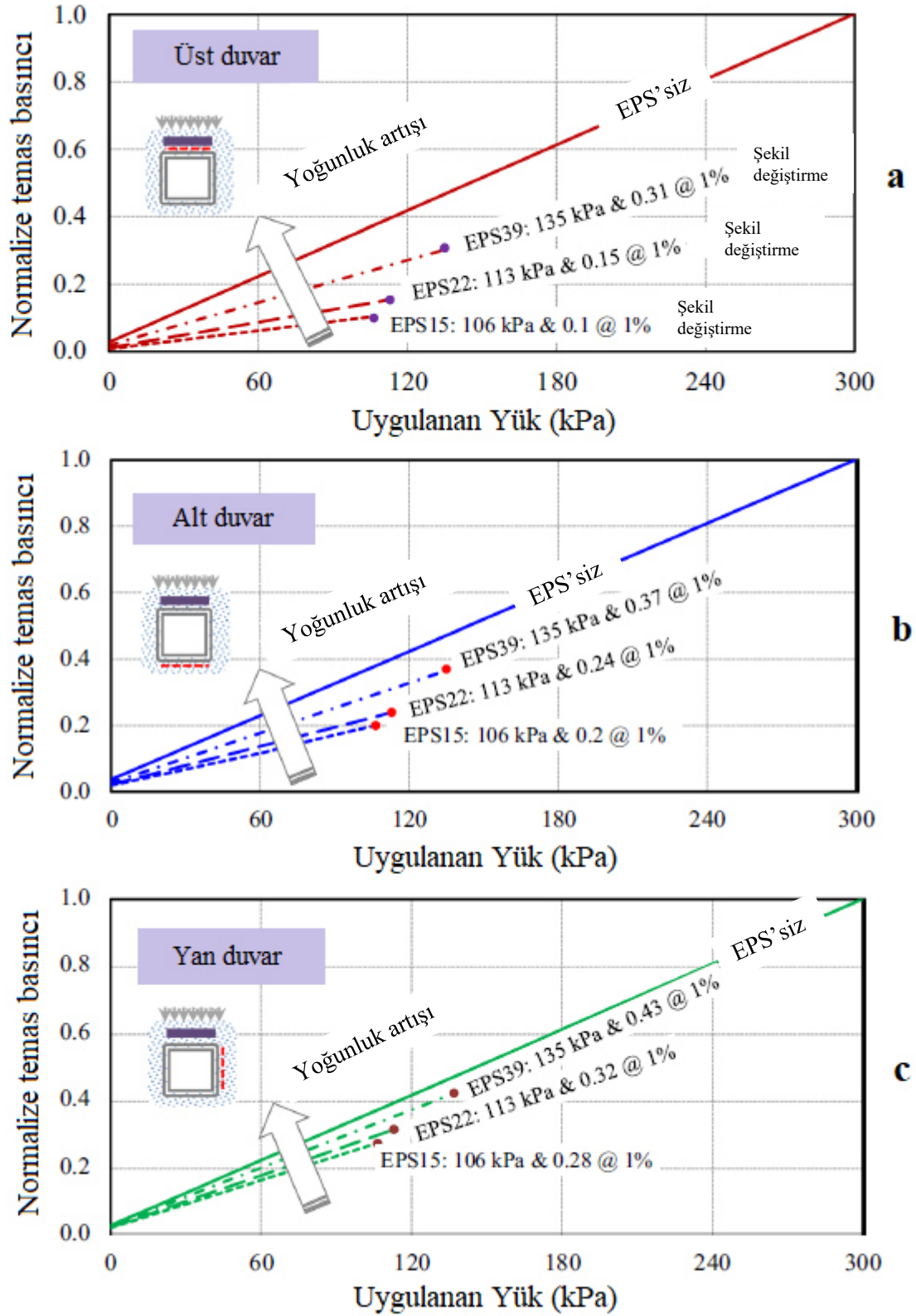
Şekil 2.43. Gömülü yapı üzerine yerleştirilen EPS geofoamın incelenen parametrelerindeki geometrilerindeki değişimler a) EPS genişliği değişimi b) EPS kalınlığı değişimi c)EPS konum değişimi (Meguid vd., 2017a)

Şekil 2.43’de verilen geometrik parametre değişimleri sonucunda EPS genişliğinin 1B’ den 2B’ye artışı gömülü yapının üst duvarında gerilmeleri %12 arttırdığı ancak alt ve yan duvarlarda gerilmeleri %10 azalttığı görülmüştür. EPS kalınlığındaki artışın boru üst duvarında gerilmelerin %18 azalmasını sağladığı ancak alt ve yan duvarlarda önemli bir değişiklik oluşmadığı belirtilmiştir. EPS panelin boru üstündeki konumunun değişmesi ise alt ve üst duvarlarda gerilmenin %10 azalmasını sağladığı ama yan duvarlardaki gerilme değişiminde önemli bir fark meydana gelmediği belirlenmiştir.

Meguid ve Hussein (2017), Meguid vd., (2017a) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar üzerine devam ederek yeni eklemelerde bulunmuştur. Rijit yapı üzerine etkileyen gerilmelere EPS yoğunluğunun etkisini belirlemek için sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS programında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. EPS yoğunluğunun gömülü yapıya aktarılan yük

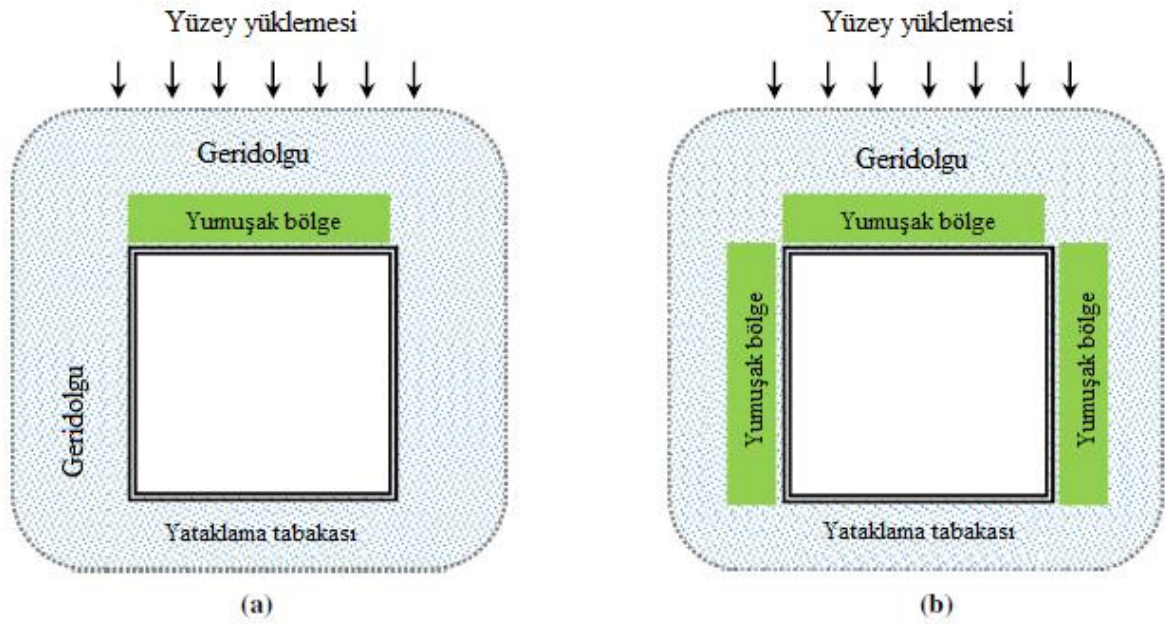
üzerindeki etkisi EPS15 (14,4 kg/m<sup>3</sup>), EPS22 (21,6 kg/m<sup>3</sup>) ve EPS39 (38,4 kg/m<sup>3</sup>) olmak üzere üç farklı yoğunluktaki EPS malzemesi için incelenmiştir. Gömülü yapının üst, alt ve yan duvarlarına etkiyen gerilmelerdeki değişimler Şekil 2.44'de verilmiştir. Analiz edilen yapay hendek durumları için, parametrik çalışmada EPS malzemedeki maksimum %1 şekil değiştirmeye izin veren yüklemeler uygulanmıştır.

Üst duvarda meydana gelen gerilmedeki azalmanın EPS15 için %75 oranını bulurken EPS22 için %60, EPS39 için ise %30 oranında kaldığı görülmüştür (Şekil 2.44a). Alt duvarda oluşan gerilme azalma oranları EPS15, EPS22 ve EPS39 için sırasıyla %47, %40 ve %23 olarak belirlenmiştir. İncelenen EPS yoğunlukları için sırasıyla %25, %20 ve %8 gerilme azalma oranları yan duvarda gözlemlenmiştir. Alt ve yan duvarlarda ölçülen gerilme azalma oranları üst duvarda meydana gelen gerilme azalma oranlarıyla karşılaştırıldığında daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.44. Gömülü yapı duvarlarına etkiyen toprak basıncına EPS yoğunluğunun etkisi a) Üst duvar b) Alt duvar c) Yan duvar (Meguid ve Hussein, 2017)

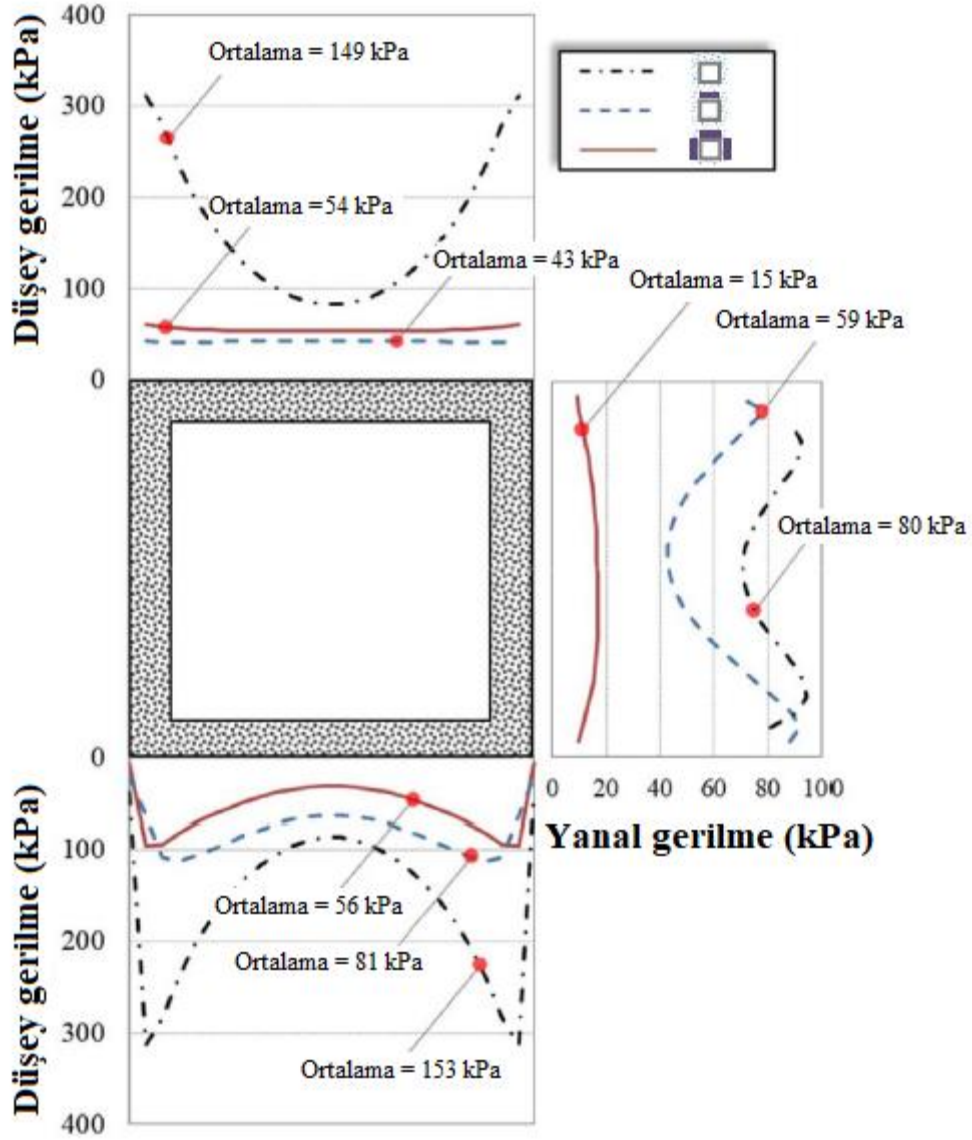
Meguid vd. (2017b) bir başka çalışmada gömülü yapının üst ve yan duvarlarını EPS ile kaplayarak oluşturulan yumuşak bölge geometrisi ile gömülü yapı üzerine etkiyen gerilmelerdeki değişimi incelemiştir. Şekil 2.45'te çalışmada kullanılan a) gömülü yapı üzerine yerleştirilen EPS geometrisi b) gömülü yapı etrafına U şeklinde yerleştirilen EPS geometrisi verilmiştir. Belirtilen konfigürasyonların gömülü yapının duvarlarına etkiyen gerilmeler üzerindeki rolünü araştırmak için ABAQUS programı ile sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.45. Yapay hendek yöntemi geometrileri a) Yumuşak bölge geometrisi I: gömülü yapı üzerine EPS yerleştirilmesi b) Yumuşak bölge geometrisi II: Gömülü yapı etrafına EPS yerleştirilmesi (Meguid vd. 2017b)

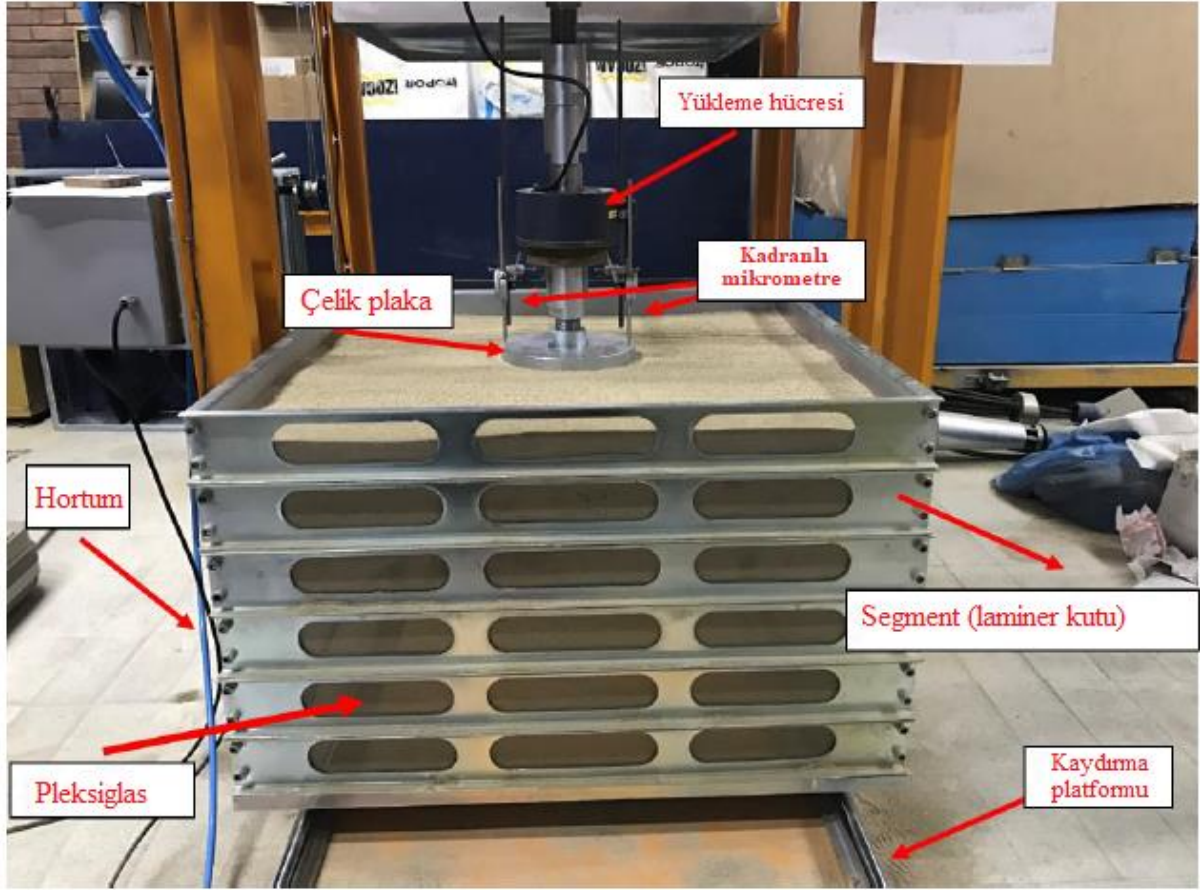
Şekil 2.45'te verilen durumlar ile gömülü yapı üzerinde EPS olmadığı durumlarda elde edilen gerilme dağılımları Şekil 2.46'da verilmiştir. Yapılan karşılaştırmada EPS15 malzemesi kullanılmıştır. Şekil 2.46'da görüldüğü gibi yapı üstünde EPS'nin olmadığı durumda ortalama 149 kPa gerilme etki ederken bu gerilme oranı yumuşak bölge geometrisi I durumunda 43 kPa düştüğü ve alt duvarda yumuşak bölge geometrisi II kullanıldığı durumda etki eden gerilmelerde %64'lük bir azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Yan duvarlarda U şeklinde geometri kullanılması gerilmelerde önemli bir azalma sağladığı ve EPS'siz durumda ortalama 80 kPa gerilme etki ederken yumuşak bölge geometrisi II durumda gerilmeler ortalama 15 kPa seviyesine kadar inmiştir. Böylece U şeklinde geometri kullanılarak alt ve yan duvarlara etkiyen gerilmelerde önemli azalmalar sağlandığı görülmüştür.





Şekil 2.46. EPS'siz durum, yumuşak bölge geometrisi I ve II durumlarında gömülü yapı etrafında oluşan gerilme dağılımları (Meguid vd. 2017b)

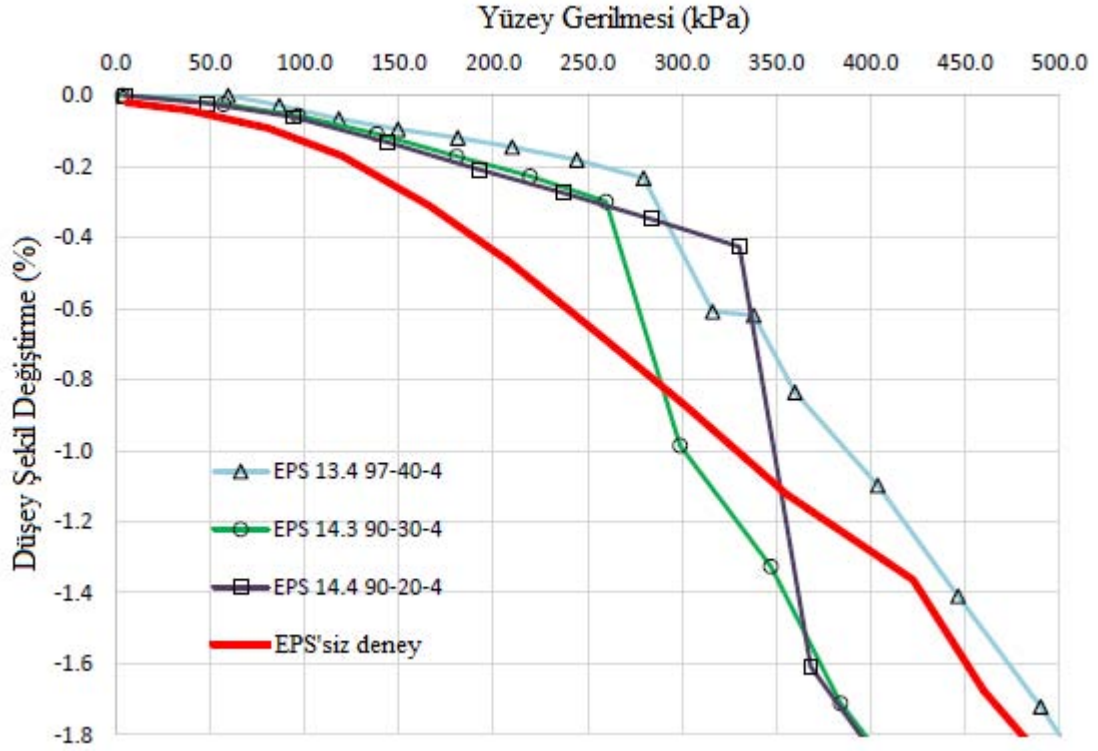
Söylemez (2017) EPS gefoam malzemenin gömülü borular üzerindeki iyileştirme etkinliğini incelemek için bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirmiştir. Deneyleri yapmak için 1m X 1m X 1m boyutlarındaki deney kutusu kullanılmıştır. Yatak malzemesi olarak kumun kullanıldığı bu deneylerde boru malzemesi olarak 20 cm çaplı PVC boru kullanılmıştır. Çalışmada kademeli olarak artan statik yükler dairesel bir plaka ile zemine uygulanmış ve bunun sonun sonucunda boruda oluşan düşey şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Şekil 2.47'de deney kutusu ve yükleme plakası görülmektedir. Deneylerde EPS gefoam malzemenin kalınlık, genişlik, yoğunluk, konum ve sayısının değişiminin boru üzerindeki etkileri incelenmiştir.



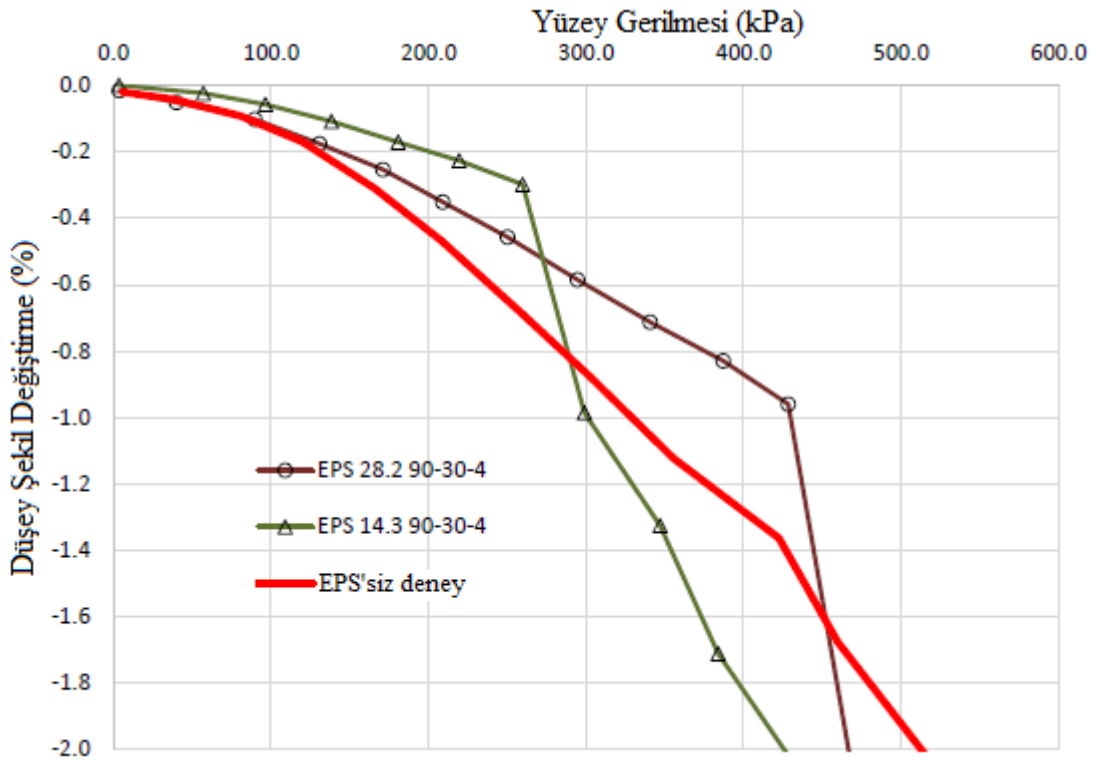
Şekil 2.47. Deney düzeneğinin genel görünümü

Deneylerde EPS genişliği olarak D, 1,5D ve 2D genişlikleri kullanılmıştır. Söylemez (2017) aynı yüklem altında genişlik artışı ile düşey şekil değiştirmelerin azaldığını belirtmiştir. Şekil 2.48’de verilen grafiğe göre 250 kPa gerilme altında EPS kullanımı ile şekil değiştirmeler arasında %0,1 fark olduğu görülmektedir.

EPS geofoam yoğunluğunun değişimi ile ilgili grafik Şekil 2.49’da verilmiştir. Bu grafiğe göre daha düşük yüklemelerde düşük yoğunluklu EPS’nin pozitif kemerlenmeyi daha çabuk sağladığı için yüksek yoğunluklu EPS’ye göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Ancak yüksek yoğunluklu EPS ise daha yüksek yüklemelere karşı daha iyi performans göstererek daha geç yenilme göstermiştir.



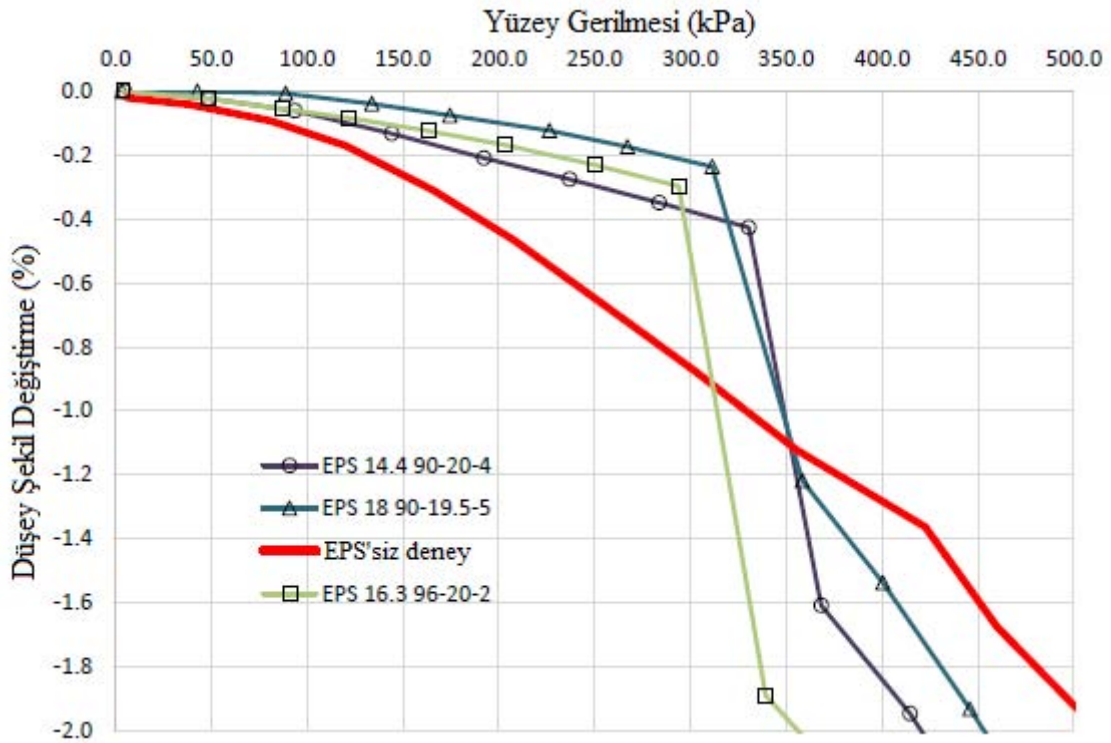
Şekil 2.48. EPS genişlik değişimin düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi (Söylemez, 2017)



Şekil 2.49. Farklı yoğunluklardaki EPS geofoamların düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi (Söylemez, 2017)

İncelenen bir diğer parametre ise EPS kalınlığıdır. Kalınlık değişiminin etkisini incelemek için 2 cm, 4 cm ve 5cm kalınlıklarında EPS geofoam kullanılmıştır. Şekil 2.50’de verilen grafiğe göre daha kalın geofoam kullanılmasının boruda meydana gelen şekil değiştirmeleri azaltma konusunda daha faydalı olduğunu göstermiştir.

Deneilerin hepsi genel olarak değerlendirilecek olursa EPS geofoam kullanıldığı her durumda yenilene kadar faydalı olmuştur. EPS geofoam yenildiği durumda ise sistemin genel performansı EPS kullanılmayan duruma göre daha kötü hale gelmektedir.

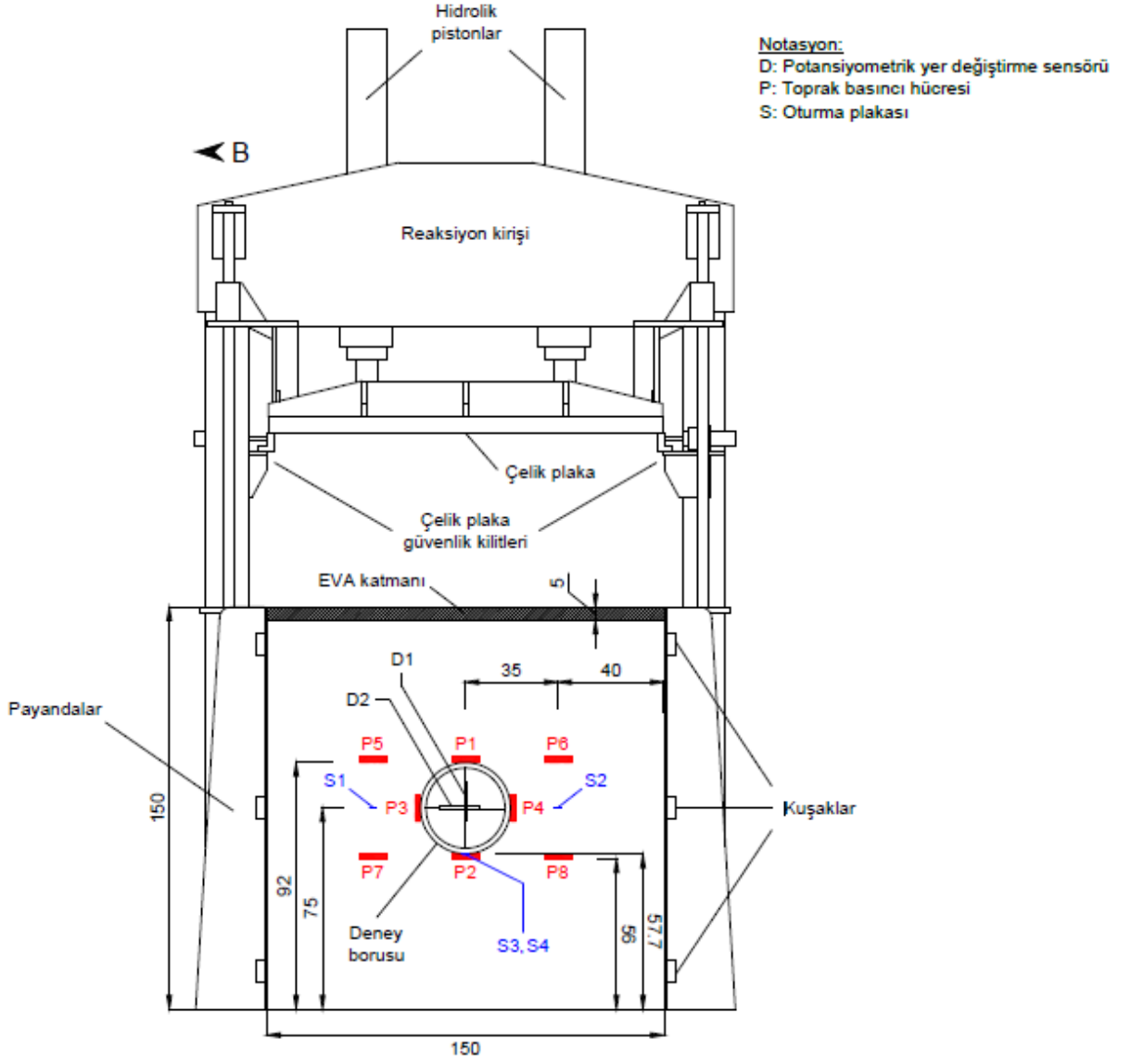


Şekil 2.50. EPS kalınlık değişiminin düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi (Söylemez, 2017)

Akınay (2017) yapay hendek uygulamasında esnek boruların kullanıldığı bir çalışma olmadığını belirterek bu boruların yapay hendek yönteminde kullanılması durumunda boruya daha küçük zemin gerilmelerinin etkiyeceğini ve boruda meydana gelen esnemelerde azalma olacağını belirtmiştir. Bu durumun gerçekliğini göstermek amacıyla 1:1 ölçekli laboratuvar deneyleri ile detaylı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Laboratuvar deneylerinin ardından sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Deneyler 1,5 m X 1,5 m X 1,5 m boyutlarında olan deney tankında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 2.51’de verilmiştir. Deneyde

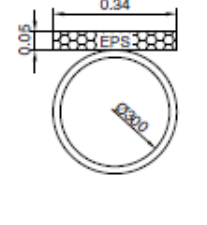
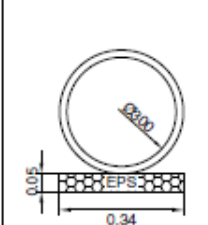
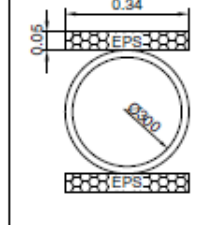
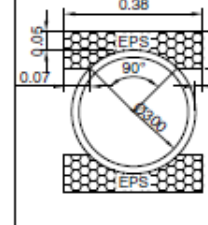
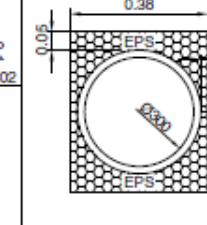


kullanılan HDPE boru 30 cm çapındadır. 10 kg/m<sup>3</sup> ve 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktaki EPS paneller Şekil 2.52’de verilen konumlarda yerleştirilmiştir.

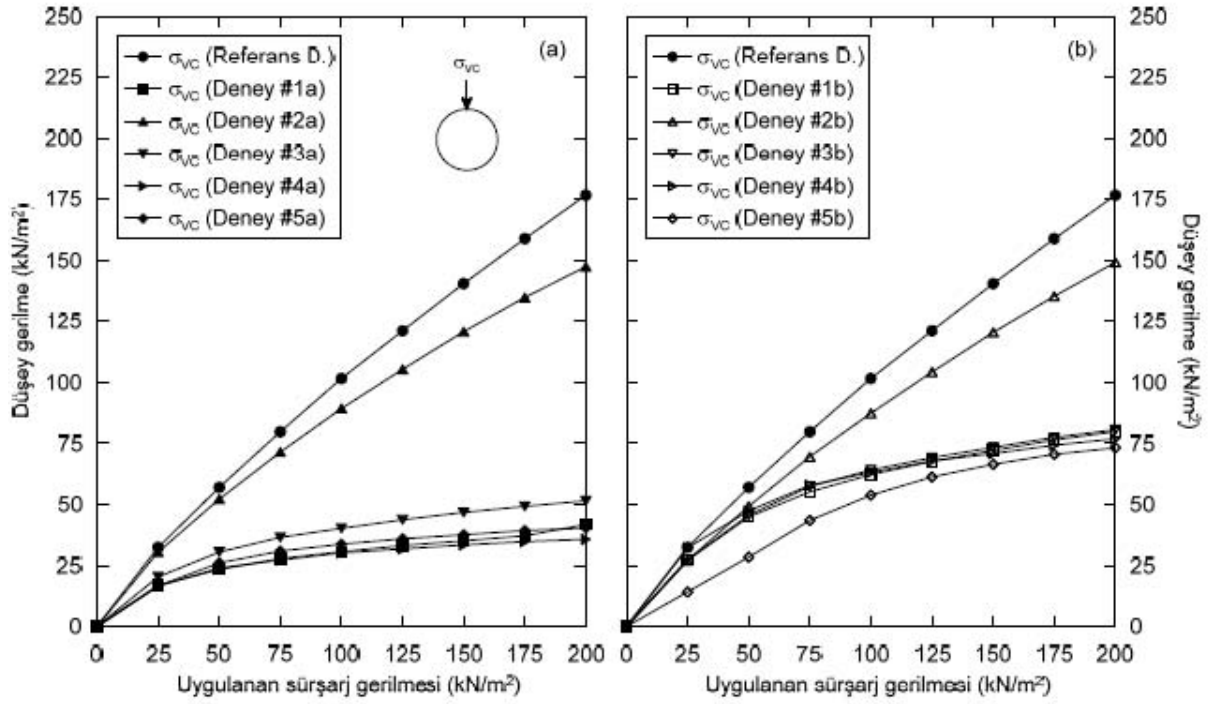


Şekil 2.51. Deney düzeneğinin teknik görünümü (Akınay, 2017)

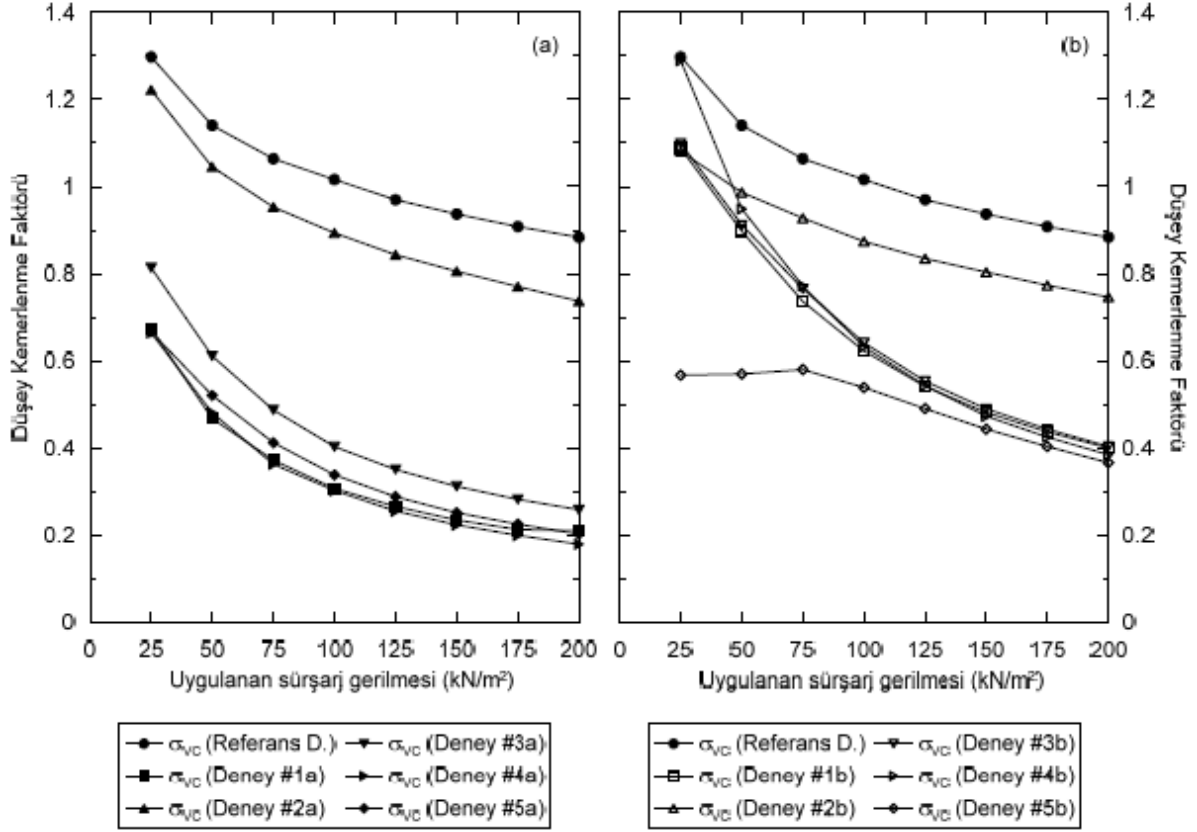
Şekil 2.52’de EPS konumları verilen deneylerden elde edilen sonuçlar sadece boru ve zemin malzemesiyle gerçekleştirilen Referans deneyinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda boru tacında ölçülen düşey gerilmeler Şekil 2.53’te, düşey kemerlenme faktörleri (VAF) ise Şekil 2.54’te verilmiştir.

Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5
Boru tacı üzerinde bir adet EPS paneli	Boru tabanı altında bir adet EPS paneli	Boru tacı üzerinde ve boru tabanı altında birer adet EPS paneli	Boru tacı üzerinde ve boru tabanı altında birer adet yan-semer şeklinde EPS paneli	Boru tacı üzerinde ve boru tabanı altında birer adet semer şeklinde EPS paneli
				

Şekil 2.52. Gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde kullanılan EPS malzemenin boru etrafındaki konumları (çap ölçüleri mm cinsinden diğer ölçüler ise m cinsindedir) (Kılıç ve Akınay, 2019)



Şekil 2.53. Laboratuvar deneylerinde boru tacında ölçülen düşey gerilmeler a)  $10 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu EPS kullanılan deneyler b)  $15 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu EPS kullanılan deneyler (Akınay, 2017)



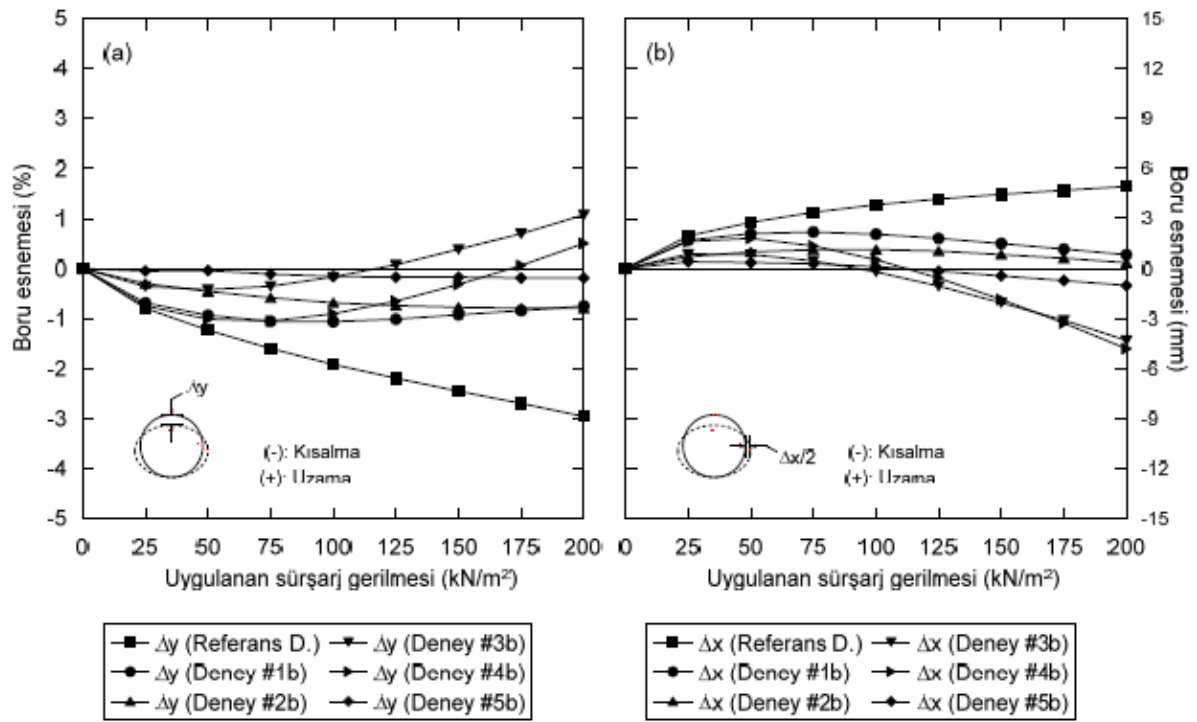
Şekil 2.54. Laboratuvar deneyleri sonucunda boru tacında belirlenen düşey kemerlenme faktörleri a) 10 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu EPS kullanılan deneyler b) 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu EPS kullanılan deneyler (Akinay, 2017)

Şekil 2.54'te verilen grafikler incelendiğinde Deneysel 2 dışındaki deneylerde elde edilen gerilme değerleri hemen hemen aynı seviyede olmuştur. Boru tacına etki eden düşey gerilmelerde 10 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda EPS'nin kullanıldığı deneylerde %70,8 ile %79,8 oranları arasında değişen azalmalar sağlanırken, 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda EPS geofoam kullanıldığı deneylerde %54,4 ile %58,6 oranları arasında değişen azalmalar elde edilmiştir. Deneysel 2'de bu oranlar 10 kg/m<sup>3</sup> ve 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu EPS malzemeler için sırasıyla %15,6 ve %16,6 olarak belirlenmiştir.

Taç üzerinde ölçülen düşey gerilme değerleri, uygulanan sürşarj gerilmelerine oranlanarak düşey kemerlenme faktörleri belirlenmiştir. Referans deneyde 0,88 VAF değeri elde edilirken, 10 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda EPS'nin kullanıldığı deneylerde 0,18 ile 0,26 arasında değerler; 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda EPS'nin kullanıldığı deneylerde 0,37 ile 0,40 arasında değerler elde edilmiştir. Boru üzerinde EPS bulunmayan Deneysel 2'de ise VAF değerleri 0,74-0,75 değerleri elde edilmiştir.

Boru yan duvarına etki eden yanal gerilmelerde bu çalışmada incelenmiştir. Deneylede ölçülen yanal gerilmelerde  $10 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu EPS malzeme kullanımında %56,4 ile %75,3 oranları arasında,  $15 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu EPS malzeme kullanımında ise %35,9 ile %65,6 oranları arasında azalma sağlanmıştır. Yanal gerilmelerde en fazla azalma oranı Deney 5 ile elde edilmiştir.

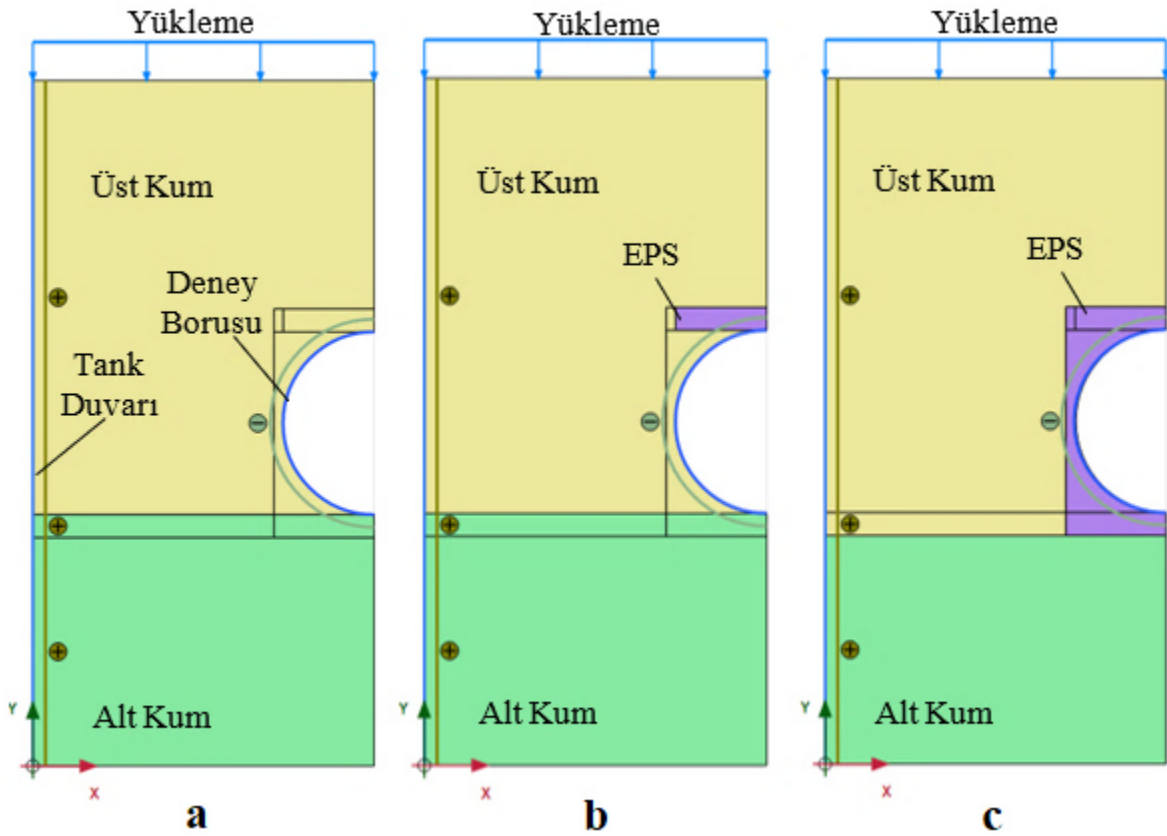
Çalışmada ele alınan bir başka konu ise borunun düşeyde ve yatayda yaptığı şekil değiştirmelerdir.  $15 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu EPS malzeme kullanımı ile boruda meydana gelen şekil değiştirmeler Şekil 2.55'te verilen grafikte gösterilmektedir.



Şekil 2.55.  $15 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu EPS malzeme kullanımında ölçülen şekil değiştirmeler a) Düşey şekil değiştirme b) Yatay şekil değiştirme (Akınay, 2017)

200 kPa yük altında referans deneye göre düşey esnemedede Deney 1 ile Deney 2'de %74, Deney 3'te %63, Deney 4'te %82,9 ve Deney 5'te %93,6 oranlarında azalma sağlanmıştır. 200 kPa yük altında referans deneye göre yatay esnemedede Deney 1'de %83, Deney 2'de %92, Deney 3'te %13, Deney 4'te %2,6 ve Deney 5'te %80 oranında azalma sağlanmıştır. Deney 3 ve 4'te ise düşeyde uzama, yatayda ise kılma çok daha büyük oranlarda meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise boru taç ve taban bölgelerinin EPS içine doğru hareket etmeleri olabileceği belirtilmiştir.

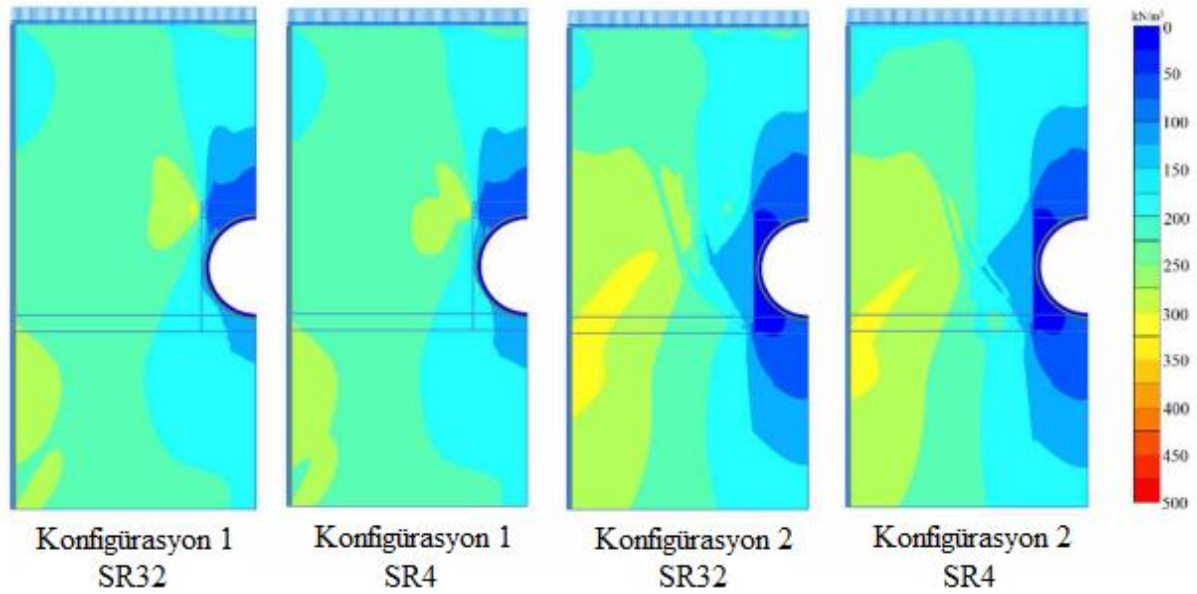
Akyelken (2020) çalışmasında, Akınay (2017)'nin gömülü HDPE borular ile birlikte EPS kullanımının boru davranışı üzerindeki etkilerini incelediği deneysel çalışmaları dikkate alarak parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deney verileri kullanılarak Plaxis 2D programında nümerik model oluşturulmuştur. Laboratuvar deneylerinde incelenmeyen boru çapı değişimi, boru rijitlik değişimi parametrik sayısal analizlerle incelenmiştir. Bu çalışmada Şekil 2.52'de yer alan EPS geometrilerinden Deney 1 ve Deney 5'te kullanılan geometriler kullanılmıştır. Plaxis 2D programında oluşturulan nümerik modeller Şekil 2.56'da verilmiştir. Referans boru ile birlikte EPS'nin kullanılmadığı durumu, Konfigürasyon 1 boru üstünde EPS'nin kullanıldığı durumu, Konfigürasyon 2 ise boru etrafının EPS ile sarılı olduğu durumu ifade etmektedir.



Şekil 2.56. Plaxis 2D sayısal analizde kullanılan model geometrileri a) Referans, b) Konfigürasyon 1 c) Konfigürasyon 2 (Akyelken, 2020)

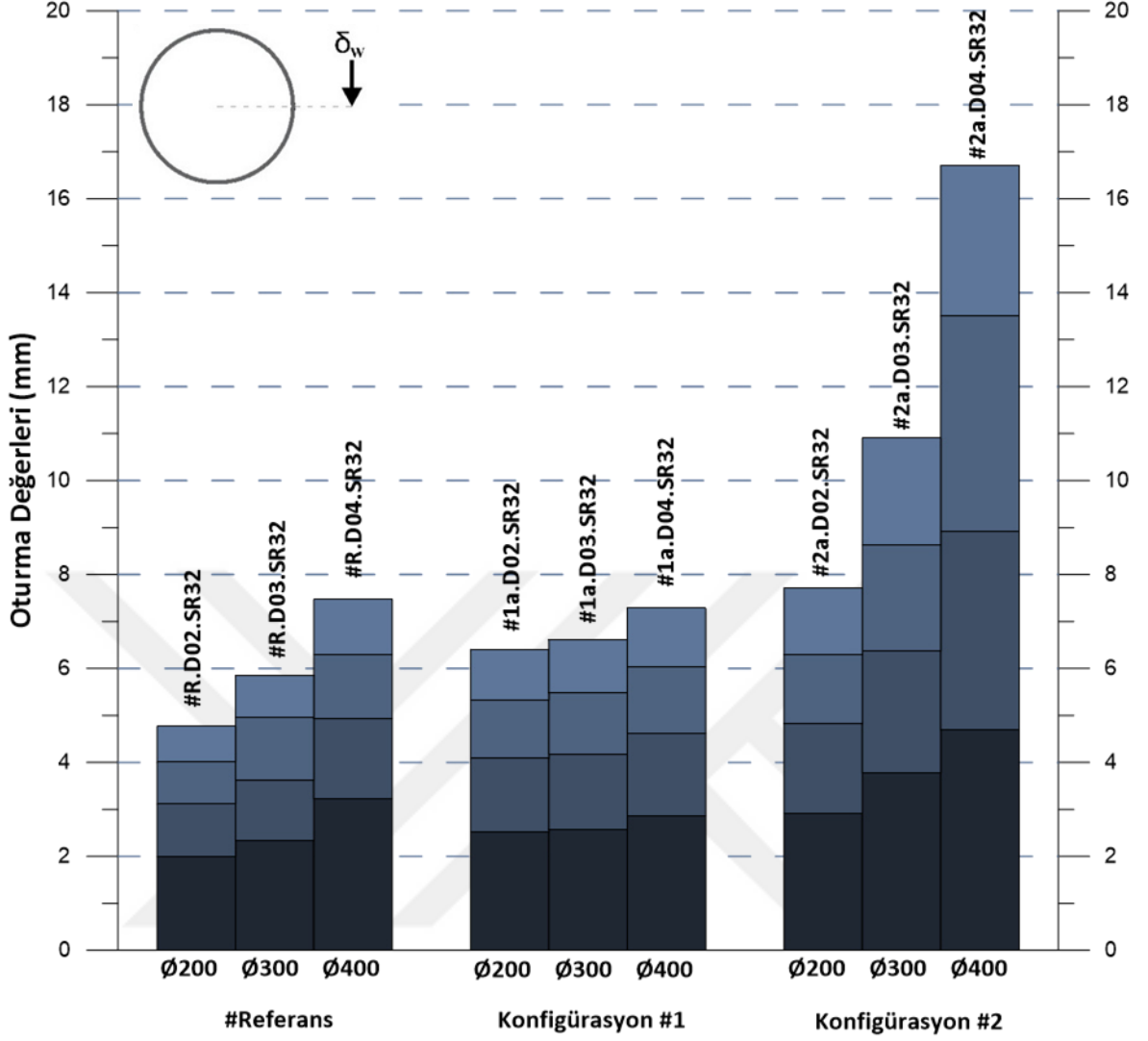
Analizlerde SR32 (rijitlik değeri 32 kN/m<sup>2</sup>) ve SR4 (rijitlik değeri 4 kN/m<sup>2</sup>) özelliklerindeki borular kullanılmıştır. Çapı 300 mm olan SR32 ve SR4 boruları Şekil 2.56'daki konfigürasyonlar kullanılarak analiz edilmiştir. SR32 ve SR4 borularının 200 kPa gerilme altında düşey gerilme dağılımı diyagramları Şekil 2.57'de verilmiştir. Sayısal analiz

sonuçlarına göre HDPE boru rijitliği 8 kat azalır, boru üzerine etkiyen düşey gerilmelerin yaklaşık olarak aynı olduğu bulunmuştur.



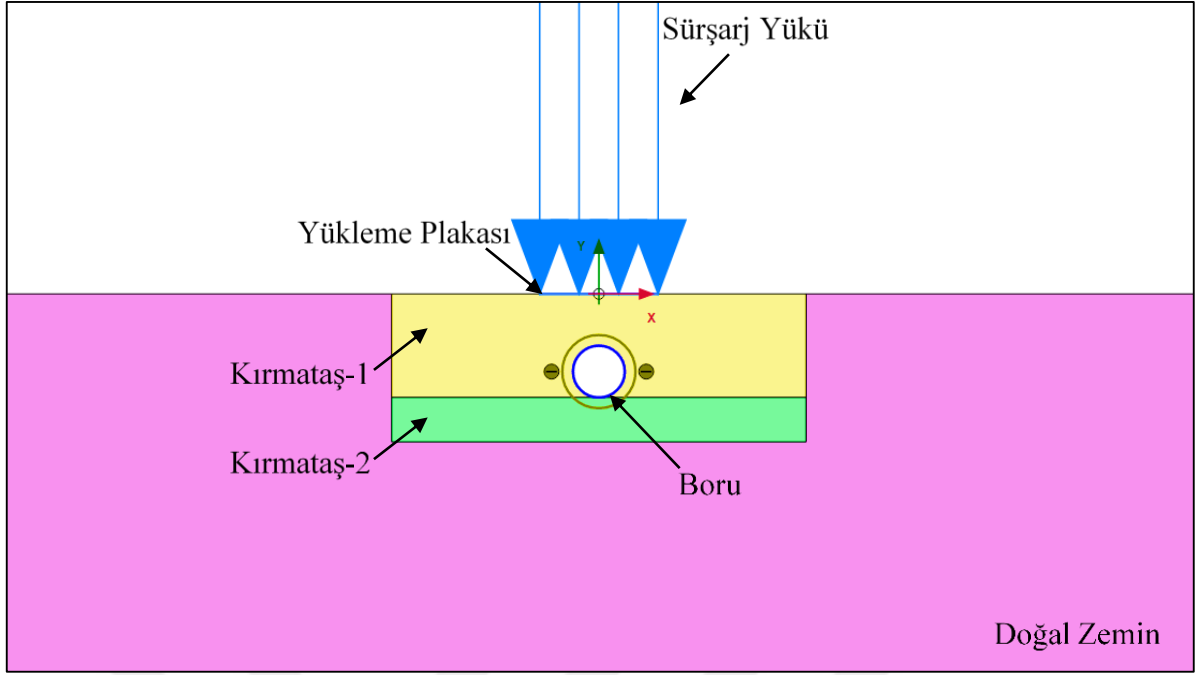
Şekil 2.57. 300 mm çaplı SR32 ve SR4 boruları konfigürasyon 1 ve 2 durumlarında analiz edildiğinde oluşan düşey gerilme dağılımı diyagramı (Akyelken, 2020)

Çalışmada incelenen bir diğer parametre boru çapı genişliğinin değişimi olmuştur. İncelenen 300 mm boru çapının yanında 200 mm ve 400 mm boru çapları da incelenmiştir. Şekil 2.58’de kemerlenme hakkında yorum yapabileceğimiz zemin içerisinde oluşan oturma değerleri boru çapı değişimine göre verilmiştir. Referans durumda boru çapı değişimi ile zemin oturmalarında yaklaşık  $\pm 2.00$  mm fark oluşurken, konfigürasyon 1’de bu fark  $\pm 0.80$  mm olarak belirlenmiştir. Konfigürasyon 3’ün kullanımında oturmalarındaki fark 6 mm’yi bulmuştur. Boru etrafına EPS yerleştirilmesi ile boru yanlarındaki zemin oturmalarının artmasına neden olarak kemerlenme etkisinin geliştiğini göstermektedir.



Şekil 2.58. Farklı EPS konfigürasyonları ve farklı boru çapları kullanımında zemin içerisinde meydana gelen oturmalar (Akyelken, 2020)

Akyelken (2020) çalışmasının devamında gömülü borular üzerine gerçekleştirilmiş bir arazi deneyini Plaxis 2D programında modellenmiş bu model üzerinden nümerik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Arazi deneyinin modellenmiş hali Şekil 2.59’da verilmiştir. Arazi deneyi üzerinden gerçekleştirilen çalışmalarda EPS malzemenin parametre değişimi ile geri dolgu malzemesi değişiminin gömülü HDPE boru üzerindeki etkisini incelemiştir.



Şekil 2.59. Arazi deneyinin Plaxis 2D programında oluşturulmuş modeli (Akyelken, 2020)

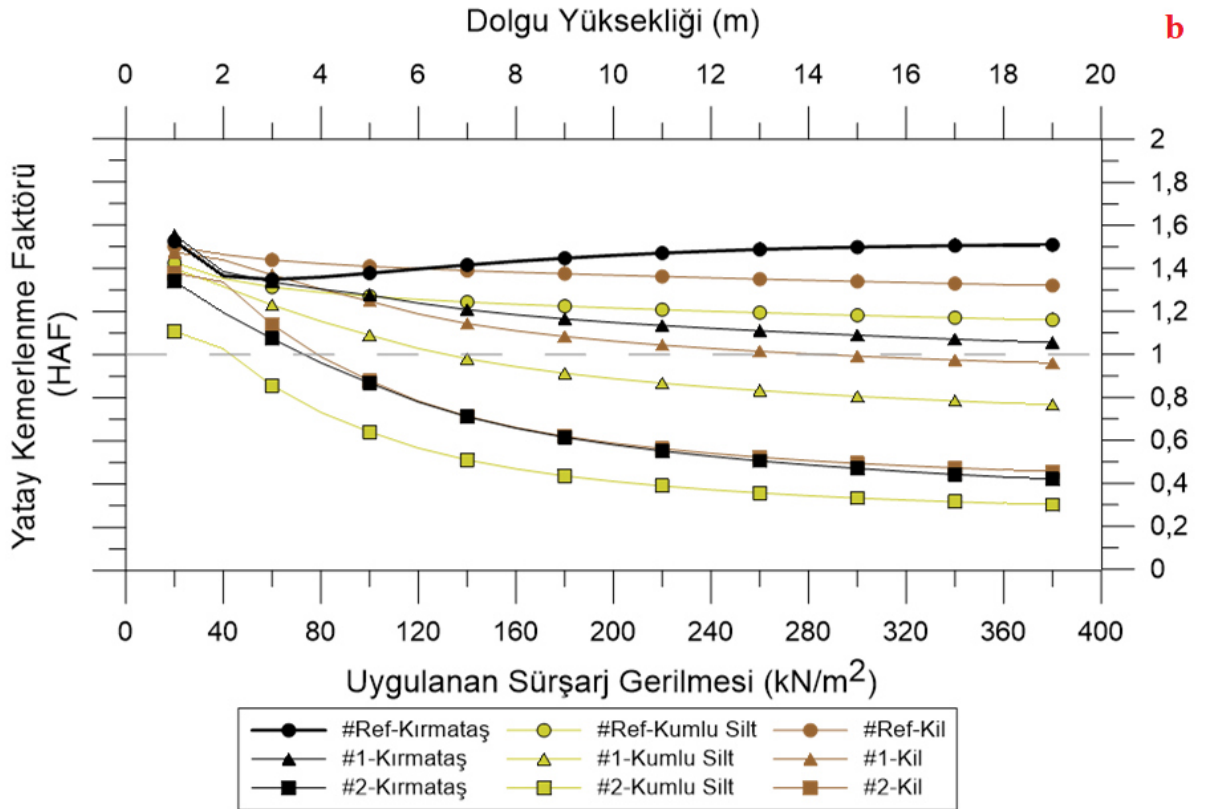
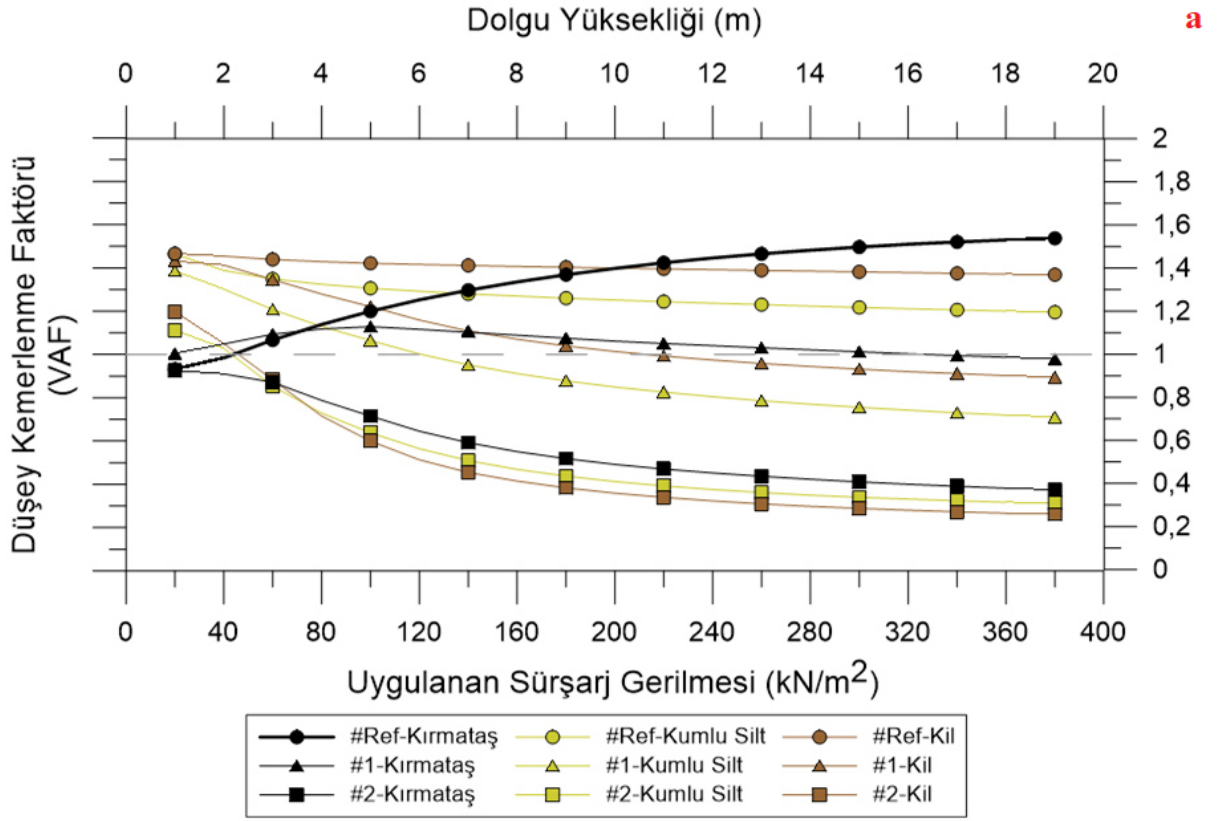
Şekil 2.60'ta hendek içerisindeki geri dolgu malzemesinin değişimi sonucunda elde edilen düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) grafikleri verilmiştir. Geri dolgu malzemesi olarak kırmataş malzemenin yanında kil ve kumlu silt malzemelerde kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.60a'da verilen düşey kemerlenme faktörü grafiğine bakarsak Referans durumda bütün geri dolgu türleri için VAF değeri 1'in üzerinde yer almıştır. Konfigürasyon 2 ile birlikte VAF değeri kırmataş ile yaklaşık 1 değerini, kil geri dolguda 0,9 değerini ve kumlu silt geri dolguda ise 0,7 değerini almıştır. Konfigürasyon 2'nin kullanımı ile VAF değerleri 0,2-0,4 aralığında yer almıştır.

Şekil 2.60b'de verilen yatay kemerlenme faktörü grafiğinde de Referans durumda HAF değerleri 1'in üzerinde yer almıştır. Konfigürasyon 1 ile kırmataş ve kil geri dolgunun HAF değeri yaklaşık 1 olurken kumlu silt geri dolgunun HAF değeri 0,8 olmuştur. Konfigürasyon 2 ile birlikte HAF değerleri 0,3-0,5 aralığında yer almıştır.

Düşey kemerlenme faktörü ve yatay kemerlenme faktörü değerlerine birlikte bakılırsa EPS geofom kullanımı ile bu değerlerin azaldığı görülmektedir. Özellikle Konfigürasyon 2 ile hem VAF hem de HAF değerlerinde önemli azalmalar sağlanmıştır. Bu durum boruya etki eden hem düşey hem de yatay gerilmelerde meydana gelen önemli azalmaları göstermektedir.





Şekil 2.60. Geri dolgu malzemesi değişimi oluşan a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi (Akyelken, 2020)

### 3. DERİN GÖMÜ PROJESİ

Derin Gömü Projesi termoplastik boruların derin bir gömü altında davranışını incelemek için gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında gerçekleştirilen arazi deneyi Ohio Eyalet Üniversitesi'ne bağlı araştırma enstitüsü ORITE (Ohio Research Institute for Transportation and the Environment) ve ODOT (Ohio Department of Transportation - Ohio Ulaştırma Bakanlığı) öncülüğünde yürütülmüştür. Arazi deneyleri 1999 yılı yaz aylarında başlayarak aynı yıl aralık ayında tamamlanmıştır. Bu bölümde verilen tüm bilgiler Moran (2001); Sargand vd. (2002); Sargand, Masada, Tarawneh ve Gruver (2005); Sargand ve Masada (2007) kaynaklarından elde edilmiştir.

Arazi deneylerinde farklı firmalardan temin edilen 6 farklı tipte 18 adet büyük çaplı boru kullanılmıştır. Bu boruların 6 tanesi PVC, 12 tanesi ise HDPE'dir. Termoplastik borular negatif projeksiyon durumuna göre doğal zemin içine açılan dar ve sığ hendeklere gömülmüştür. Deneyde kullanılan boruların temin edildiği firmalar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Boruların malzeme özellikleri ve üretici firmaları (Sargand vd., 2002)

Boru Tipi	Boru Malzemesi	Üretici Firma
A	PVC	Lamson & Sessions Vylon
B	PVC	Contech
C	HDPE	Lane Interprises Inc.
D	HDPE	Advanced Drainage Systems
E	HDPE	Advanced Drainage Systems
F	HDPE	Advanced Drainage Systems

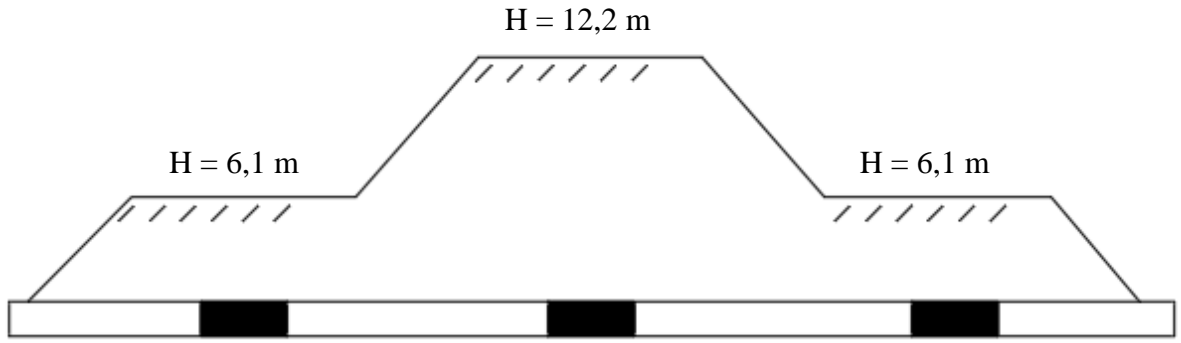
Hendekleri doldurmak için geri dolgu malzemesi olarak kum ve kırmataş kullanılmıştır. Geri dolgu malzemeleri hendeklere %86, %90 ve %96 relatif kompaksiyon yüzdelerinde yerleştirilmiştir. Hendeklere geri dolgunun yerleştirilmesinin ardından dolgu inşaatına başlanmıştır. Dolgu inşaatında yerel zemin malzemesi kullanılmıştır. Çizelge 3.2 genel deney planını özetlemektedir, bu çizelgede deneyde kullanılan bütün boruların yerleştirileceği yatak kalınlıkları, kullanılan geri dolgu malzemesinin türleri ve relatif sıkışma yüzdeleri ile boru üzerine gelen dolgu yükseklikleri verilmektedir.

Çizelge 3.2. Deney planına göre kullanılan borular, boruların gömülme ortamları ve dolgu yükseklikleri (Sargand ve Masada, 2007)

Boru No.	Boru Malzemesi	Boru İç Çapı (mm)	Boru Tipi	Geri Dolgu		Dolgu Yüksekliği (m)	Yatak Kalınlığı (mm)
				Tipi	RK* (%)		
1	PVC	762	A	Kum	96	6,1	150
2				Kırmataş	96	12,2	
3					86	6,1	
4	PVC		B	Kum	86	6,1	
5				Kırma taş	96	12,2	
6					96	6,1	
7	HDPE	762	C	Kum	96	6,1	
8					96	12,2	
9				Kırma taş	86	6,1	
10	HDPE		D	Kum	86	6,1	
11				Kırma taş	96	12,2	
12					96	6,1	
13	HDPE	1067	E	Kum	90	6,1	0-300
14					96	12,2	80-380
15				Kırma taş	90	6,1	0-300
16	HDPE	1524	F	Kırma taş	90	6,1	80-230
17					96	12,2	150-300
18				Kum	96	6,1	80-230

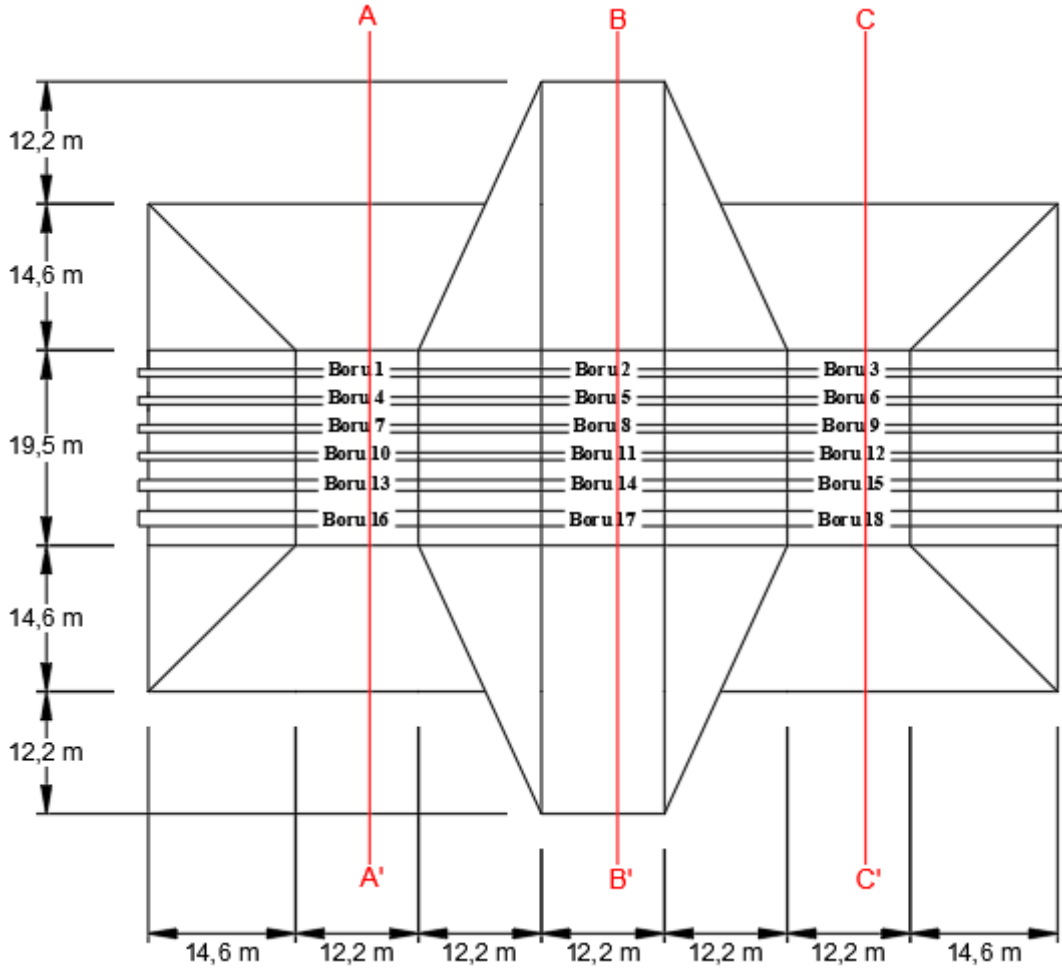
\*Relatif Kompaksiyon

Borular üzerine gelecek dolgu inşaatı Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bir bölümde 12,2 m yüksekliğine kadar devam ettirilirken diğer bölümlerde 6,1 m yüksekliğine kadar devam etmiştir. Dolgu inşaatının planı ve boruların dolgu içindeki konumları ise Şekil 3.2’de verilmiştir. Dolgu inşa planının önden ve yandan görünümüleri ise Şekil 3.3’te verilmiştir.

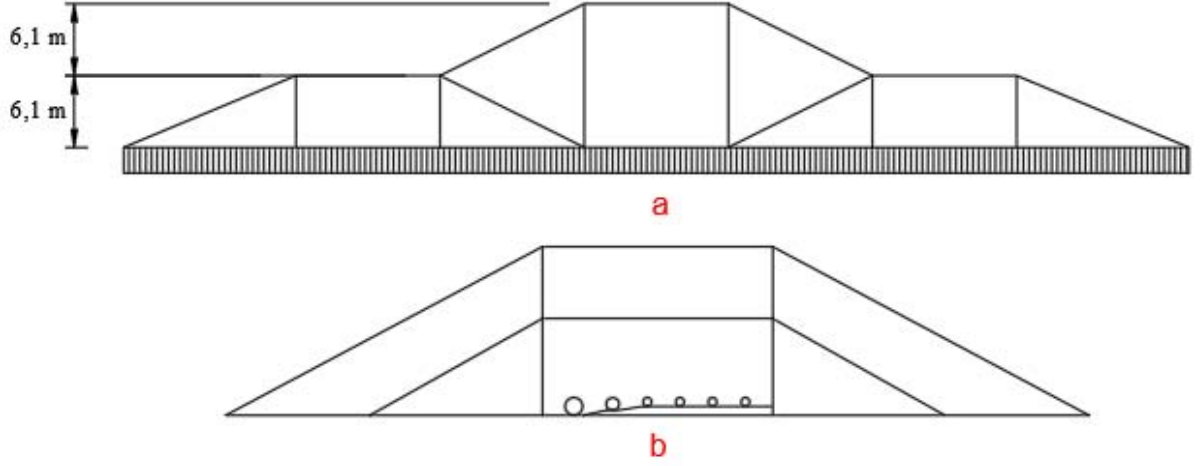


1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15
16	17	18

Şekil 3.1. Deney boruları üzerindeki dolgu yükseklikleri (Sargand ve Masada, 2007)



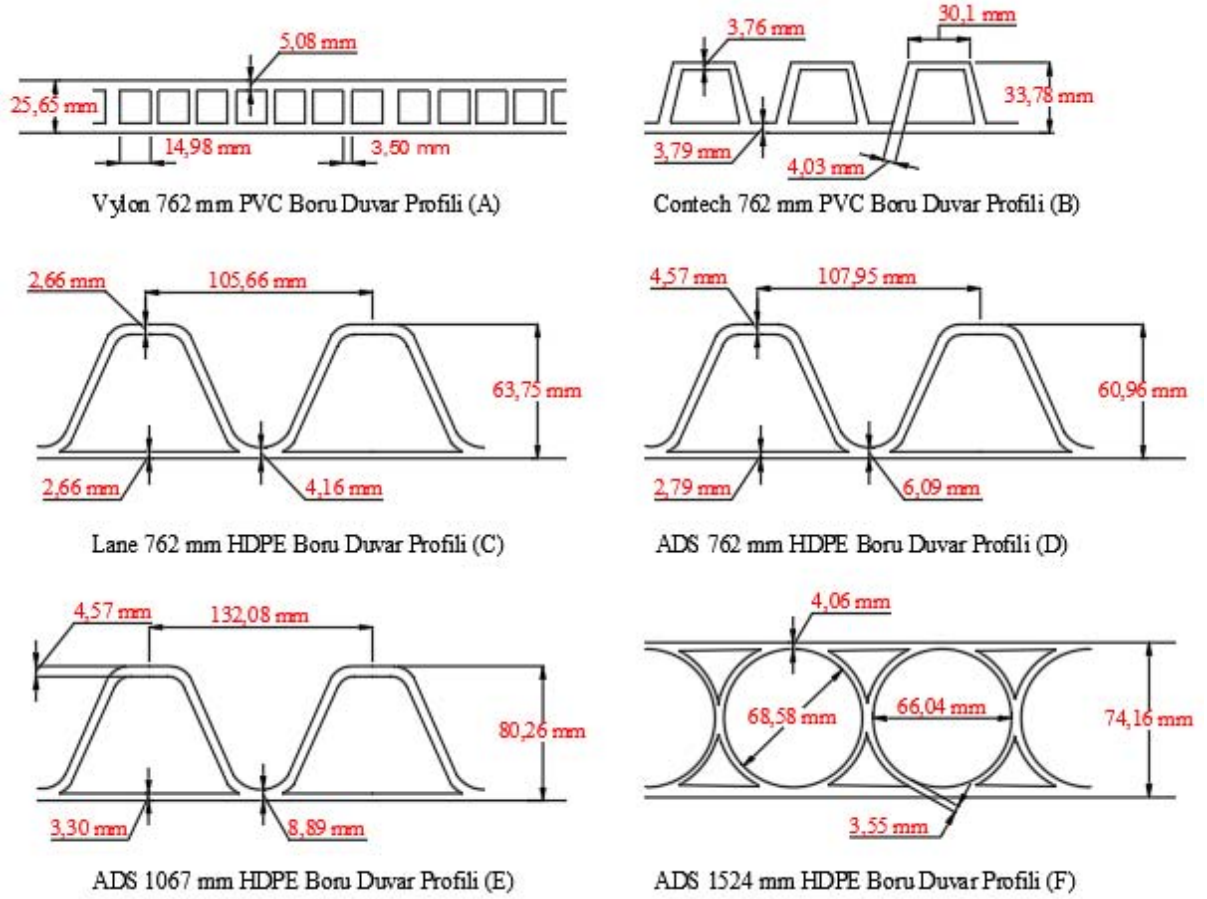
Şekil 3.2. Dolgu inşaatı planı ve boruların dolgu içindeki konumları (Sargand vd., 2002)



Şekil 3.3. Şekil 3.2’de verilen dolgu inşaat planına göre (a) Dolgu inşaatının önden görünümü (b) Dolgu inşaatının yandan görünümü (Sargand vd., 2002)

### 3.1. Boru Özellikleri

Deneyde HDPE ve PVC türlerinde üretilen 6 farklı tipte 18 adet boru kullanılmıştır. Bu farklı tipteki boruların 4 tanesinin boru dış yüzeyi korugedir, iç yüzeyi ise düzdür. Diğer 2 boru tipinde ise boru duvarının hem iç hem de dış yüzeyi düzdür. Şekil 3.4 termoplastik boruların duvar profillerini göstermektedir. Çizelge 3.3’te ise deney borularının temel mühendislik özellikleri verilmektedir.



Şekil 3.4. Proje kapsamında kullanılan boruların duvar profilleri (Sargand vd., 2002)

Çizelge 3.3. Boruların temel mühendislik özellikleri (Sargand vd., 2002)

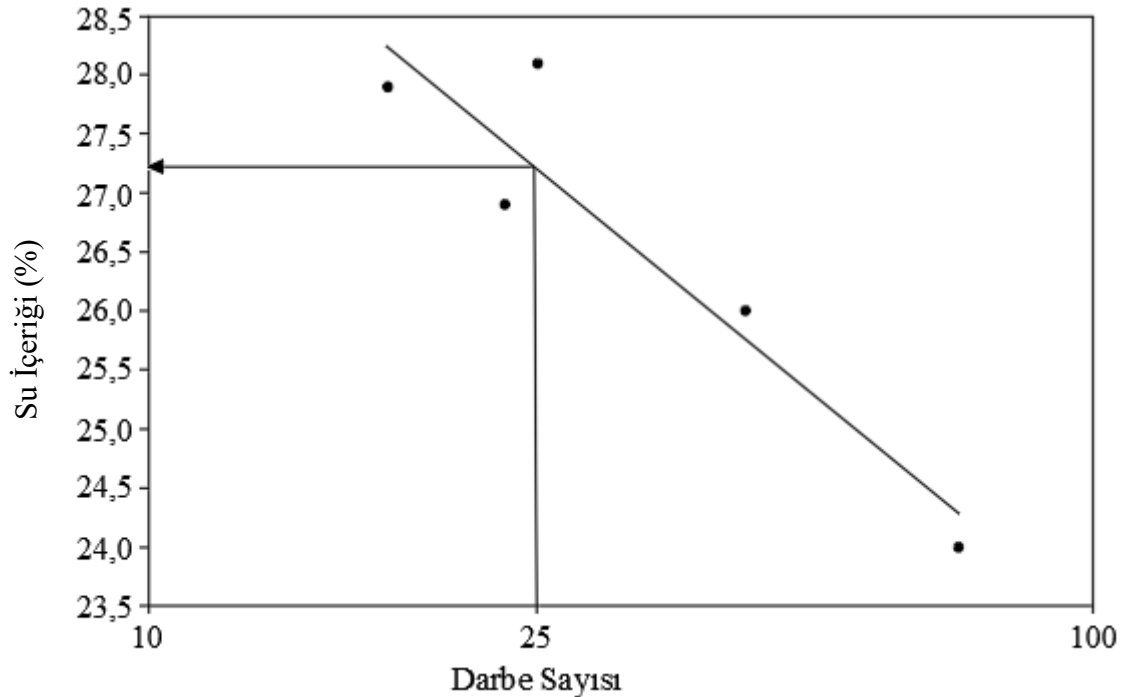
Boru Tipi	Boru Malzemesi	Boru İç Çapı (mm)	Boru Duvarının Birim Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> /mm)	Boru Duvarının Birim Eylemsizlik Momenti (mm <sup>4</sup> /mm)	Boru Malzemesinin Elastisite Modülü (GPa)
A	PVC	762	11,0	842	2,962
B	PVC	762	12,1	1819	2,962
C	HDPE	762	9,6	4670	0,868
D	HDPE	762	10,0	4703	0,965
E	HDPE	1067	10,9	8538	1,097
F	HDPE	1534	16,7	13978	1,089

### 3.2. Zemin Malzemelerinin Özellikleri

Boru etrafına yerleştirilecek geri dolgu malzemeleri ile dolgu inşaatında kullanılacak zemin malzemesinin mühendislik özelliklerini belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Dolgu inşaatında kullanılacak yerel zemin malzemesinin sınıflandırılması için zeminin Atterberg Limitleri belirlenmiştir. Daha sonra dolgu inşaatından numuneler alınarak üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kum ve kırmataş numuneleri üzerinde elek analizi, standart kompaksiyon deneyleri, tek eksenli basınç deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

#### 3.2.1. Atterberg Limitleri

Dolgu inşaatı sırasında alınan numuneler üzerinde deneyler yapılarak Atterberg Limitleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda likit limit %27,2, plastik limit %16,5 ve plastisite indeksi %10,7 olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre yerel zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir. Şekil 3.5 dolgu inşaatında kullanılan zeminin likit limit deneyinden elde edilen sonuçları göstermektedir.



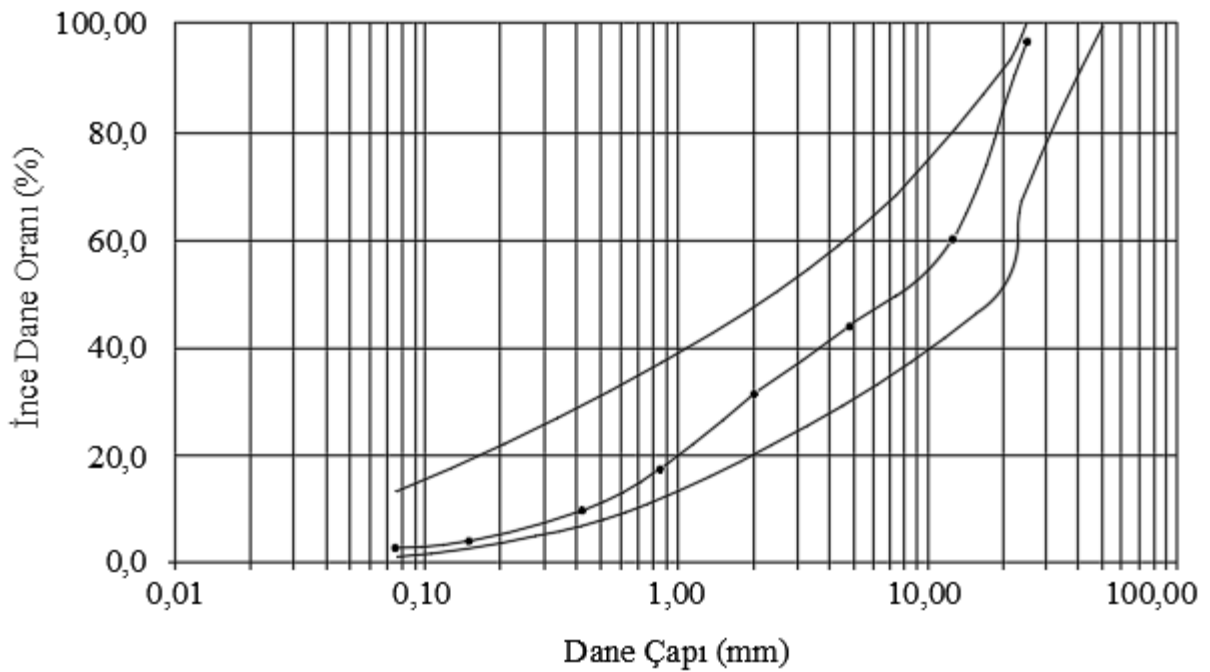
Şekil 3.5. Dolgu inşaatında kullanılan zemine ait likit limit deney sonuçları (Sargand vd., 2002)

### 3.2.2. Elek Analizleri

Kum ve kırmataş numuneleri üzerinde elek analizi deneyleri ve dane çapı dağılımları ASTM D 421 ve ASTM D 422 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Kum geri dolgu malzemesine ait elek analizi sonuçları Çizelge 3.4'te, dane çapı dağılımı eğrisi Şekil 3.6'da verilmiştir. Kırmataş geri dolgu malzemesi için elek analizi sonuçları Çizelge 3.5'te, dane çapı dağılımı eğrisi ise Şekil 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kum geri dolgu malzemesine ait elek analizi sonuçları (Sargand vd., 2002)

Elek No & Elek Açıklığı	Elekte Kalan (gr)	Elekten Geçen (%)
63,5 mm	0	100
25,4 mm	0	100
No 4 – 4,76 mm	0	100
No 40 – 0,420 mm	259	43,62
No 200 – 0,074 mm	191,4	1,96
Toplama Kabı	9	

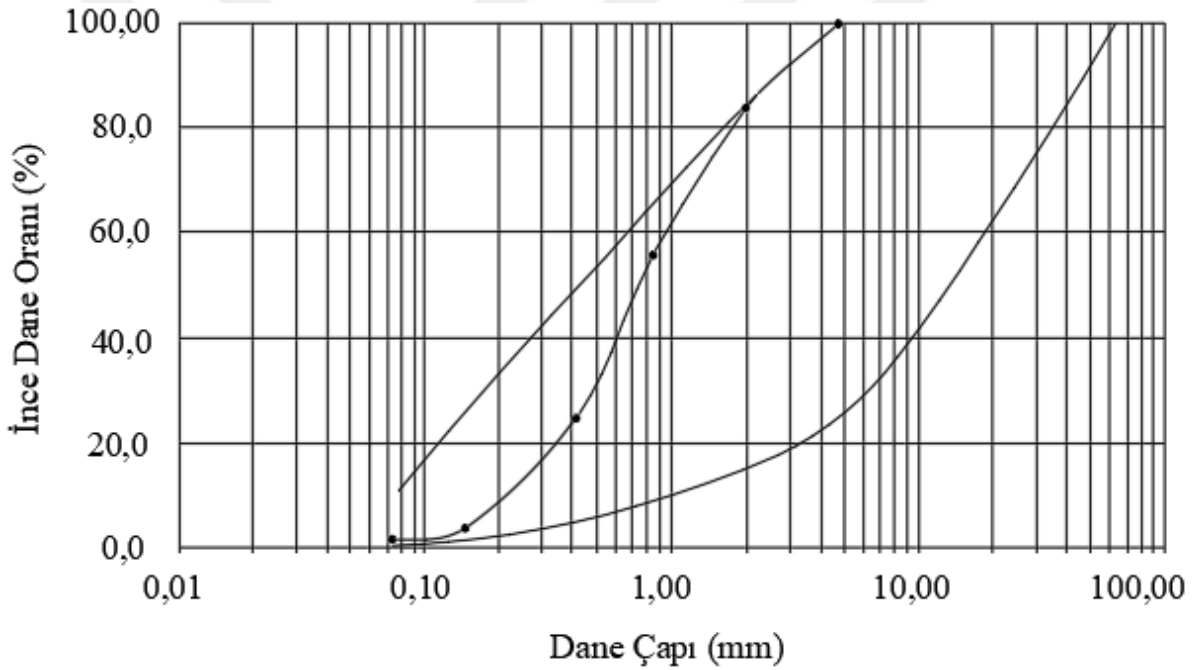


Şekil 3.6. Kum geri dolgu malzemesinin granülometri eğrisi (Sargand vd., 2002)



Çizelge 3.5. Kıırma taş geri dolgu malzemesine ait elek analizi sonuçları (Sargand vd., 2002)

Elek No ve Elek Açıklığı	Elekte Kalan (gr)	Elekten Geçen (%)
50,8 mm	0	100
25,4 mm	19,5	97,96
19,1 mm	70,9	90,54
No 4 – 4,76 mm	418,2	46,76
No 30 – 0,590 mm	308,9	14,42
No 200 – 0,074 mm	89,8	5,02
Toplama Kabı	48	

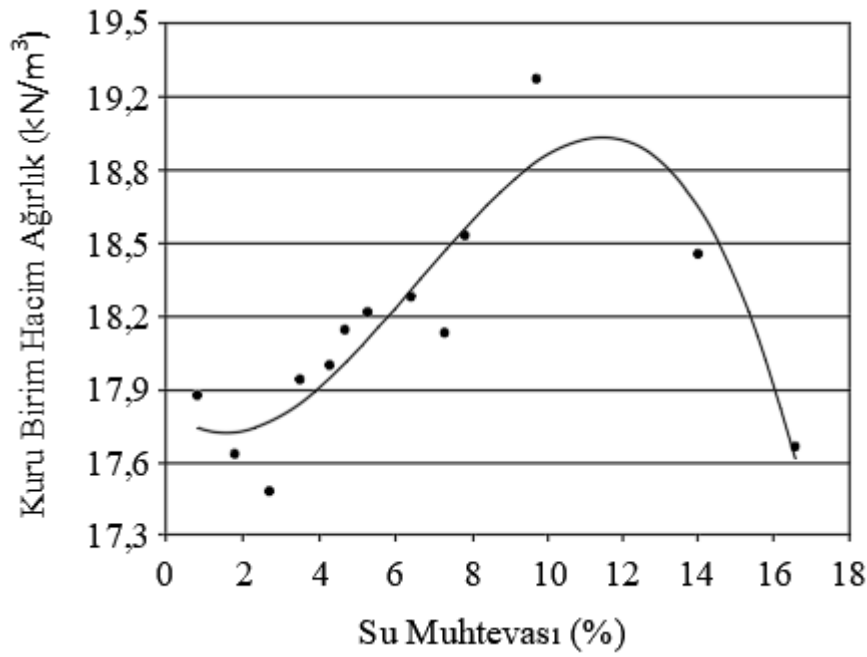


Şekil 3.7. Kıırma taş geri dolgu malzemesinin granülometri eğrisi (Sargand vd., 2002)

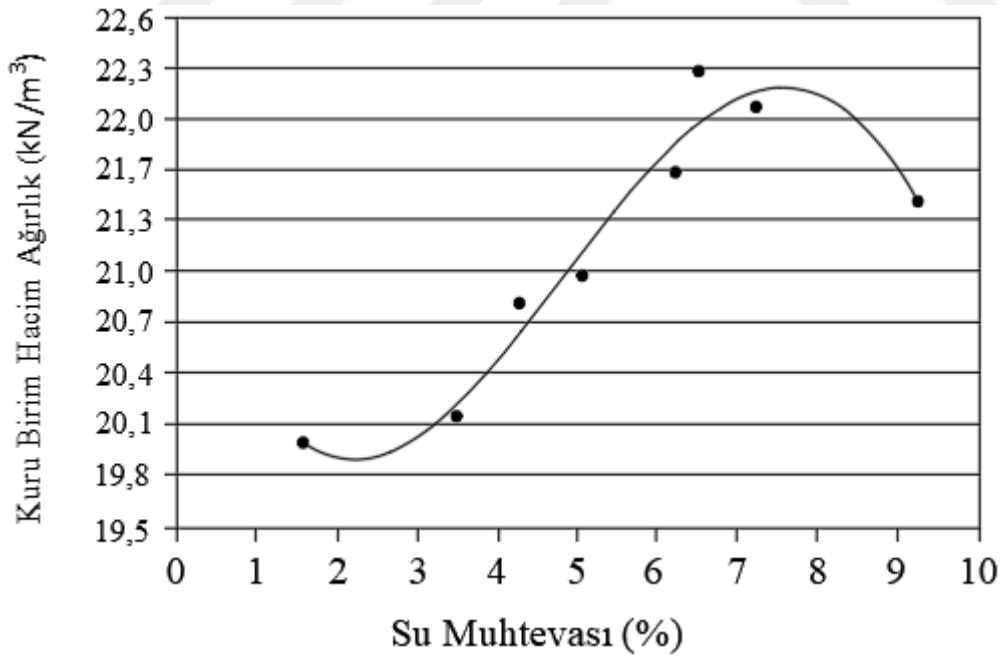
### 3.2.3. Standart Kompaksiyon Deneyleri

Standart kompaksiyon deneyleri geri dolgu olarak kullanılan kum ve kıırma taş numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kum geri dolgu malzemesinin deney sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 3.8’de verilmiştir. Eğriye göre kum geri dolgunun optimum su muhtevası %11,5 maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise  $18,9 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9’da ise kıırma taş geri dolgu malzemesine ait kompaksiyon eğrisi verilmiştir. Buna göre

kırma taş geri dolgu malzemesinin optimum su muhtevası %7,63 maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise  $22,0 \text{ kN/m}^3$  olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. Kum geri dolgu malzemesi için elde edilen kompaksiyon eğrisi (Sargand vd., 2002)



Şekil 3.9. Kırma taş geri dolgu malzemesi için elde edilen kompaksiyon eğrisi (Sargand vd., 2002)

### 3.2.4. Tek Boyutlu Sıkışma Deneyleri

Tek boyutlu sıkışma deneyleri, gömülü esnek boruların Geliştirilmiş Iowa Teorisi ve Elastik Çözümler ile analizlerinde kullanılan tek boyutlu sıkışma modülü değerini elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Tek boyutlu sıkışma deneyleri her iki tür geri dolgu malzemesinin %86, %90 ve %96 relatif kompaksiyon dereceleri için uygulanmıştır. Deney için hazırlanan numuneler standart kompaksiyon deneyi ile aynı yönteme göre hazırlanmıştır. Numuneler üzerindeki yükleme hızı %0,5 deformasyon / dakika olarak uygulanmıştır. Deney sırasında okumalar ilk 2 dakikalık yükleme sırasında her 15 saniyede bir yapılırken 2 dakikadan sonra ise her 30 saniyede bir yapılmıştır. Tek boyutlu sıkışma deneyi sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Tek boyutlu sıkışma deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar (Sargand vd., 2002)

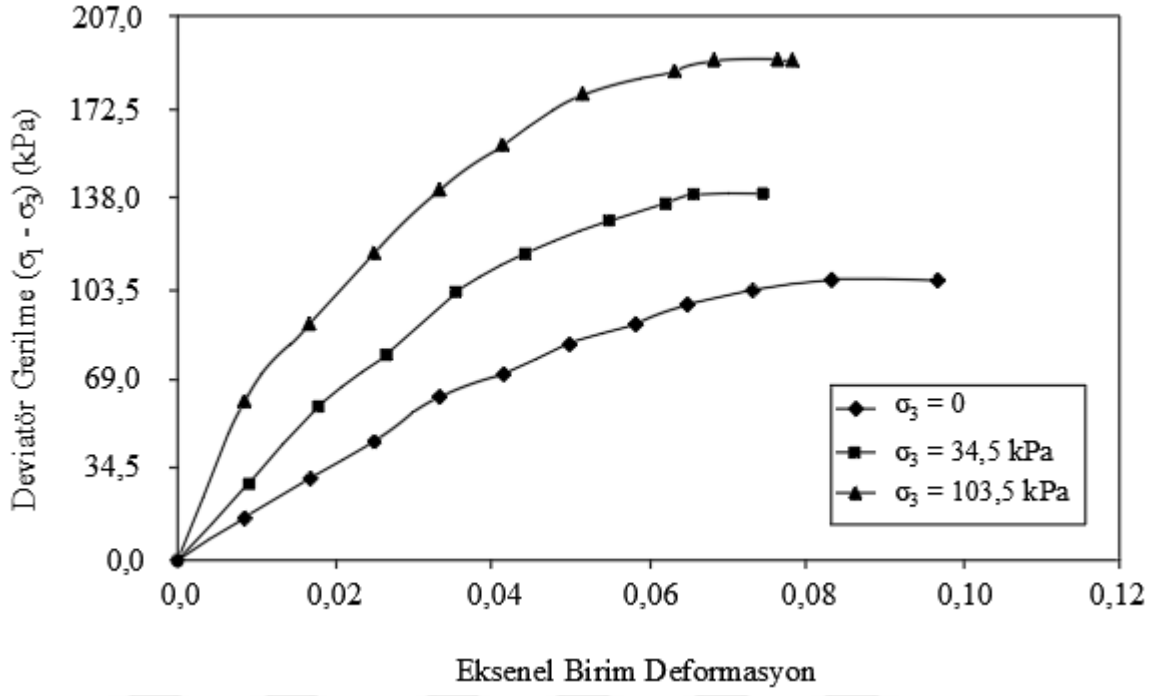
Geri Dolgu Türü	Düşey Gerilme (kPa)	Tek Boyutlu Sıkışma Modülü, $M_s$ (kPa)		
		R.K.* (%86)	R.K.* (%90)	R.K.* (%96)
Kum	<34	8270	10480	13790
	34,5 – 68,9	9650	11380	14820
	69,0 - 103,3	10340	11930	17580
	103,4 - 137,8	10690	12890	24130
Kırma Taş	<34,5	7580	13100	16890
	34,5 – 68,9	12070	15860	17440
	69,0 - 103,3	17580	19370	20550
	103,4 - 137,8	21370	22340	25510
	137,9 – 172,3	25860	26820	28610
	172,4 – 206,8	27580	28340	33100
	206,9 – 241,3	29300	31300	37230

\*Relatif Kompaksiyon

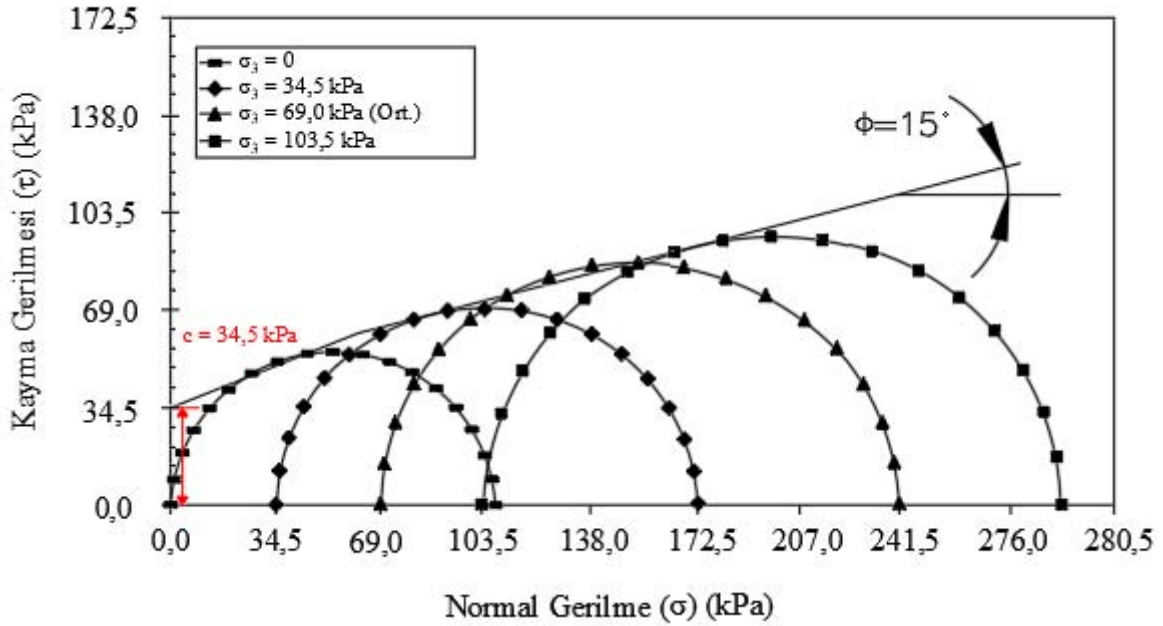
### 3.2.5. Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Esnek borular dayanımını çevresindeki zemin malzemesinden alır. Zemin malzemesinin mukavemeti ise kayma mukavemeti ile ölçülür. Üç eksenli basınç deneyi ile zeminlerin kayma mukavemeti değerleri arazi koşullarındaki gerçek değerlere yakın olarak belirlenebilir. Dolgu inşaatında kullanılan kil malzeme ve geri dolgu olarak kullanılan kum ve kırma taş malzemeler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır.

Kohezyonlu zeminler için konsolidasyonlu – drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri ASTM D 4767 – 88 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Dolgu inşaatında kullanılan kil zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyleri belirtilen standarta göre gerçekleştirilmiştir. Deney için yaklaşık 15 cm yüksekliğinde, 7 cm çapında numuneler hazırlanmıştır. İzotropik konsolidasyon ile numunenin tüm yüzeylerine eşit basınç uygulanmıştır. Kilin sahip olduğu düşük permeabiliteden dolayı bu konsolidasyon 24 saat sürmüştür. Bu süre boyunca drenaj vanaları açık bırakılmıştır. Drenaj vanaları kapatıldıktan sonra deney %2 deformasyon / dakikalık yükleme hızı ile devam etmiştir. Deneylerde 0, 34,5, 69, ve 103,5 kPa çevre basınçları uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen deviator gerilme – aksel birim deformasyon arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3.10’da Mohr daireleri ve göçme zarfını gösteren grafik ise Şekil 3.11’de verilmiştir. Şekil 3.11’deki grafiğe göre kil zemin malzemesinin kohezyon değeri  $c_{cu} = 34,5$  kPa, içsel sürtünme açısı  $\Phi = 15^\circ$  olarak bulunmuştur.



Şekil 3.10. Kil numuneler üzerinde yapılan CU üç eksenli basınç deneylerine göre Deviator gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002)

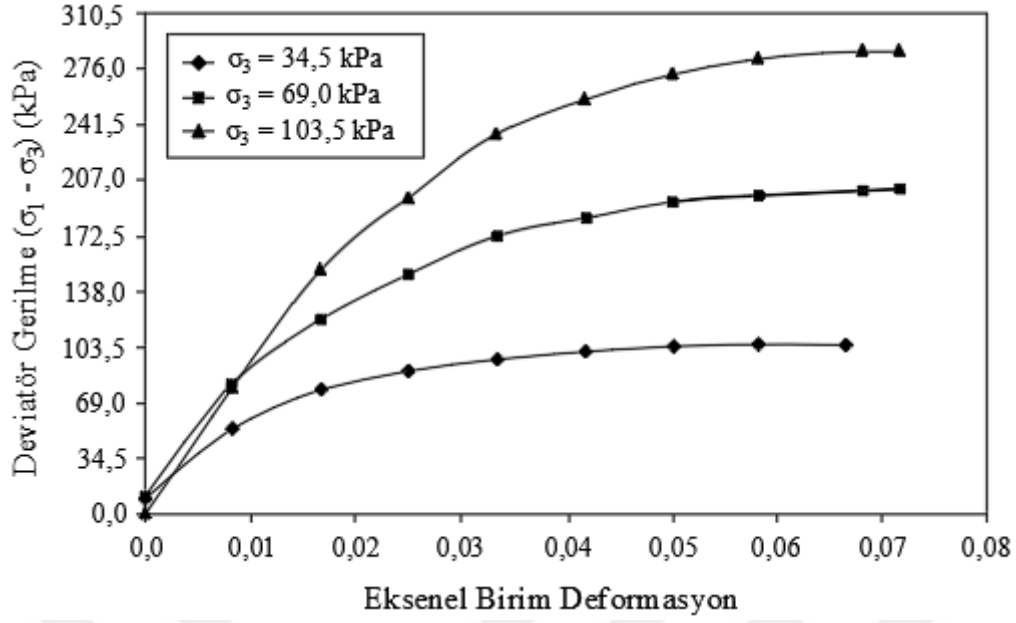


Şekil 3.11. Kil numuneler üzerinde yapılan CU üç eksenli basınç deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

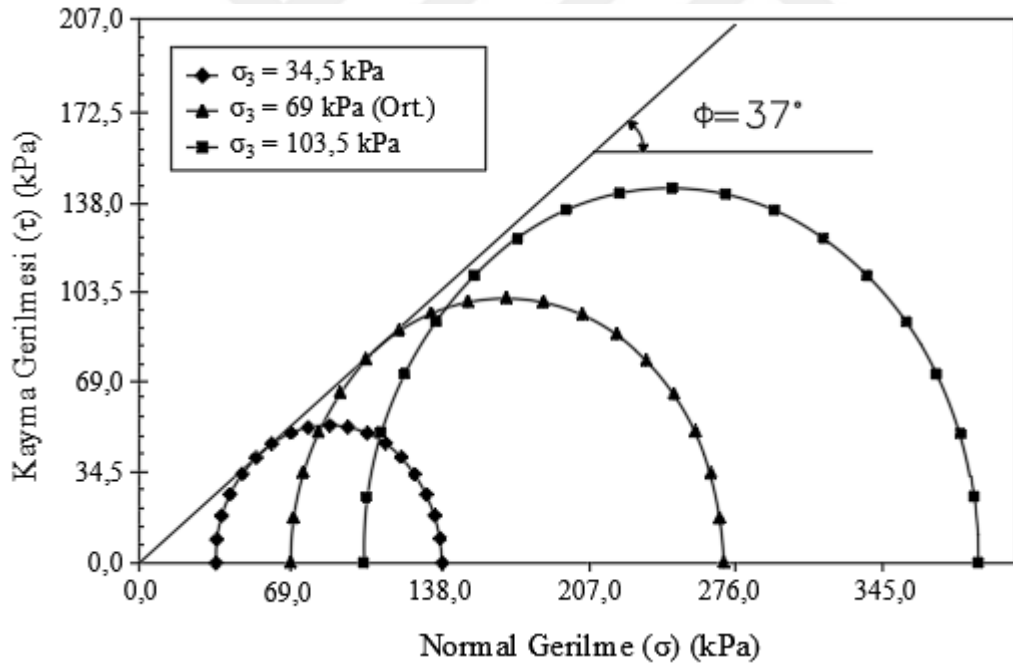
Kum ve kırma taş numuneleri üzerinde konsolidasyonlu – drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır. CD üç eksenli basınç deneyi ile CU üç eksenli basınç deneyinin uygulama yöntemleri benzerdir ancak CD deneyinde CU deneyinden farklı olarak hem hücre basıncı aşamasında hem de eksenel gerilme aşamasında drenaja izin verilmektedir. Bu şekilde deney sırasında hem su hem de havanın deney numunesini terk etmesi sağlanır. Kum ve kırma taş numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler %2,0 deformasyon / dakikalık hızla gerçekleştirilmiştir.

Kum geri dolgu malzemesi ile hazırlanan deney numuneleri 7 cm çapında ve 15 cm yüksekliğinde %86, %90 ve %96 relatif kompaksiyon yüzdelere göre hazırlanmıştır. Deney numuneleri standart kompaksiyon deneyi prosedürlerine göre hazırlanmıştır. Deneyler 34,5 kPa, 69 kPa ve 103,5 kPa çevre basınçları altında gerçekleştirilmiştir.

%86, %90 ve %96 relatif kompaksiyon yüzdesinde hazırlanan kum numuneler üzerinde yapılan CD üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen deviator gerilme – eksenel birim deformasyon arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler ile Mohr daireleri ve göçme zarflarını gösteren grafikler Şekil 3.12 – Şekil 3.17’de verilmiştir.

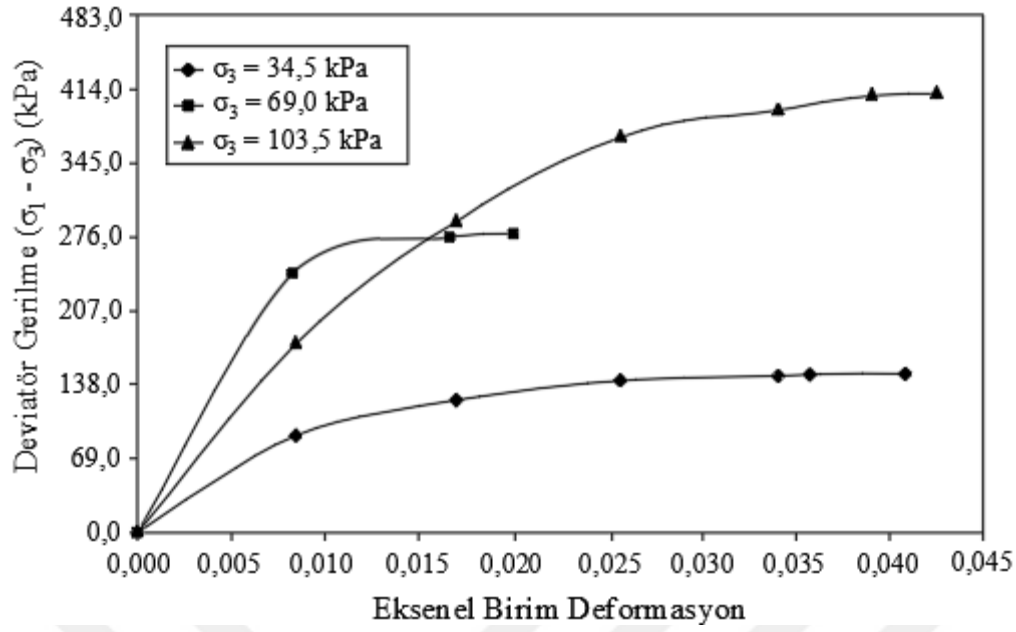


Şekil 3.12. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviator gerilme - Aksel şekil değıştirme grafiği (Sargand vd., 2002)

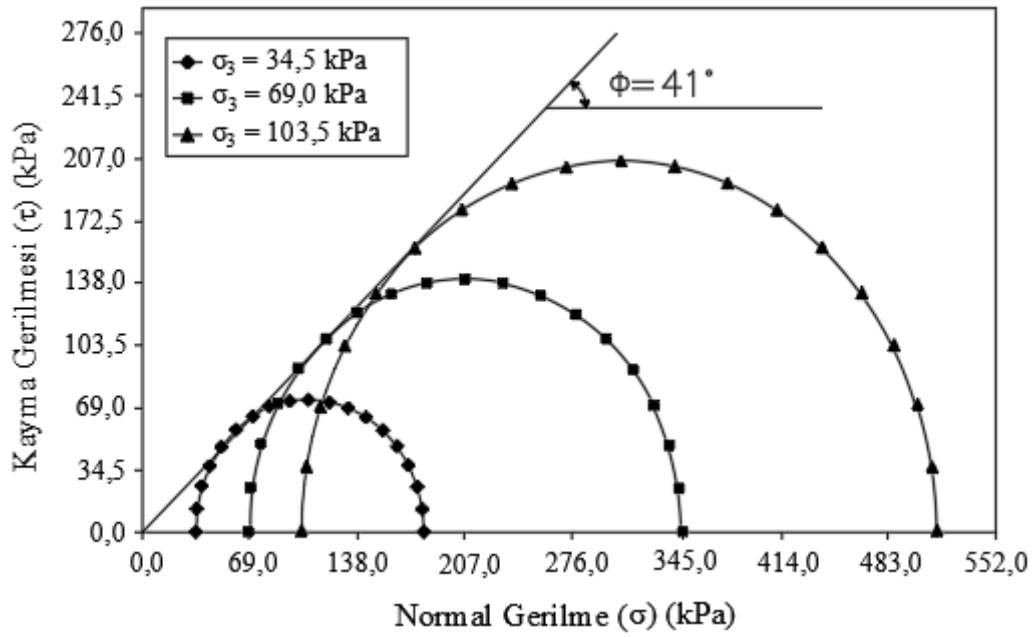


Şekil 3.13. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

Şekil 3.13'te verilen %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numunesi deney sonuçlarına göre zeminin içsel sürtünme açısı  $\Phi = 37^\circ$  olarak belirlenmiştir.



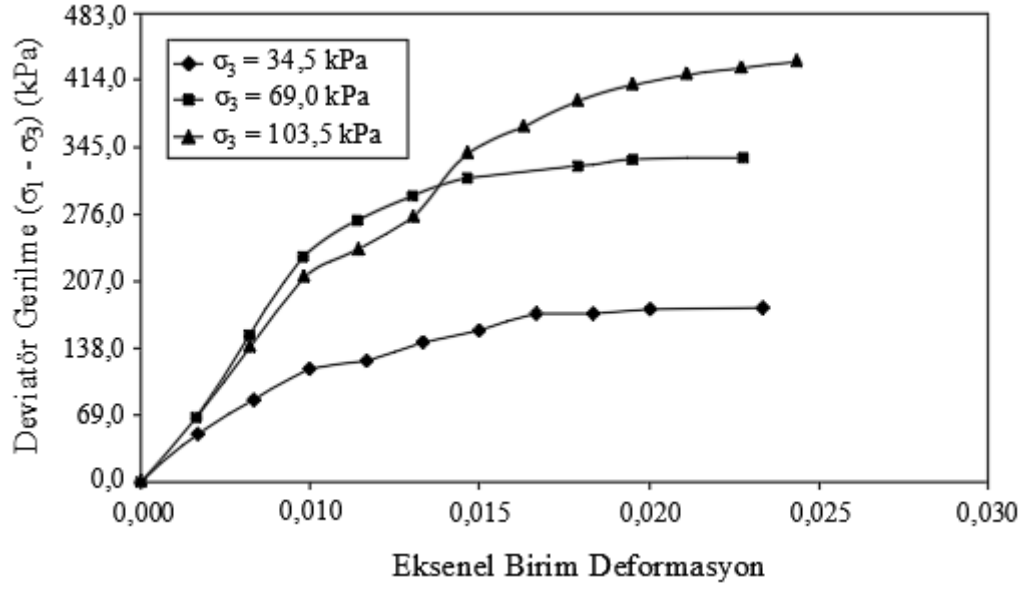
Şekil 3.14. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviator gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002)



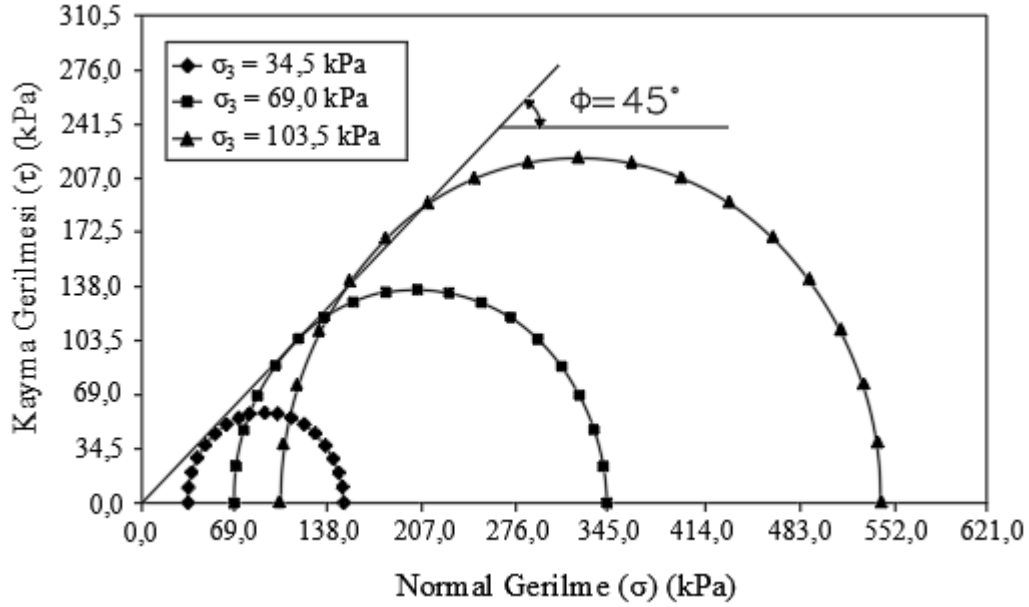
Şekil 3.15. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

Şekil 3.15'te verilen %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numunesi deney sonuçlarına göre zeminin içsel sürtünme açısı  $\Phi = 41^\circ$  olarak belirlenmiştir.





Şekil 3.16. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviyatör gerilme - Eksenel şekil değıştirme grafiği (Sargand vd., 2002)



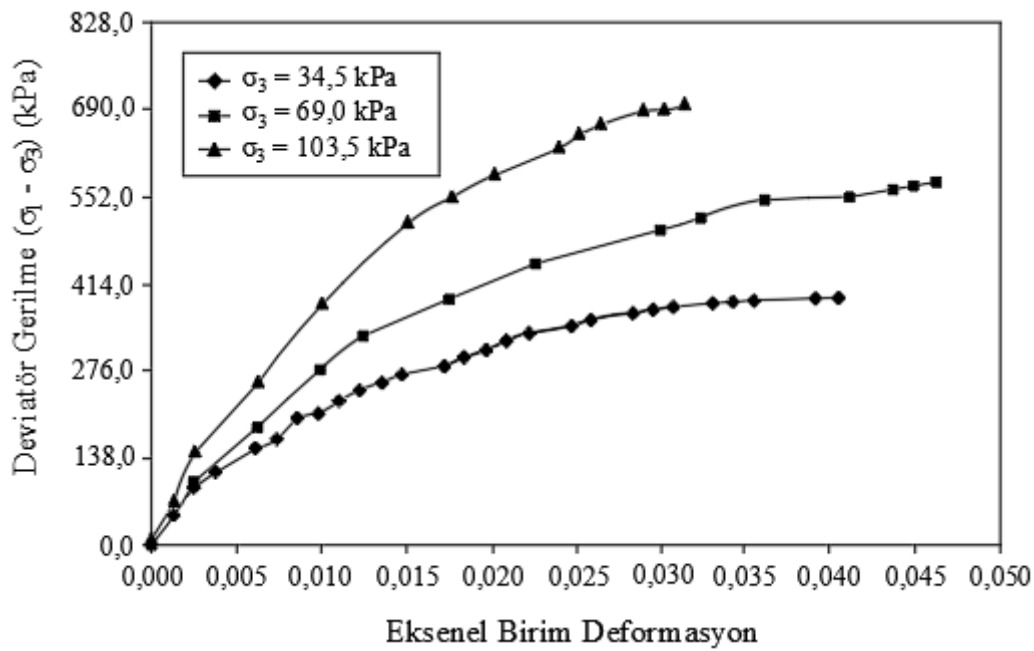
Şekil 3.17. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

Şekil 3.17'de verilen %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kum numunesi deney sonuçlarına göre zeminin içsel sürtünme açısı  $\Phi = 45^\circ$  olarak belirlenmiştir.

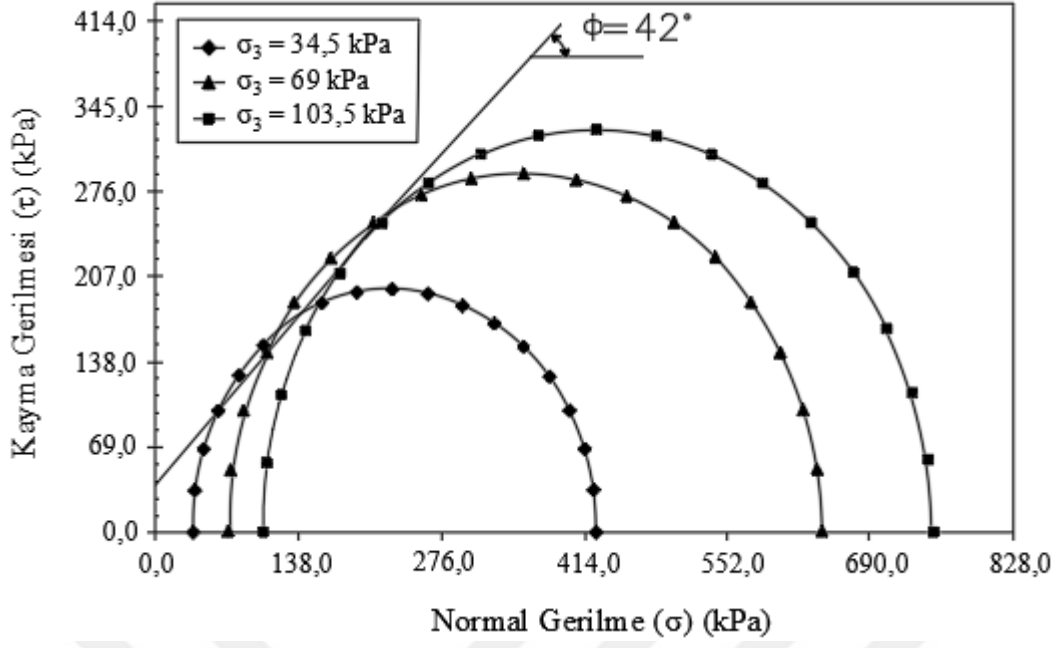
Kum numuneler üzerinde yapılan CD üç eksenli basınç deneyi sonuçları incelendiğinde relatif kompaksiyon yüzdesi arttıkça içsel sürtünme açısının arttığı görülmüştür.

Kırma taş geri dolgu malzemesi üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinde kum numunelerle aynı deney yöntemi uygulanmıştır. %86 relatif kompaksiyon yüzdesinde kırma taş numuneler 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde standart kompaksiyon deney kalıbında hazırlanmıştır. %90 ve %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler ise 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğinde hazırlanmıştır.

%86, %90 ve %96 relatif kompaksiyon yüzdesinde hazırlanan kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen deviator gerilme – aksel birim deformasyon arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler ile Mohr daireleri ve göçme zarflarını gösteren grafikler Şekil 3.18 – Şekil 3.23'te verilmiştir.

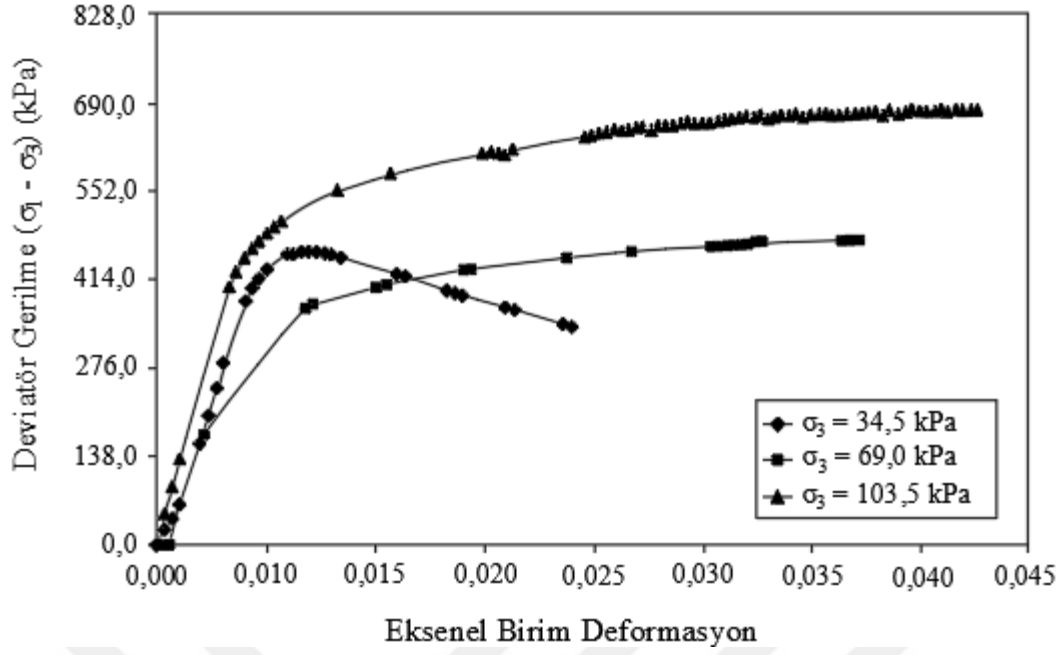


Şekil 3.18. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviator gerilme - Aksel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002)

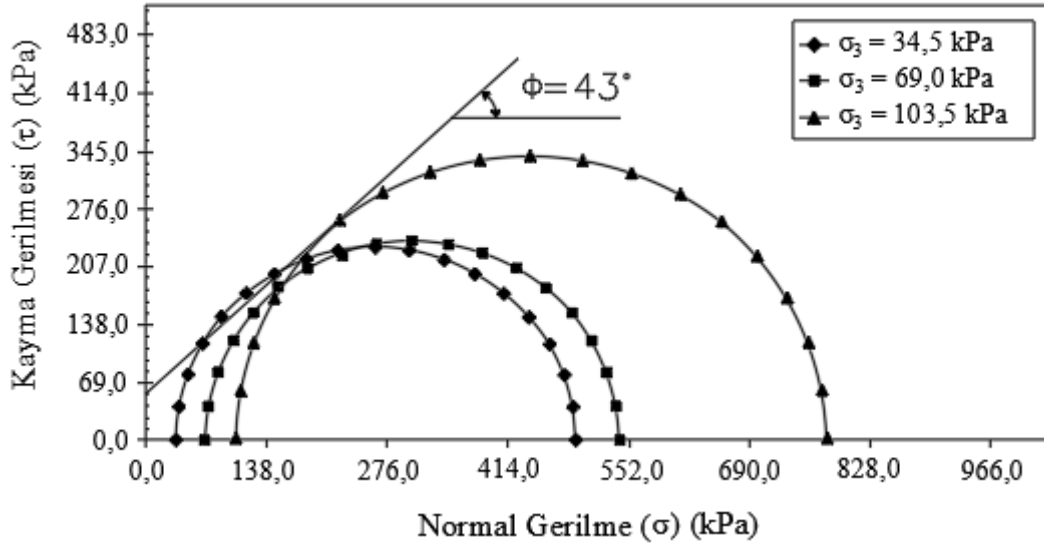


Şekil 3.19. %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

Şekil 3.19'daki grafiğe göre %86 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş zemin malzemesinin kohezyon değeri  $c = 34,5$  kPa, içsel sürtünme açısı  $\Phi = 42^\circ$  olarak belirlenmiştir.

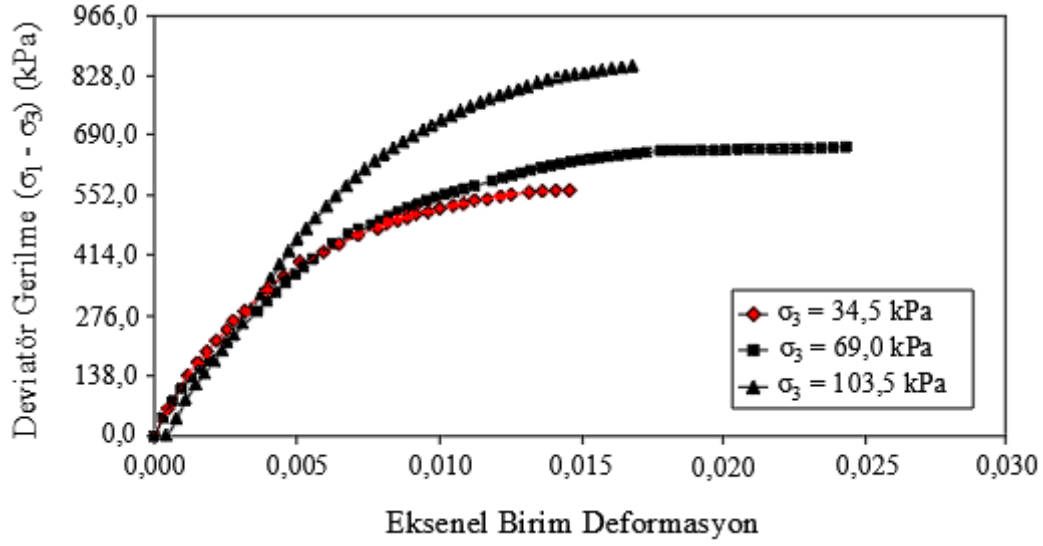


Şekil 3.20. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviyatör gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002)

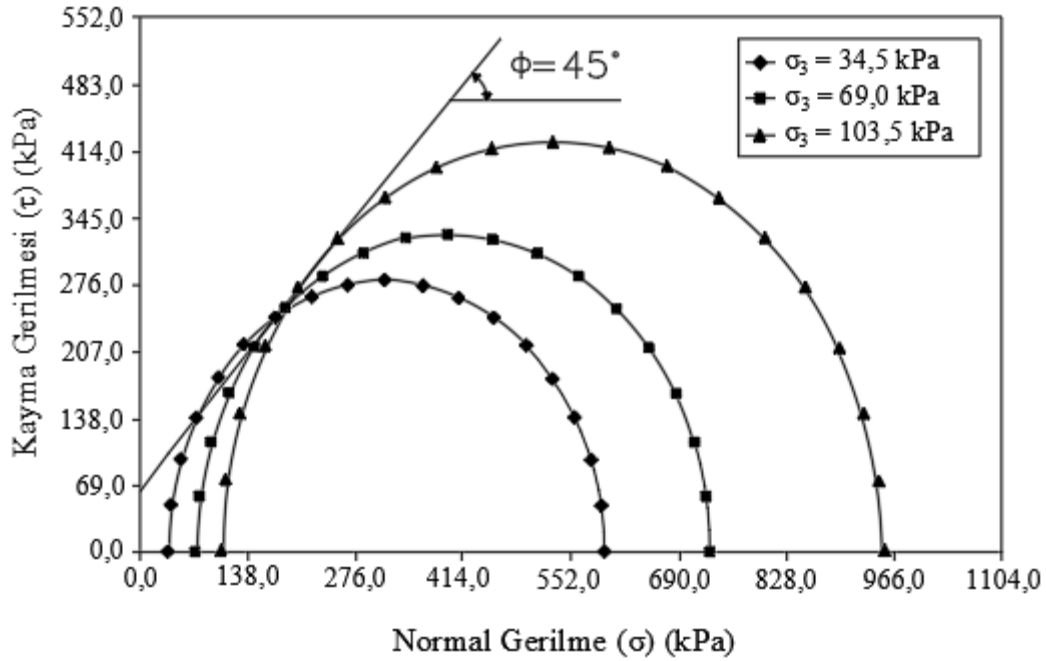


Şekil 3.21. %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

Şekil 3.21'deki grafiğe göre %90 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş zemin malzemesinin kohezyon değeri  $c = 55,2$  kPa, içsel sürtünme açısı  $\Phi = 43^\circ$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.22. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde yapılan CD deneylerine göre Deviator gerilme - Eksenel şekil değiştirme grafiği (Sargand vd., 2002)



Şekil 3.23. %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş numuneler üzerinde CD deneylerine göre elde edilen Mohr daireleri ve göçme zarfı (Sargand vd., 2002)

Şekil 3.23'deki grafiğe göre %96 relatif kompaksiyon yüzdesindeki kırma taş zemin malzemesinin kohezyon değeri  $c = 69$  kPa, içsel sürtünme açısı  $\Phi = 45^\circ$  olarak belirlenmiştir.

Kırma taş geri dolgu malzemesi üzerinde yapılan CD üç eksenli basınç deneyi sonuçları relatif kompaksiyon yüzdesi arttıkça kohezyon değerinin ve içsel sürtünme açısının arttığını göstermiştir.

### **3.3. Boruların ve Zeminlerin Enstrümantasyonu**

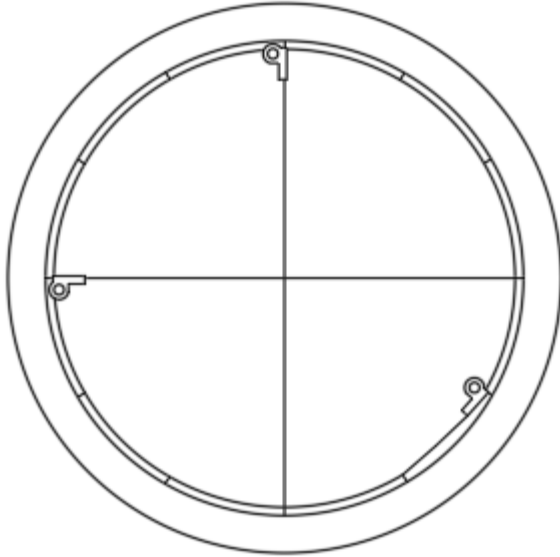
#### **3.3.1. Lineer Potansiyometreler**

Boru üzerinde yapılan enstrümantasyon ile boruda meydana gelen şekil değiştirmeler ve çembersel kısaltmalar ölçülürken zeminde yapılan enstrümantasyon ile zemin içerisinde oluşan gerilmeler belirlenir. Deney kapsamında borular ve çevresindeki zeminlerde bir dizi enstrümantasyon yapılmıştır. Enstrümantasyon için gerinim ölçer, lineer potansiyometre, lazer profilometre ve basınç hücresi sensörleri kullanılmıştır.

Boruda meydana gelen yatay ve düşey çap değişiminin ölçülmesi ile çembersel kısaltmanın belirlenmesi için lineer potansiyometreler kullanılmıştır. Lineer potansiyometrelerin kurulumunu sağlamak için boru iç yüzeyine küçük cıvatalar yapıştırılmıştır. Lineer potansiyometreler bu cıvatalara yerleştirildikten sonra potansiyometrelerin teli uzatılarak karşısındaki cıvataya bağlanmıştır. Düşey ekseninde boru tacındaki cıvataya yerleştirilen potansiyometrenin teli uzatılarak boru tabanındaki cıvataya bağlanmıştır. Yatay eksenindeki şekil değiştirme ölçülürken ise yan duvardaki cıvataya yerleştirilen potansiyometrenin teli uzatılıp karşı duvardaki cıvataya bağlanmıştır. Boruda meydana gelen çembersel kısaltmayı ölçmek için bir potansiyometre daha monte edilmiştir. Bu potansiyometrenin teli boru iç yüzeyine yapıştırılmış 12 küçük cıvadan geçerek başlangıç konumundaki cıvataya bağlanmıştır. Boru iç yüzeyine monte edilmiş lineer potansiyometrelerin yerleşim planı Şekil 3.24’de verilmiştir.

#### **3.3.2. Lazer Profilometre**

Deneyde kullanılan boruların kesitlerinde meydana gelen şekil değiştirmeleri belirlemek için lazer profilometre kullanılmıştır. Lazer profilometre boru içlerine kurulabilecek kadar portatif bir alettir. Bu sistemle dolgu kalınlığının 1,22 m, 3,05 m, 6,1 m ve 12,2 m olduğu anlarda 124 noktadan veriler alınarak boru kesitlerinde meydana gelen şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Boru içerisindeki lazer profilometrenin görünümü Şekil 3.25’te verilmiştir.



— Lineer Potansiyometre

Şekil 3.24. Lineer potansiyometrelerin yerleşim planı (Sargand vd., 2002)

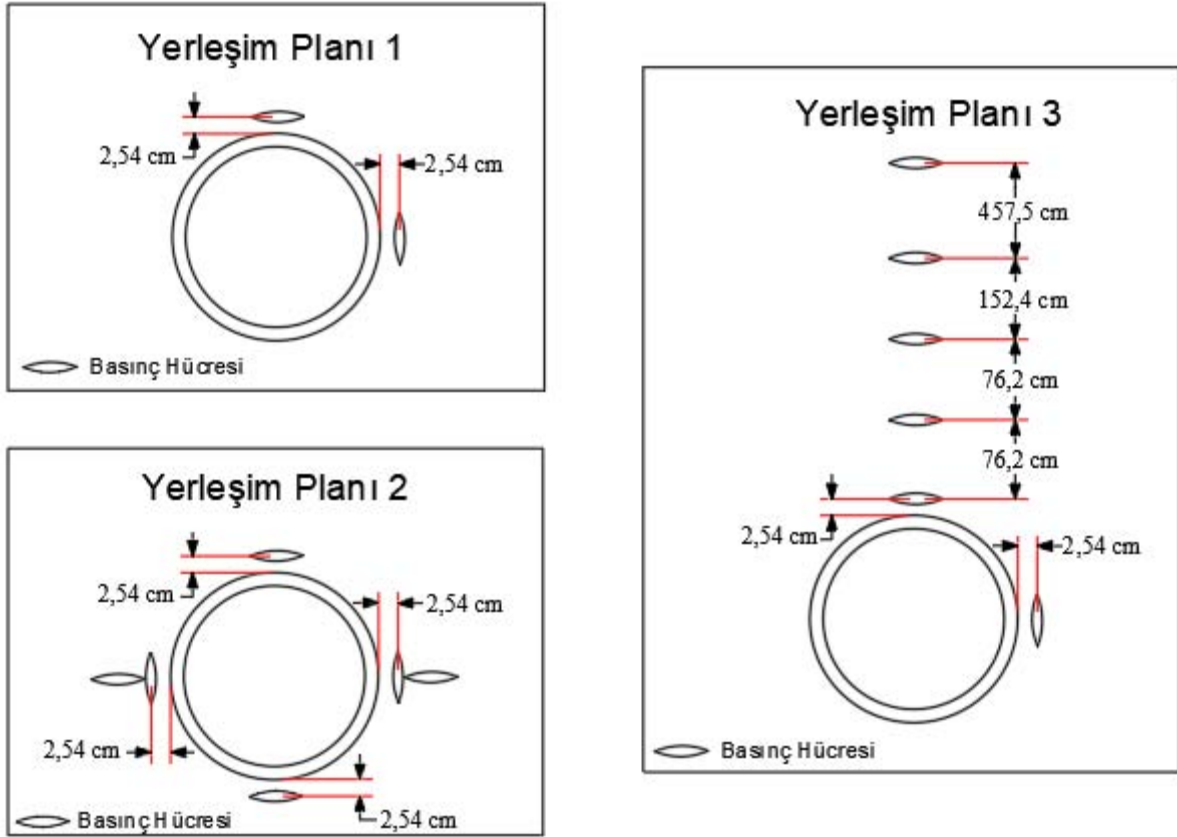


Şekil 3.25. Boru içerisindeki lazer profilometrenin görünümü (Sargand ve Masada, 2007)

### 3.3.3. Toprak Basıncı Hücreleri

Boru etrafında oluşacak toprak basınçlarının ölçümü için geri dolgu sırasında toprak basıncı hücreleri zemin içerisine yerleştirilmiştir. Basıncı hücreleri boru dış yüzeyinden en az

2,54 cm uzağa yerleştirilmiştir. Basınç hücrelerinin yerleşimi için Şekil 3.26’da verildiği gibi 3 farklı plan hazırlanmıştır. Bu plana göre basınç hücreleri 2 ve 11 numaralı boru gömülme ortamlarında 2 numaralı yerleşim planına göre; 5 ve 8 numaralı boru gömülme ortamlarında 3 numaralı yerleşim planına göre; diğer boruların gömülme ortamlarında ise 1 numaralı yerleşim planına göre yerleştirilmiştir.

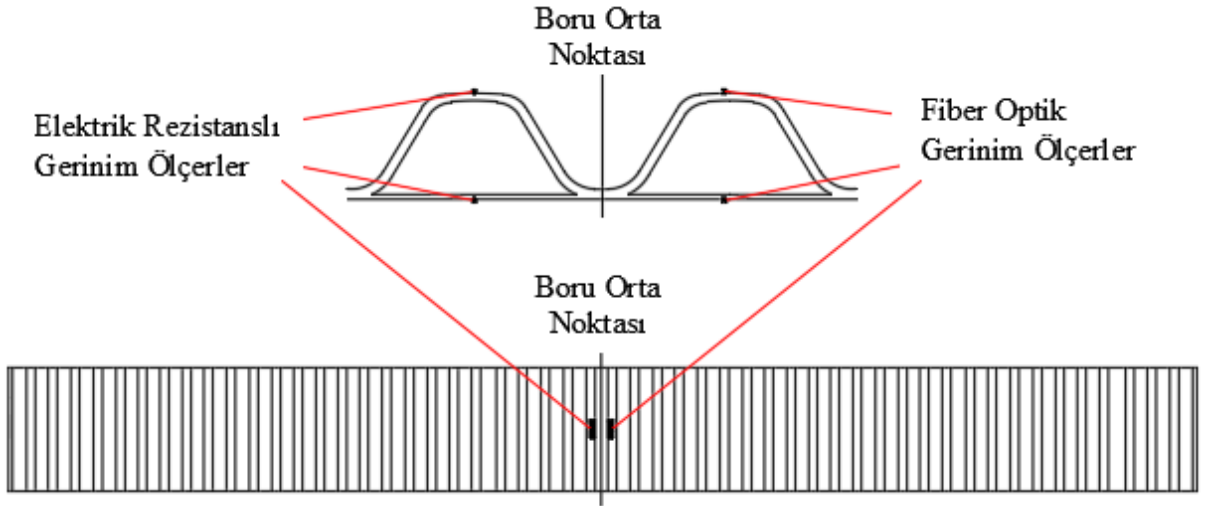


Şekil 3.26. Basınç hücrelerinin yerleşim planı (Moran, 2001)

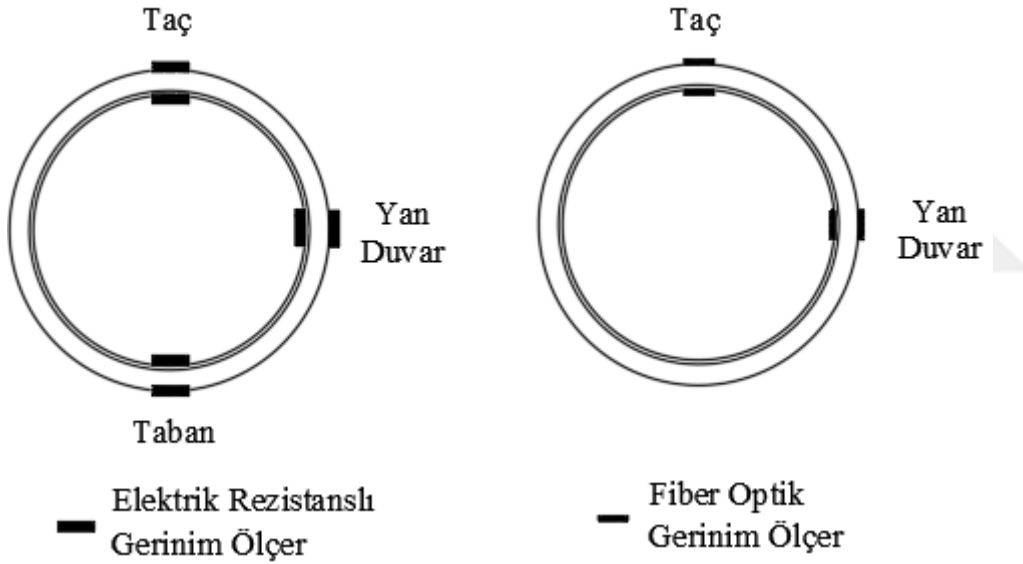
### 3.3.4. Gerinim Ölçerler

Boruların duvar yüzeyinde meydana gelen gerinimleri ölçmek için elektrik rezistanslı gerinim ölçerler ve fiber optik gerinim ölçerler kullanılmıştır. Fiber optik gerinim ölçerler elektrik rezistanslı gerinim ölçerlere destek amaçlı kullanılmıştır. Borunun orta uzunluğundaki komşu iki koruge kesitin iç ve dış yüzeylerine gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Şekil 3.27’de görüldüğü gibi bu kesitlerden ilkinde elektrik rezistanslı gerinim ölçerler, ikincisine ise fiber optik gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Şekil 3.28’de görüldüğü gibi gerinim ölçerler borunun taç, taban ve yan duvarlardan birisi olmak üzere 3 bölüme yerleştirilmiştir.





Şekil 3.27. Gerinim ölçerlerin koruge kesitlerindeki yerleşimi (Sargand vd., 2002)



Şekil 3.28. Gerinim ölçerlerin boru üzerindeki konumları (Sargand vd., 2002)

### 3.4. Geri Dolgu İşlemi ve Dolgu İnşaatı

Boruların hendek içine gömülmesi ve geri dolgunun yerleştirilmesi ODOT (Ohio Ulaştırma Bakanlığı)' un teknik şartnamesi Madde 603.03'e göre yapılmıştır. Deney sırasında bu şartnameye uyularak yapılan işlemler aşağıda verilmiştir.

- Boruların gömüldüğü hendek genişliği boru dış çapının iki katı olacak şekilde açılmıştır. Ayrıca hendek duvarları mümkün olduğunca dik açılmıştır.

- Boru 1'den Boru 12'ye kadar olan boruların granüler malzemeden oluşan yatak kalınlığı boru uzunluğu boyunca 152,4 mm'dir, Boru 13'den Boru 18'e kadar olan boruların yatak kalınlığı ise boru uzunluğu boyunca değişen değerler almıştır.
- Boruların yerleştirildiği yatağın boru altında kalan 1/3'lük bölümüne kompaksiyon işlemi uygulanmamıştır. Yanlarda kalan 1/3'lük bölümlere ise kompaksiyon işlemi uygulanmıştır.
- Geri dolgu malzemesi hendek içerisine 152,4 mm veya 203,2 mm kalınlıklarında tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Yerleştirilen tabakalar titreşimli plaka kompaktör ile sıkıştırılmıştır. Her tabakadan alınan numuneler ile tabakaların su muhtevaları ve birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir.
- Geri dolgu tabakalarının yerleştirilmesi boru taç düzeyinin 30,5 cm üzerine kadar devam etmiştir.

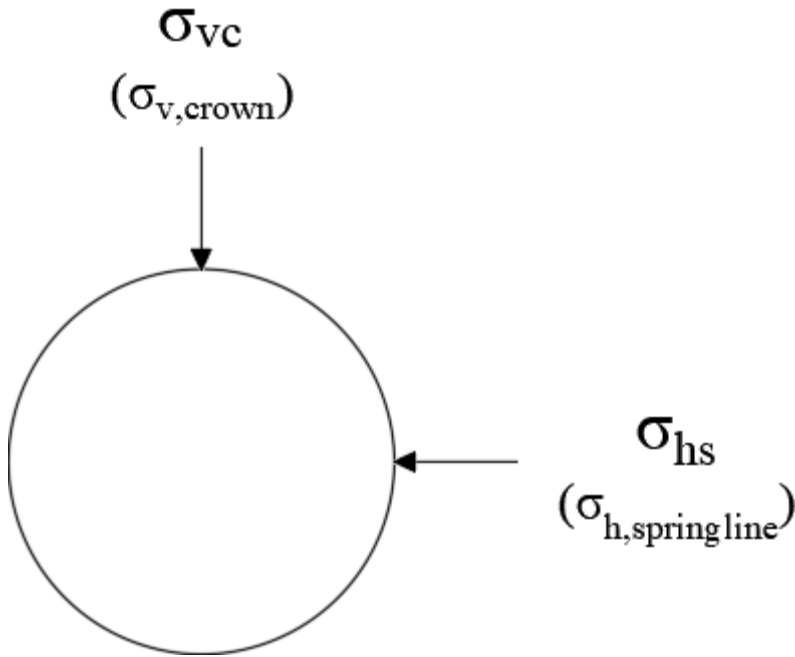
Geri dolgu yerleşimin borulara göre tamamlandığı tarihler Çizelge 3.7'de verilirken her bir boru için geri dolgu yerleşim profili Ekler içerisinde yer alan Geri Dolgu Profilleri bölümündeki görseller ile verilmiştir.

Çizelge 3.7. Geri dolgu işleminin borulara göre tamamlanma tarihleri (Sargand vd., 2002)

<b>Boru No.</b>	<b>Boru Dolgu İşleminin Gerçekleştirildiği Tarih</b>
16, 17, 18	6 – 18 Ekim 1999
13, 14, 15	20 – 27 Ekim 1999
10, 11, 12	29 Ekim – 5 Kasım 1999
7, 8, 9	8 – 11 Kasım 1999
4, 5, 6	15 – 17 Kasım 1999
1, 2, 3	22 – 23 Kasım 1999

Geri dolgu işleminin tamamlanmasıyla dolgu inşasına başlanmıştır. Dolgu malzemesi 0,61 m kalınlığındaki tabakalarla yerleştirilip keçi ayaklı silindirle sıkıştırılmıştır. Keçi ayaklı silindir dolgu inşaatının ilk 0,92 m kalınlığının hafif ağırlıklı inşa ekipmanı ile sıkıştırılmasının ardından dolgu üzerinde kullanılmaya başlanmıştır. Dolgu inşaatı yapım aşamalarının tamamlanma tarihleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Deney sonucunda boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve yan duvara etki eden yanal gerilmeler ile borunun yaptığı düşey ve yatay şekil değiştirmeler her bir boru için Ekler içerisinde yer alan Arazi Deneyi Verileri bölümündeki çizelgelerde verilmiştir. Çizelgelerde dolgu yüksekliği bölümünde eksi ifadeli yükseklikler geri dolgu seviyelerini, artı yükseklikler ise dolgu inşaatının seviyelerini belirtmektedir. Ayrıca çizelgelerde belirtilen  $\sigma_{vc}$  borunun taç bölgesine etki eden gerilmeyi,  $\sigma_{hs}$  ise boru yan duvarına etki eden gerilmeyi ifade etmektedir ve bu ifadelerin boru üzerindeki konumları Şekil 3.29’da verilmiştir.



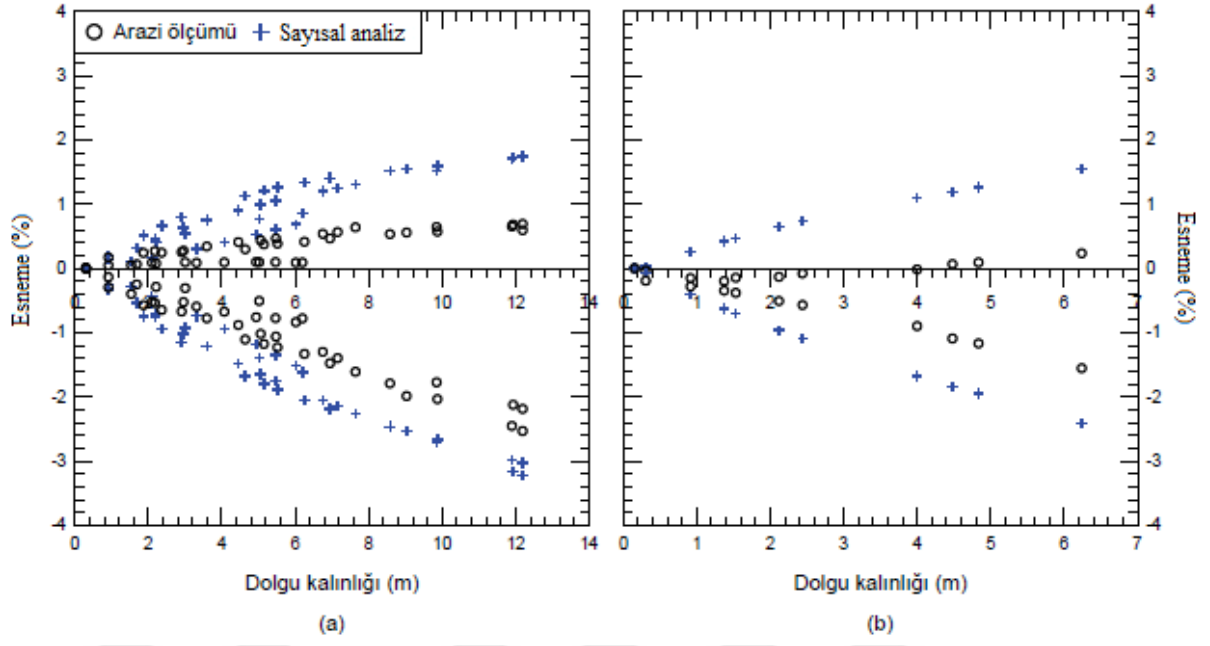
Şekil 3.29. Deney sonuçlarında verilen boru üzerine etki eden gerilmeler

Çizelge 3.8. Dolgu inşaatı yapım aşamalarının tamamlanma tarihleri (Sargand vd., 2002)

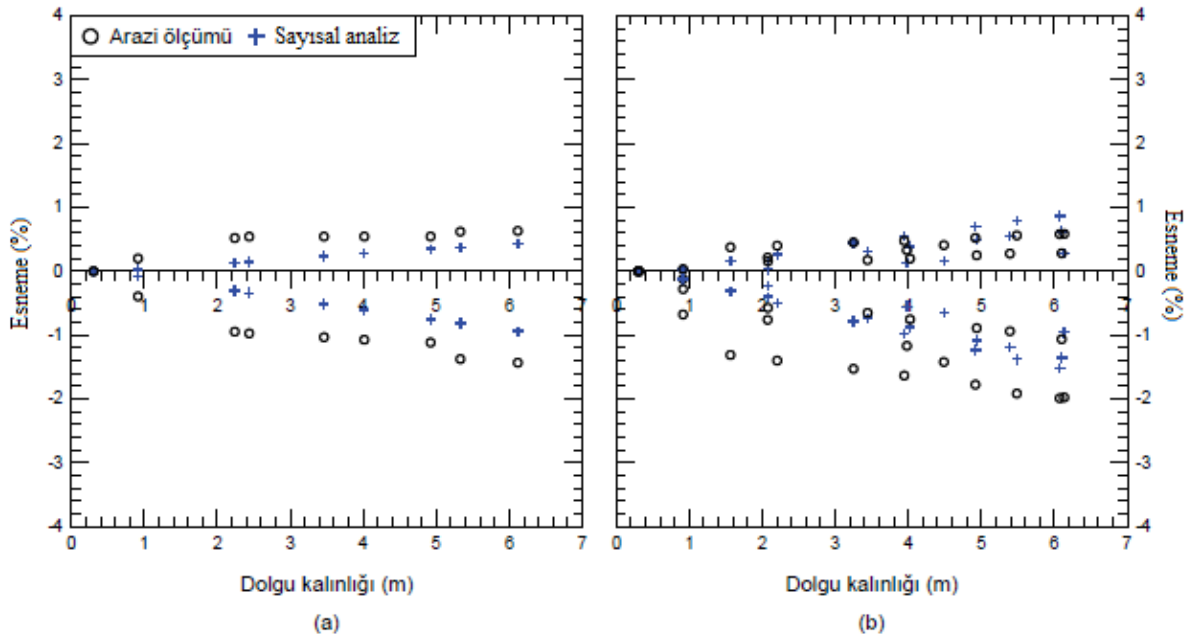
<b>Dolgu Kalınlığı (m)</b>	<b>Tamamlanma Tarihi (Gün/Ay/Yıl – Saat)</b>
0,92	30 Kasım 1999 – 14.00
1,37	8 Aralık 1999 – 02.30
1,83	8 Aralık 1999 – 15.30
2,29	9 Aralık 1999 – 02.30
2,44	9 Aralık 1999 – 16.30
2,90	10 Aralık 1999 – 02.30
3,05	15 Aralık 1999 – 16.30
3,36	16 Aralık 1999 – 02.30
3,66	16 Aralık 1999 – 16.30
3,97	17 Aralık 1999 – 02.30
4,27	17 Aralık 1999 – 14.30
4,42	18 Aralık 1999 – 02.30
5,19	21 Aralık 1999 – 02.30
5,49	21 Aralık 1999 – 15.30
6,10	22 Aralık 1999 – 10.00
6,71	22 Aralık 1999 – 16.00
7,02	23 Aralık 1999 – 02.30
8,54	24 Aralık 1999 – 02.30
8,85	24 Aralık 1999 – 00.00
9,76	27 Aralık 1999 – 15.30
11,59	28 Aralık 1999 – 02.30
12,20	28 Aralık 1999 – 03.00

Detayları verilen Derin G6m6 Projesi'ne ait veriler Kılıç ve Akınay (2019) tarafından kullanılarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada dolgu malzemesinin, dolgu malzemesinin yerleşiminin ve boru 6zelliklerinin bu borularda meydana gelen Şekil değiştirmeler 6zerindeki etkileri incelenmiştir. Kılıç ve Akınay'ın (2019) alışması arazi deneyinden elde edilen sonuçlarla, ampirik yaklaşımlarla belirlenen ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını temel almaktadır. Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de sayısal analizlerden elde edilen Şekil değiştirme değerleri ile arazi deneyinden elde edilen Şekil değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.30'da kum geri dolguda r6latif kompaksiyon değişiminin etkisi, Şekil 3.31'de ise kırmataş geri dolguda r6latif kompaksiyon değişiminin etkisi verilmiştir.

Kum geri dolguyla ilgili grafikler incelendiğinde arazi deneyinde elde edilen Şekil değiştirme oranlarının sayısal analizlerde elde edilen Şekil değiştirme oranlarının altında olduğu g6r6lm6řt6r. Bunun nedeni olarak sayısal analizlerde kullanılan kum malzeme parametrelerinin arazi deneyini tam olarak yansıtmadığı belirtilmiştir. Kırmataş geri dolguda ise yerleşim kalitesinin y6ksek olduğu yani r6latif kompaksiyonun %96 olduğu durumda sayısal analizlerden elde edilen değerler arazi deneyinden elde edilen değerlerden k66k olduğu g6r6lm6řt6r. R6latif kompaksiyonun d6ř6k olduğu durumda (R.K. %86 - %90) ise sayısal analizler ve arazi deneyinden elde edilen Şekil değiştirme oranlarının oldukça uyumlu olduğu g6r6lm6řt6r.



Şekil 3.30. Farklı rölatif kompaksiyon değerlerinde kum zemin malzemesinin kullanımı ile arazide ölçülen ve sayısal analizlerden belirlenen şekil değıştirme oranları a) %96 rölatif kompaksiyon b) %90 rölatif kompaksiyon (Kılıç ve Akınay, 2019)



Şekil 3.31. Farklı rölatif kompaksiyon değerlerinde kırmataş zemin malzemesinin kullanımı ile arazide ölçülen ve sayısal analizlerden belirlenen şekil değıştirme oranları a) %96 rölatif kompaksiyon b) %90 - %86 rölatif kompaksiyon (Kılıç ve Akınay, 2019)

#### 4. DERİN GÖMÜ PROJESİ'NİN PLAXIS 2D PROGRAMI İLE MODELLENMESİ

Bölüm 3'te detaylı olarak bahsedilen Derin Gömü Projesi Plaxis 2D programı ile modellenmiş ve sonlu elemanlar sayısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak Ekler bölümü içerisinde yer alan Arazi Deneyi Verileri bölümündeki çizelgelerde verilen arazi deneyine ait gerilme ve şekil değiştirme değerlerini sayısal analiz uygulamalarında elde edebilmek için kalibrasyon yapılmıştır. Daha sonra ise kalibrasyon yapılan modeller üzerine farklı EPS geofoam geometrileri eklenerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Plaxis programı geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan karmaşık problemleri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözümlenmesini sağlamak için geliştirilmiş bir programdır. Plaxis 2D programı ile 2 boyutlu olarak yapı – zemin ilişkisi, zeminlerde meydana gelecek deformasyonların belirlenmesi, kazık davranışları, temeller ve tünel uygulamaları gibi geoteknik mühendisliğinin ilgi alanına giren birçok problemlerin modellenmesi ve çözümü yapılır. Çalışmada boru – zemin – EPS ilişkisinin modellenmesi ve çözümlenmesi için ‘‘Plaxis 2D 2020 CONNECT Edition’’ sürümü kullanılmıştır.

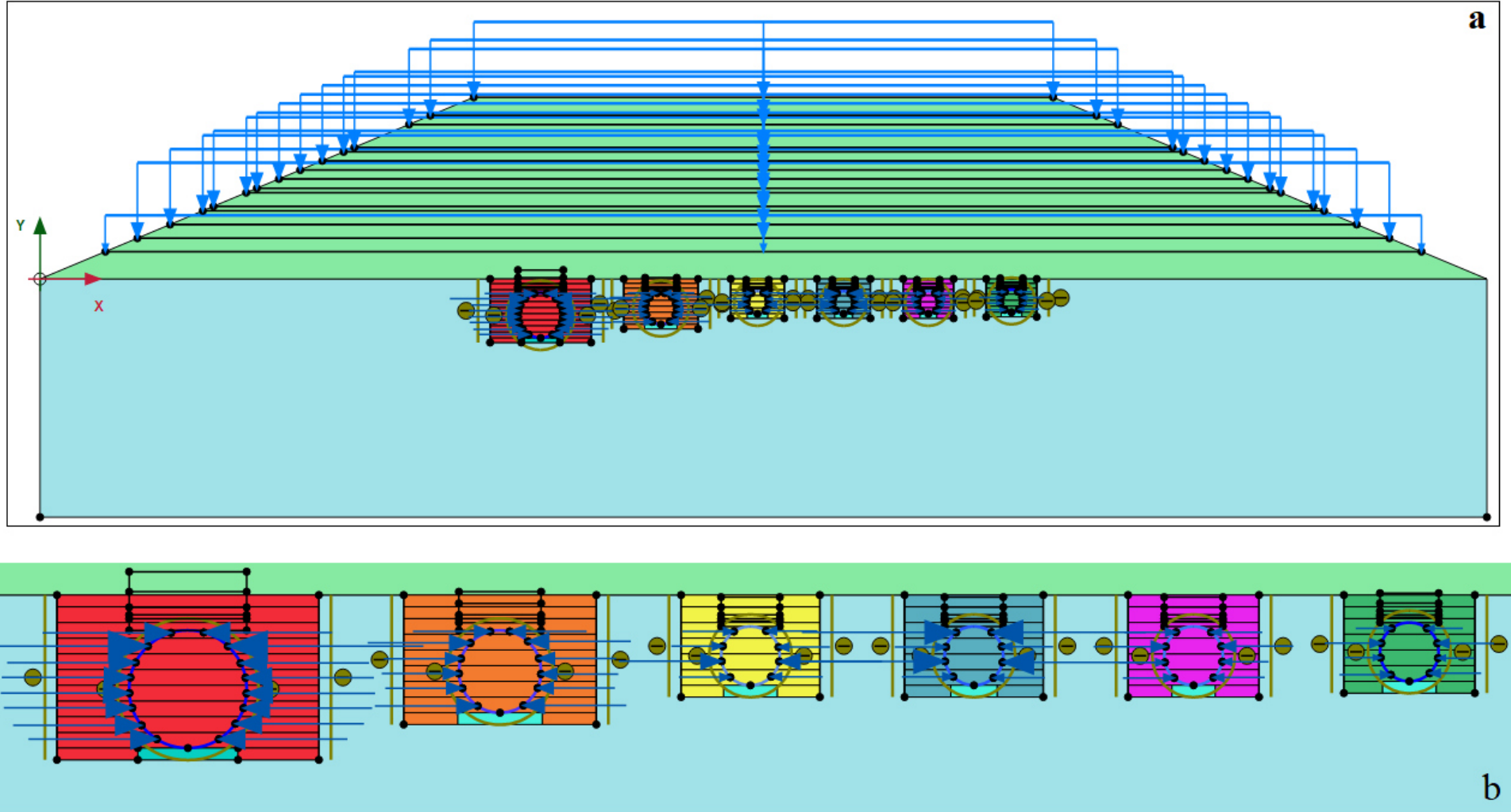
Şekil 3.2'de görüldüğü gibi A-A', B-B' ve C-C' olarak ifade edilen üç adet geometri kesiti belirlenmiştir. A-A' kesitinde yer alan 1, 4, 7, 10, 13 ve 16 numaralı boruların üzerinde 6,1 m yüksekliğinde, B-B' kesitinde yer alan 2, 5, 8, 11, 14 ve 17 numaralı boruların üzerinde 12,2 m yüksekliğinde ve C-C' kesitinde yer alan 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 numaralı boruların üzerinde ise 6,1m yüksekliğinde dolgu yer almaktadır. Model geometrileri 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar ile oluşturulmuştur. Sonlu eleman ağı için ise orta (medium) aralıklar seçilmiştir.

Arazi deneyleri gerçekleştirilirken boru etrafına yerleştirilen geri dolgu tabaka tabaka yerleştirilirken kompaksiyon işlemi uygulanmıştır. Kompaksiyon işleminin boru üzerindeki etkisini yansıtabilmek için boru üzerine noktasal yükler uygulanmıştır. Bu sayede geri dolgu aşamasında boruların yaptığı şekil değiştirme daha gerçekçi bir şekilde yakalanmıştır. Noktasal yüklerin büyüklüğü relatif kompaksiyon değerleri de dikkate alınarak deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Boru yan duvarlarına etkiyen yükler Çizelge 3.1'de yer almaktadır. Bununla birlikte dolgu zemini de sıkıştırılarak yerleştirildiği için ilk dolgu tabakasında 6 kN/m, diğer dolgu tabakalarında ise 12.5 kN/m yayılı yük uygulanmıştır. Plaxis 2D programında A-A', B-B' ve C-C' kesitleri için oluşturulan geometriler sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

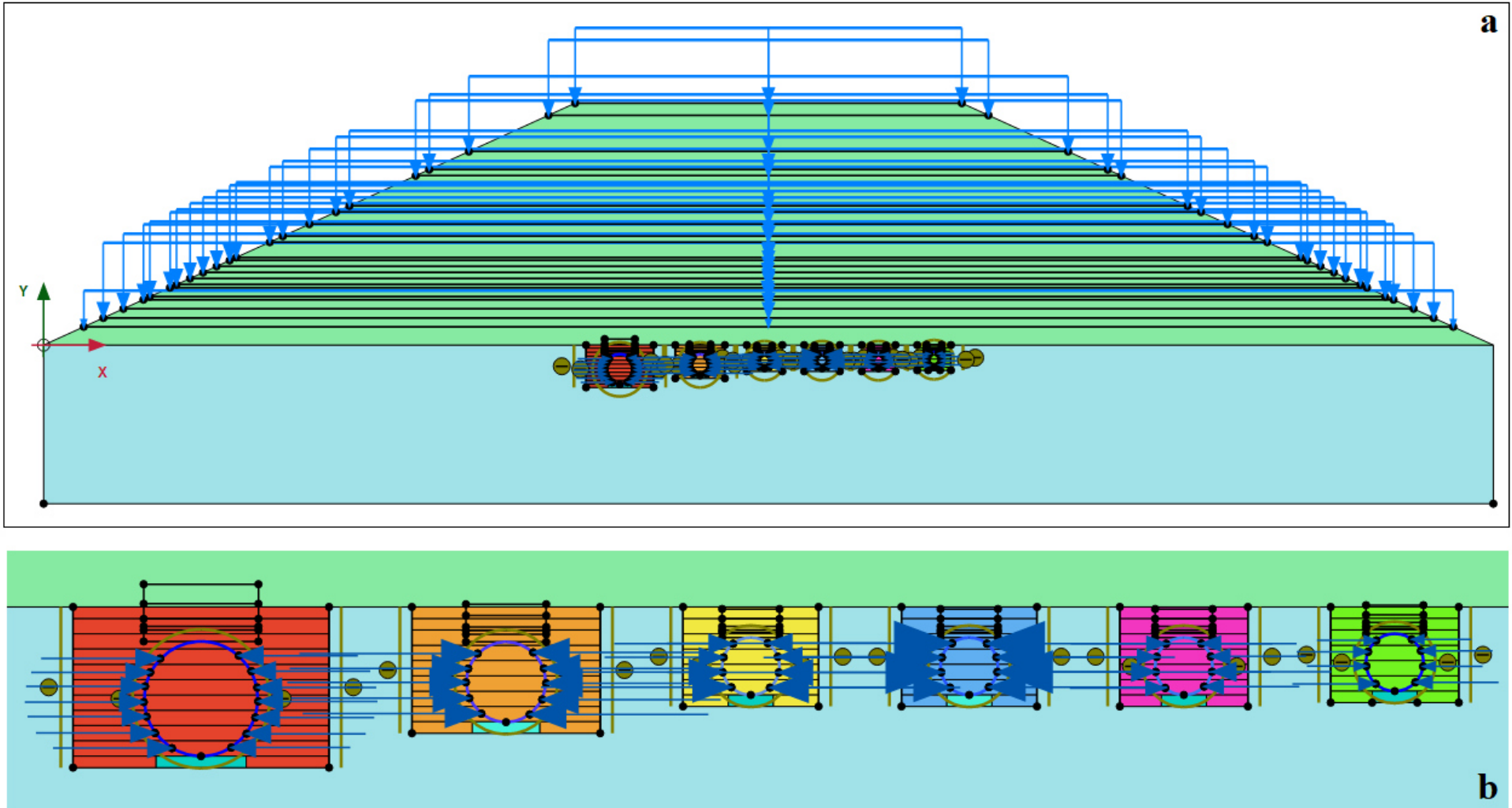
Çizelge 4.1 Boru yan duvarına etkiyen tekil yüklerin büyüklükleri (Yüklerin büyüklükleri kN birimindedir)

	<b>Tabaka 1</b>	<b>Tabaka 2</b>	<b>Tabaka 3</b>	<b>Tabaka 4</b>	<b>Tabaka 5</b>	<b>Tabaka 6</b>	<b>Tabaka 7</b>	<b>Tabaka 8</b>
Boru 1	1	0,7	1,1	0,7				
Boru 2	0,7	0,5	0,6	0,5				
Boru 3	0,7	0,4	0,4	0,4				
Boru 4	1	0,9	1,4	1				
Boru 5	0,8	1	0,8	1				
Boru 6	1,1	1,2	1,2	1,3				
Boru 7	1	3	1	3				
Boru 8	1,5	2,3	1,5	2,4				
Boru 9	1,9	1,5	1,5	1,5				
Boru 12	1,8	1,7	1,7	1,8				
Boru 13	2	1,5	1,5	1,5	2	1,5		
Boru 14	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
Boru 15	1,7	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7		
Boru 16	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,8	2,5
Boru 18	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	2

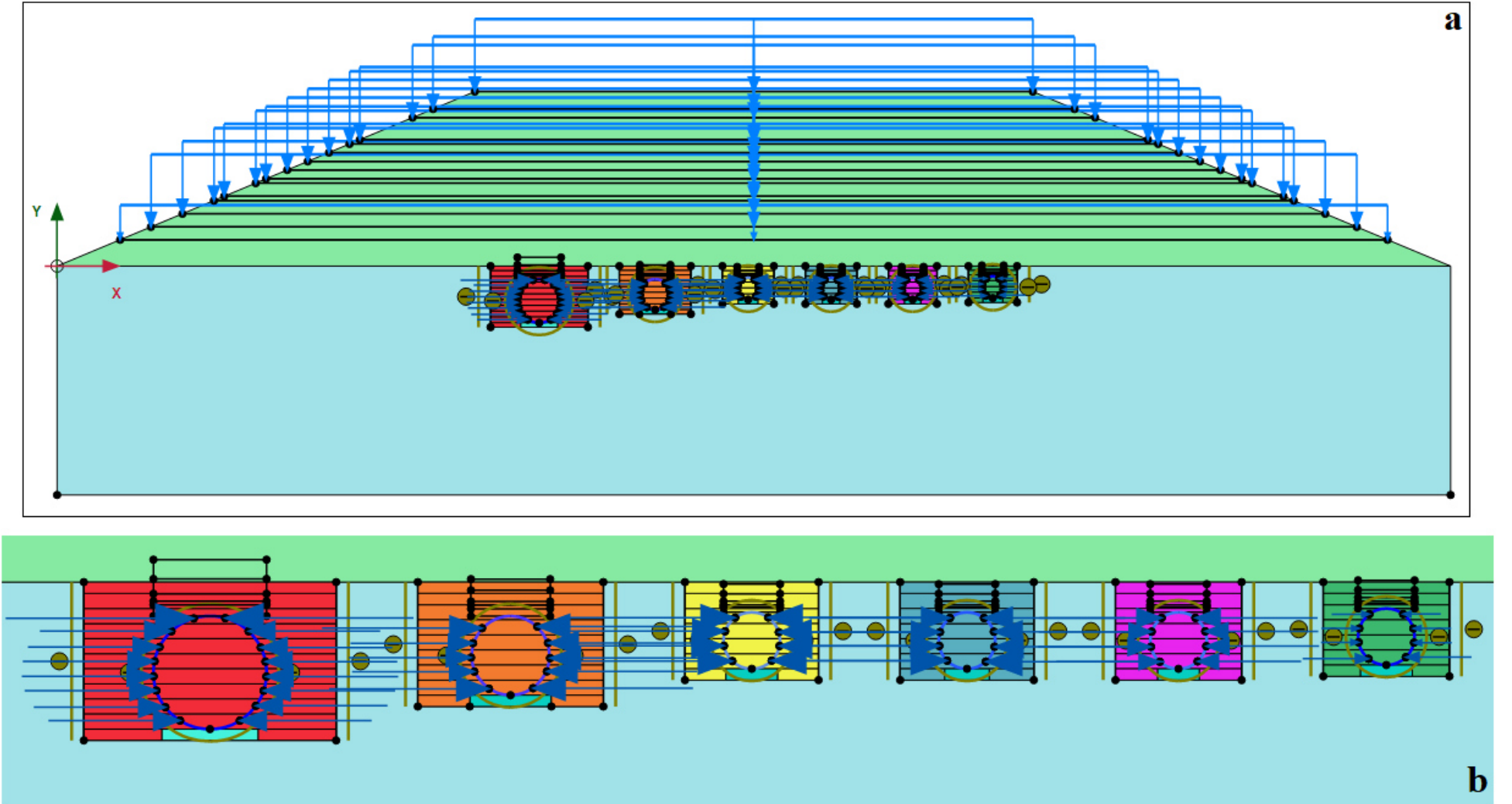




Şekil 4.1. A-A' kesitinin model geometrisi a) Kesitin genel görünümü b) Hendeğin geometrilerinin yakınlaştırılmış görünümü (Soldan sağa doğru sırasıyla Boru 16, Boru 13, Boru 10, Boru 7, Boru 4 ve Boru 1 yer almaktadır.)



Şekil 4.2. B-B' kesitinin model geometrisi a) Kesitin genel görünümü b) Hendek geometrilerinin yakınlaştırılmış görünümü (Soldan sağa doğru sırasıyla Boru 17, Boru 14, Boru 11, Boru 8, Boru 5 ve Boru 2 yer almaktadır.)



Şekil 4.3. C-C' kesitin model geometrisi a) Kesitin genel görünümü b) Hendek geometrilerinin yakınlaştırılmış görünümü (Soldan sağa doğru sırasıyla Boru 18, Boru 15, Boru 12, Boru 9, Boru 6 ve Boru 3 yer almaktadır.)

## 4.1. Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

### 4.1.1. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Ekler içerisinde yer alan Geri Dolgu Profilleri bölümündeki görseller ile boruların gömülme ortamları verilmiştir. Bu şekillerde boru etrafına tabakalar halinde yerleştirilen geri dolgu malzemelerine ait relatif kompaksiyon dereceleri, su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlık değerleri ( $\gamma_k$ ) verilmiştir. Geri dolgu malzemeleri için relatif kompaksiyon değerleri ideal bir yaklaşımla Çizelge 4.2’de verilen değerler olduğu kabul edilmiştir. Her bir tabaka için doğal birim hacim ağırlık değerleri 4.1 eşitliği hesaplanmıştır.

$$\gamma_n = \gamma_k(1 + w) \quad (4.1)$$

Hendek içine yerleştirilen geri dolgu tabakalarının kalınlığı dikkate alınarak geri dolgu malzemeleri için ağırlıklı ortalama doğal birim hacim ağırlığı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamak için kullanılan formül 4.2 eşitliği ile verilmiştir.

$$\gamma_{n-ort} = (\gamma_{n1} \cdot h_1 + \gamma_{n2} \cdot h_2 + \dots + \gamma_{nn} \cdot h_n) / (h_1 + h_2 + \dots + h_n) \quad (4.2)$$

Projede su seviyesi ile ilgili bir bilgi bulunmadığından dolayı geri dolgu malzemelerinin birim hacim ağırlık değerleri olarak doğal birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır. Çizelge 4.2 ile her bir boru için geri dolgu malzemelerine ait sıkışma yüzdeleri ile ortalama doğal birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Geri dolgu malzemeleri ait proktor sıkışma yüzdeleri ve doğal birim hacim ağırlık değerleri

Boru No	Geri Dolgu Türü	Proktor Sıkışma Yüzdesi (%)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
1	Kum	96	19,35
2	Kırma taş	96	23,81
3	Kırma taş	86	19,46
4	Kum	86	17,70
5	Kırma taş	96	22,41
6	Kırma taş	96	22,66
7	Kum	96	19,80
8	Kum	96	19,95
9	Kırma taş	86	19,77
10	Kum	86	18,03
11	Kırma taş	96	22,57
12	Kırma taş	96	22,19
13	Kum	90	18,90
14	Kum	96	19,48
15	Kırma taş	90	20,28
16	Kırma taş	90	20,71
17	Kırma taş	96	22,27
18	Kum	96	19,29

Kum ve kırma taş geri dolgu malzemelerinin konsolidasyonlu – drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları kullanılarak referans ortalama sekant modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değerleri elde edilmiştir. Deneyde kullanılan zeminlerin modellenmesinde Pekleşen zemin modeli kullanılmıştır. Akınay'ın (2010) farklı relatif kompaksiyon derecelerinde yerleştirilen geri dolgu malzemeleri için belirlediği ortalama sekant modülü ( $E_{50}$ ) değerleri ve referans ortalama

sekant modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Geri dolgu malzemelerine ait kayma mukavemeti parametreleri ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı sıkıştırma yüzdelerindeki geri dolgu malzemelerine ait ortalama sekant modülü ve referans ortalama sekant modülü değerleri (Akınay, 2010)

Gerı Dolgu Türü	Proktor Sıkıştırma Yüzdesi	$E_{50}$ (kPa)	$E_{50}^{ref}$ (kPa)
Kum	%86	9700	9500
	%90	20600	20300
	%96	36000	35500
Kırma taş	%86	48500	48000
	%90	70000	69500
	%96	90000	89200

Pekleşen zemin modelinin varsaydığı biçimde referans tanjant ödometre modülü  $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$  olarak, referans yük boşaltma-geri yükleme modülü  $E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref}$  olarak alınmıştır.

Çizelge 4.4. Farklı sıkıştırma yüzdelerindeki geri dolgu malzemelerine ait kayma mukavemeti parametreleri

Gerı Dolgu Türü	Proktor Sıkıştırma Yüzdesi	Kohezyon, c (kPa)	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ (°)	Genleşme Açısı, $\psi$ (°) ( $\psi = \phi - 30$ )
Kum	%86	0	37	7
	%90	0	41	11
	%96	0	45	15
Kırma taş	%86	34,5	42	12
	%90	55,2	43	13
	%96	69	45	15

Termoplastik boruların yatak içerisinde oturmasını sağlamak için yatak tabakasının boru altında yer alan 1/3'lük bölümünde kompaksiyon işlemi uygulanmamıştır. Ancak kompaksiyon işlemi uygulanmayan geri dolgu malzemelerinin mühendislik özellikleri hakkında bilgi bulunmamaktadır. Akınay (2010) gevşek kum ve kırma taş malzemelerine ait değerlerin %86 sıklıkta yerleştirilen malzemelerin değerlerinden düşük olması gerektiği kabulünde bulunmuştur. Akınay (2010) tarafından belirlenen gevşek kum ve kırma taş malzemelerine ait parametreler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Gevşek geri dolgu malzemelerine ait parametreler (Akınay, 2010)

<b>Geri Dolgu Malzemesi</b>	$E_{50}^{ref}$ (kPa)	<b>Kohezyon, c</b> (kPa)	<b>Kayma Mukavemeti Açısı, <math>\phi</math> (°)</b>	<b>Genleşme Açısı, <math>\psi</math> (°)</b> ( $\psi = \phi - 30$ )	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )
Gevşek Kum	6350	0	33	3	16
Gevşek Kırma taş	32000	20	40	10	18

Geri dolgunun tamamlanmasıyla yerel zemin malzemesi olan düşük plastisiteli kilin tabakalar halinde yerleştirilmesi ile dolgu inşası gerçekleştirilmiştir. İnşaat sırasında her bir tabaka keçi ayaklı silindir ile sıkıştırılmıştır. Dolgu malzemesine ait parametreler konsolidasyonlu - drenajsız üç eksenli basınç deneyleri sonuçları kullanılarak belirlenmiştir, sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Dolgu malzemesine ait parametreler (Akınay, 2010)

Doğal Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,4
Referans ortalama sekant modülü, $E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	5210
Referans yük boşaltma-geri yükleme modülü, $E_{ur}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	15630
Kohezyon, $c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	34,5
Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ (°)	15
Genleşme Açısı, $\psi$ (°)	0

Dolgu malzemesi sıkıştırılarak yerleştirildiği için üç eksenli basınç deneyinden elde edilen sonuçlar doğal kil zeminin özelliklerini yansıtmaz. Bundan dolayı Akınay (2010) doğal zemin için alt sınır ve üst sınır değerleri belirlemiştir. Bu çalışmada ise Çizelge 4.7’de verilen üst sınır değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Doğal zemin malzemesine ait parametreler (Akınay, 2010)

Doğal Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,4
Referans ortalama sekant modülü, $E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	20000
Kohezyon, $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	0
Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ (°)	24
Genleşme Açısı, $\psi$ (°)	0

#### 4.1.2. Termoplastik Boru Parametrelerinin Belirlenmesi

Termoplastik borular Plaxis 2D programında tünel seçeneği ile modellenmiştir. Bölüm 3’te A tipi boru (Boru 1, Boru 2, Boru 3), B tipi boru (Boru 4, Boru 5, Boru 6), C tipi boru (Boru 7, Boru 8, Boru 9), D tipi boru (Boru 10, Boru 11, Boru 12), E tipi boru (Boru 13, Boru 14, Boru 15) ve F tipi boru (Boru 16, Boru 17, Boru 18), olmak üzere altı farklı tipte borunun deneylerde kullanıldığı belirtilmiştir. Termoplastik borulara ait parametreler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Boru tiplerine ait parametreler (Akınay, 2010)

	A	B	C	D	E	F
Normal Rijitlik, EA (kN/m)	32620	35550	8335	9655	11960	18190
Eğilme Rijitliği, EI (kNm <sup>2</sup> /m)	2,49	5,39	4,05	4,54	9,36	15,22
Eşdeğer Kalınlık, d (m)	0,030	0,043	0,076	0,075	0,097	0,100
Ağırlık, w (kN/m/m)	0	0	0	0	0	0
Poisson Oranı, $\nu$	0,3	0,3	0,45	0,45	0,45	0,45



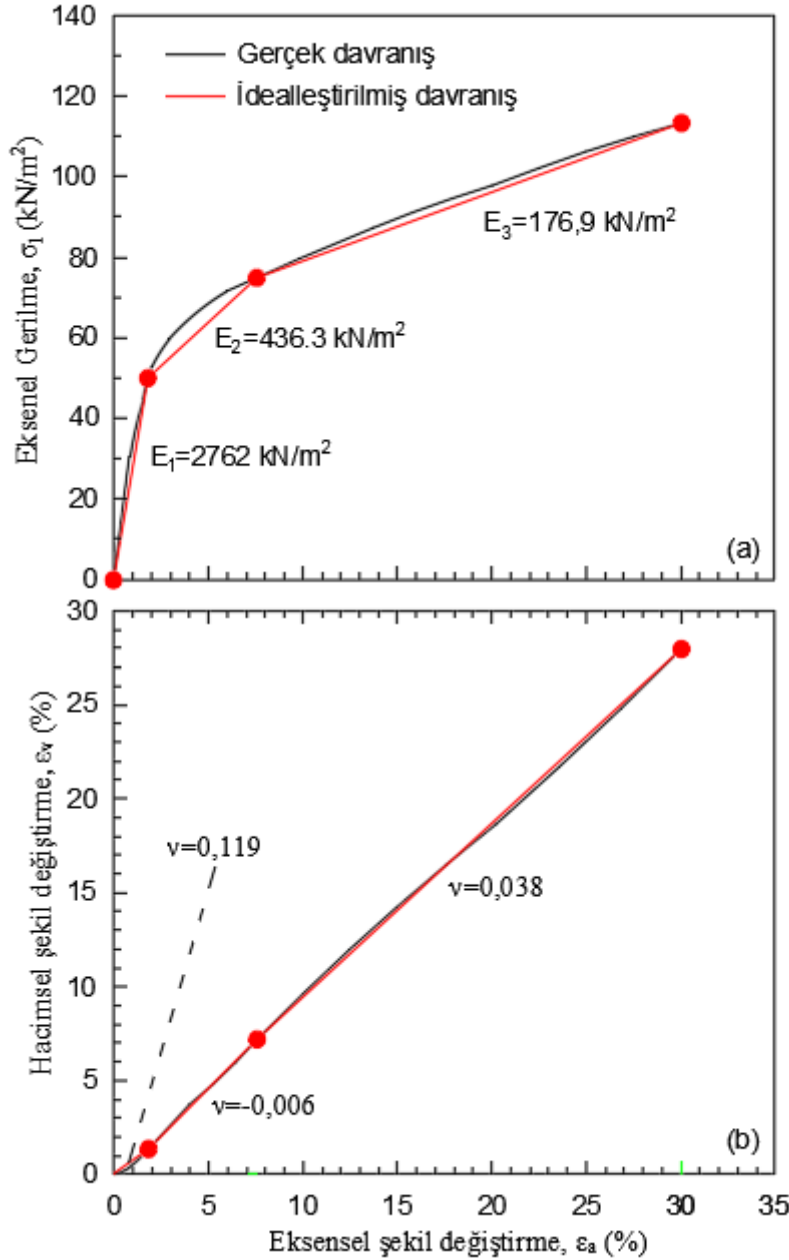
Çizelge 4.8’de özellikleri verilen boruların dışında analizlerde kullanılmak için daha küçük çaplı borulara ait özellikler Çizelge 4.9’da verilmiştir. Belirlenen borular arazi deneyinde kullanılan borulardan daha küçük çaplı olup, 60 cm ve 30 cm çaplarındadır. 60 cm çaplı borulara ait özellikler Du vd. (2017)’nin çalışmasından, 30 cm çaplı boru ise Akınay (2017)’nin çalışmasından alınmıştır.

Çizelge 4.9. Küçük çaplı borulara ait parametreler

	<b>Boru D0,60</b>	<b>Boru D0,30</b>
Normal Rijitlik, EA (kN/m)	7500	7032,41
Eğilme Rijitliği, EI (kNm <sup>2</sup> /m)	0,922	0,1906
Eşdeğer Kalınlık, d (m)	0,03841	0,01804
Ağırlık, w (kN/m/m)	0	0
Poisson Oranı, $\nu$	0,46	0,46

#### 4.1.3. EPS Geofom Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

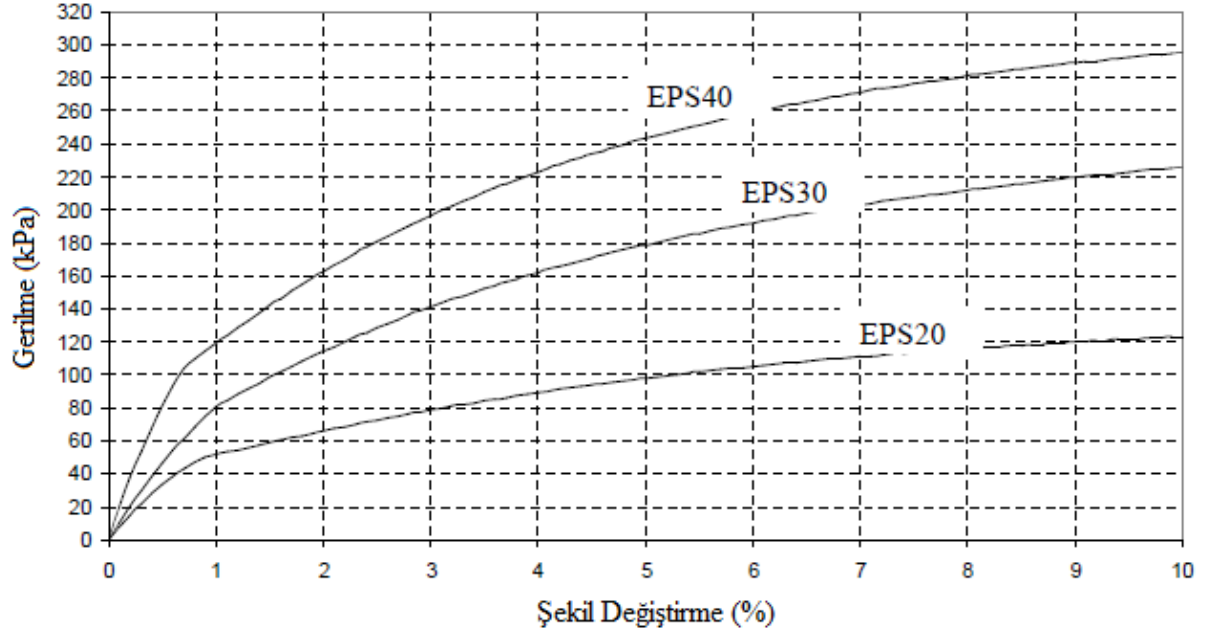
Arazi deneyinin Plaxis 2D programında modellenip kalibrasyonun yapılmasının ardından EPS geofom malzeme eklenerek borular üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda Akınay’ın (2017) laboratuvar deneylerinde ve sayısal analizlerde kullandığı 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki EPS geofom malzeme seçilmiştir. Akınay (2017) EPS geofom malzeme üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirerek Şekil 4.4’te verilen eksenel gerilme – eksenel şekil değiştirme ve hacimsel şekil değiştirme – eksenel şekil değiştirme grafiklerini elde etmiştir. Bu grafikler üzerinde farklı gerilme aralıkları belirlenerek bu aralıklarda EPS geofom malzemeye ait elastisite modülleri ve Poisson oranları belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerle EPS geofom malzemenin modellenmesinde Akınay’ın (2017) yaptığı gibi doğrusal elastik model kullanılmıştır.



Şekil 4.4. 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki EPS geofom malzeme için a) aksenal gerilme – aksenal şekil değiştirme b) hacimsel şekil değiştirme – aksenal şekil değiştirme grafikleri (Akınay, 2017)

Çalışmanın devamında daha yüksek yoğunluklardaki EPS geofom malzemenin borular üzerindeki etkinliğini incelemek için Tefera vd.'nin (2010) çalışmalarından alınan gerilme – şekil değiştirme grafiklerinden de yararlanılmıştır. Tefera vd (2010) 20 kg/m<sup>3</sup>, 30 kg/m<sup>3</sup> ve 40 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarındaki EPS geofom malzeme üzerinde incelemeler yapmışlardır. Tefera vd.'nin (2010) çalışmalarında elde ettikleri gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu grafikler üzerinde de gerilme aralıkları belirlenerek parametreler elde edilmiş ve

Tefera vd.'nin (2010) yaptığı gibi pekleşen zemin modeli ile modellenmiştir. Tefera vd. (2010) EPS gefoam malzemelere ait olan pekleşen zemin modeli parametrelerini de çalışmalarında belirtmişlerdir. EPS gefoam malzemelerin parametreleri Çizelge 4.10 ile verilmiştir.



Şekil 4.5. 20 kg/m<sup>3</sup>, 30 kg/m<sup>3</sup> ve 40 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarındaki EPS gefoam malzemelere ait gerilme şekil değiştirme grafiği (Tefera vd.,2010)

Çizelge 4.10. 20 kg/m<sup>3</sup>, 30 kg/m<sup>3</sup> ve 40 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarındaki EPS gefoam malzemelerin pekleşen zemin modeli parametreleri (Tefera vd.,2010)

Pekleşen zemin modeli parametreleri	EPS Tipi		
	EPS20	EPS30	EPS40
Birim hacim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	20	30	40
Kohezyon, c (kN/m <sup>2</sup> )	35	60	75
İçsel sürtünme açısı, Ø (°)	30	42	40
Genleşme açısı, ψ (°)	0	0	0
Referans ortalama sekant modülü, $E_{50}^{ref}$ (kPa)	6000	9000	15000
Poisson oranı	0,1	0,1	0,1
Referans gerilme, p <sup>ref</sup> (kPa)	100	100	100

#### 4.1.4. Arayüzey Parametrelerinin Belirlenmesi

Çalışmada belirlenen dört farklı arayüzey parametresi belirlenmiştir. Bunlardan ilki hendeklere yerleştirilen geri dolgu malzemesi ile hendeklerin açıldığı doğal zemin arasındaki arayüzeydir. Akınay (2010) bu arayüzey için azaltma faktörü olarak  $R_{int} = 0,5$  ve  $R_{int} = 1$  (rijit) değerlerini atayarak termoplastik borularda meydana gelen şekil değiştirme oranlarını incelemiştir.  $R_{int} = 0,5$  değeri atandığı durumda borularda meydana gelen şekil değiştirmeler %0,01 - %0,02 oranlarında artış meydana gelmiş ve bu artışın göz ardı edilebileceği belirtilmiştir. Bundan dolayı geri dolgu malzemesi – doğal zemin arayüzeyi için azaltma faktörü  $R_{int} = 1$  değeri atanmıştır. Geri dolgu malzemeleri ile termoplastik borular arasındaki arayüzey elemanları için azaltma faktörü  $R_{int} = 0,67$  değeri atanmıştır (Akınay, 2010).

Atmatzidis vd. (2001) çalışmalarında EPS geofoam ile kum ve kırma taş malzemelerin arayüzey dayanım açısını belirlemek amacı ile direkt kesme deneyleri yapmışlardır. EPS – kum arayüz dayanım açısı  $38,5^\circ$  olarak elde edilirken EPS – kırma taş arayüz dayanım açısı  $55,5^\circ$  derece olarak elde edilmiştir. Bu nedenle EPS geofoam – geri dolgu malzemeleri arayüzeylerinin rijit oldu varsayılarak  $R_{int} = 1$  değeri atanmıştır. Son olarak EPS geofoam – termoplastik boru arayüzeyi için azaltma faktörü  $R_{int} = 1$  olarak belirlenmiştir (Akınay, 2017).

#### 4.2. Çözümleme Aşamaları

Çalışmada hesaplama tipi “plastik” ve yükleme tipi “aşamalı inşa” olarak seçilmiştir. Hendeklerin doğal zemin içine açıldığı durum başlangıç aşaması olarak kabul edilmiştir. Başlangıç aşamasının ardından geri dolgu inşaatı aşamalı bir şekilde modellenmiştir. Geri dolgunun aşamalı inşasında Ekler içerisinde yer alan Geri Dolgu Profilleri bölümündeki görseller ile verilen geri dolgu yerleşim profillerinde görülen tabaka kalınlıkları kullanılmıştır. Geri dolgu aşaması 11 nolu adımda tamamlanmıştır. Geri dolgunun ardından ise aşamalı dolgu inşaatı modellenmiştir. 6,1 m kalınlığındaki dolgu inşaatı 26 nolu adımda 12,2 m kalınlığındaki dolgu inşaatı ise 33 nolu adımda tamamlanmıştır. Çizelge 4.11 ile farklı boru tipleri için geri dolgu inşa aşamaları, Çizelge 4.12 ile ise dolgu inşa aşamaları verilmiştir. Arazi deneyinin modellenmesi yapılırken açılan hendeklerin üst yüzeyi 0 seviyesi olarak belirtilmiş ve geri dolgu seviyeleri eksi olarak ifade edilmiştir. Örnek olarak A tipi boruların yerleştirildiği hendeklerde geri dolgu 1.27 m hendek derinliğinden başlayarak hendek yüzeyinde tamamlanmaktadır.

Çizelge 4.11. Geri dolgu inşa aşamaları

Adım	İnşaat Aşaması	Geri Dolgu Kalınlığı (m)			
		A Tipi Boru	B, C ve D Tipi Boru	E Tipi Boru	F Tipi Boru
Başlangıç Aşaması		-1,27	-1,3208	-1,6765	-2,1336
1	Geri dolgu	-1,27	-1,3208	-1,6765	-1,9812
2	Geri dolgu	-1,27	-1,3208	-1,6765	-1,778
3	Geri dolgu	-1,27	-1,3208	-1,524	-1,5748
4	Geri dolgu	-1,27	-1,3208	-1,3208	-1,3716
5	Geri dolgu	-1,1176	-1,1684	-1,1176	-1,1684
6	Geri dolgu	-0,9144	-0,9652	-0,9144	-0,9652
7	Geri dolgu	-0,7112	-0,762	-0,7112	-0,762
8	Geri dolgu	-0,508	-0,5588	-0,508	-0,558
9	Geri dolgu	-0,3048	-0,3556	-0,3048	-0,3556
10	Geri dolgu	-0,1524	-0,1524	-0,1524	-0,1524
11	Geri dolgu	0	0	0	0

Çizelge 4.12. Dolgu inşa aşamaları

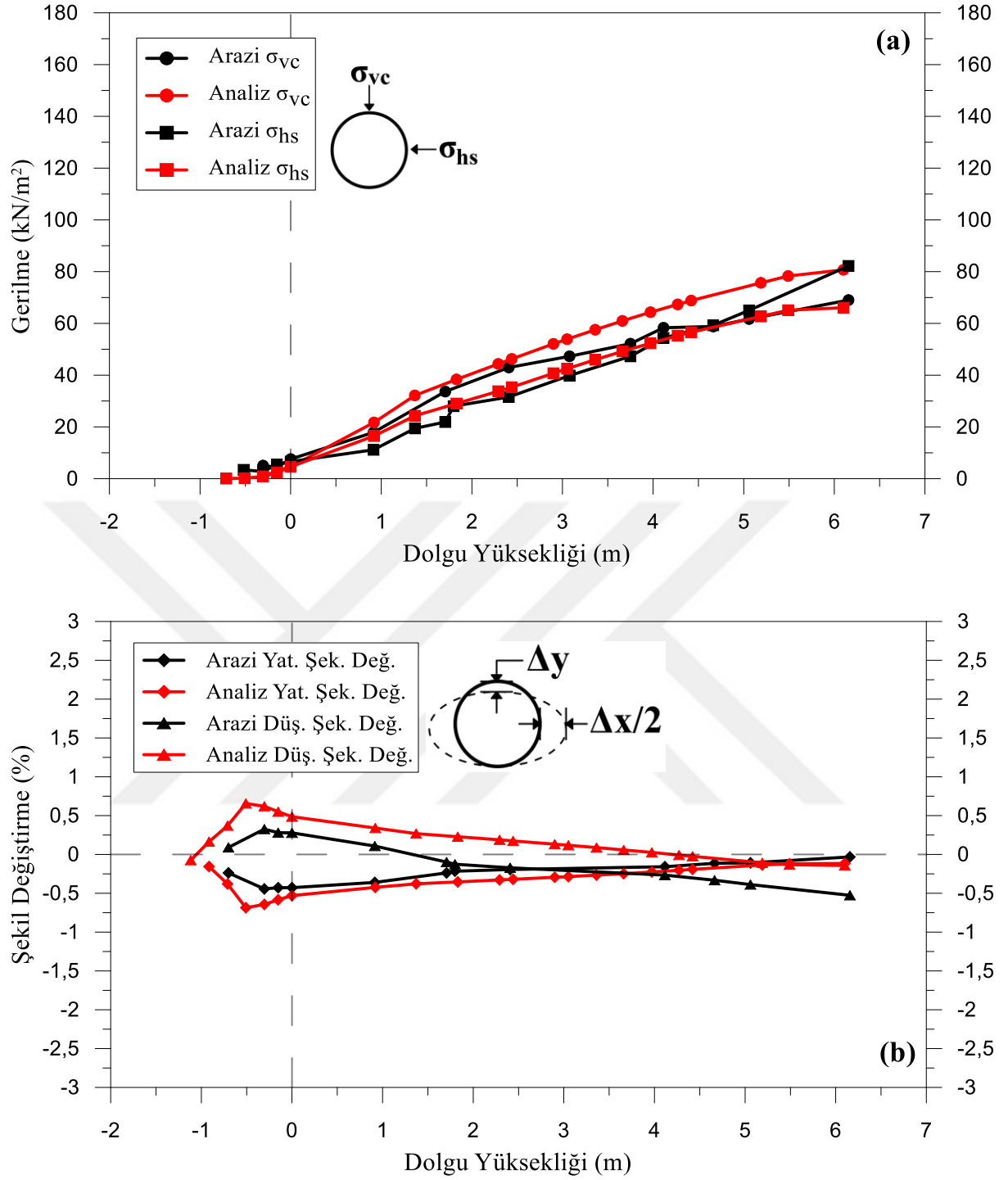
Adım	İnşaat Aşaması	Dolgu Kalınlığı (m)
12	Dolgu	0,92
13	Dolgu	1,37
14	Dolgu	1,83
15	Dolgu	2,29
16	Dolgu	2,44
17	Dolgu	2,90
18	Dolgu	3,05
19	Dolgu	3,36
20	Dolgu	3,66
21	Dolgu	3,97
22	Dolgu	4,27
23	Dolgu	4,42
24	Dolgu	5,19
25	Dolgu	5,49
<b>26</b>	<b>Dolgu</b>	<b>6,10</b>
27	Dolgu	6,71
28	Dolgu	7,02
29	Dolgu	8,54
30	Dolgu	8,85
31	Dolgu	9,76
32	Dolgu	11,59
<b>33</b>	<b>Dolgu</b>	<b>12,20</b>

### **4.3. Plaxis 2D Programıyla Kalibre Edilmiş Verilerin Arazi Deneyi Verileri İle Karşılaştırılması**

Gerçekleştirilen arazi deneyinin Plaxis 2D programı ile kalibre edilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Ekler bölümü içerisinde yer alan Arazi Deneyi Verileri bölümündeki çizelgelerde verilen arazi deneyine ait verilerle karşılaştırılmıştır. Boru tacına ve boru yan duvarına etkileyen gerilmeler ile boru düşey ve yatay şekil değiştirme oranları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan grafiklerde arazi deneyinden elde edilen veriler ‘‘Arazi’’, Plaxis 2D programı ile yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen veriler ise ‘‘Analiz’’ olarak isimlendirilmiştir. Her bir boru için gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin karşılaştırıldığı iki grafik oluşturulmuştur. Arazi deneyinde 10, 11 ve 17 nolu boruların gömülme ortamlarının yeterli kalitede hazırlanmadığı için elde edilen sonuçların hatalı olduğu belirtilmiştir. Bu borularla ilgili grafikler oluşturulmamıştır. Bunlarla birlikte boru sayısını azaltmak için C-C' ekseninde yer alan Boru 18 hariç diğer borulara ilişkin grafiklerde paylaşılmamıştır. Bu şekilde 5 farklı boru tipinde 10 adet boruya ilişkin çalışma sonuçları paylaşılmıştır.

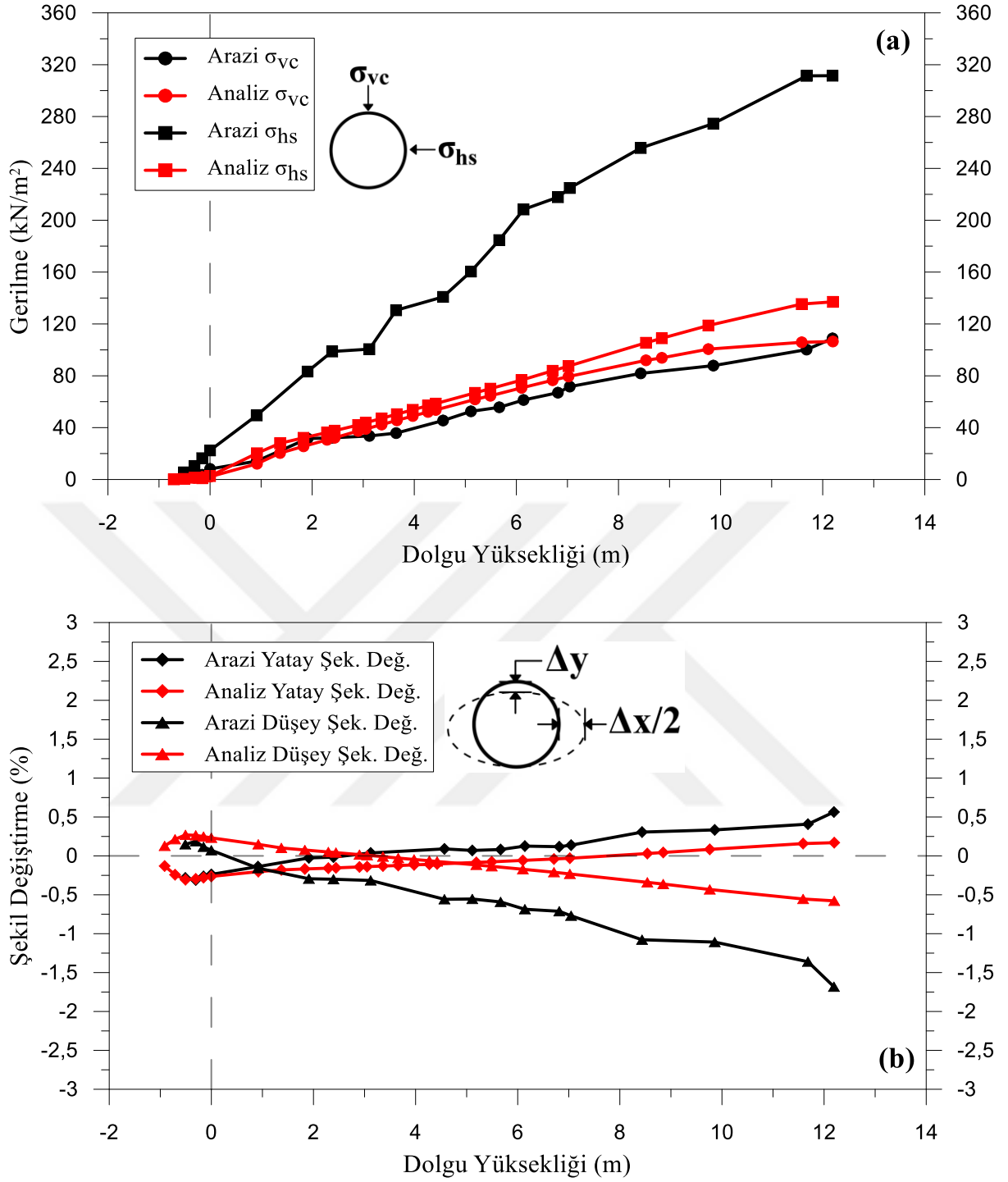
Plaxis 2D programından elde edilen verilerin arazi deneyi verileri ile uyumlulukları oluşturulan grafiklerle incelenmiştir. Bu grafiklere göre arazi deneyi verileri ile Plaxis verileri karşılaştırıldığında boru üzerine etkileyen gerilme değerleri genel olarak birbirine benzer olduğu söylenebilir. Aynı şekilde boruda meydana gelen şekil değiştirme oranlarında da arazi ve Plaxis verileri arasında genel bir uyum olduğu söylenebilir. Belirtilen borulara ait gerilme ve şekil değiştirme grafikleriyle detaylı olarak değerlendirilmeler boru tiplerine göre yapılmıştır.

A tipi olan Boru 1 ve Boru 2 borularının tacına etki eden düşey gerilmeler ile yan duvarına etki eden yanal gerilmeler ve bu borularda meydana gelen düşey şekil değiştirmeler ile yatay şekil değiştirmelerin arazi deneyi ve sayısal analiz sonuçlarına göre karşılaştırıldığı Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Boru 1'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler



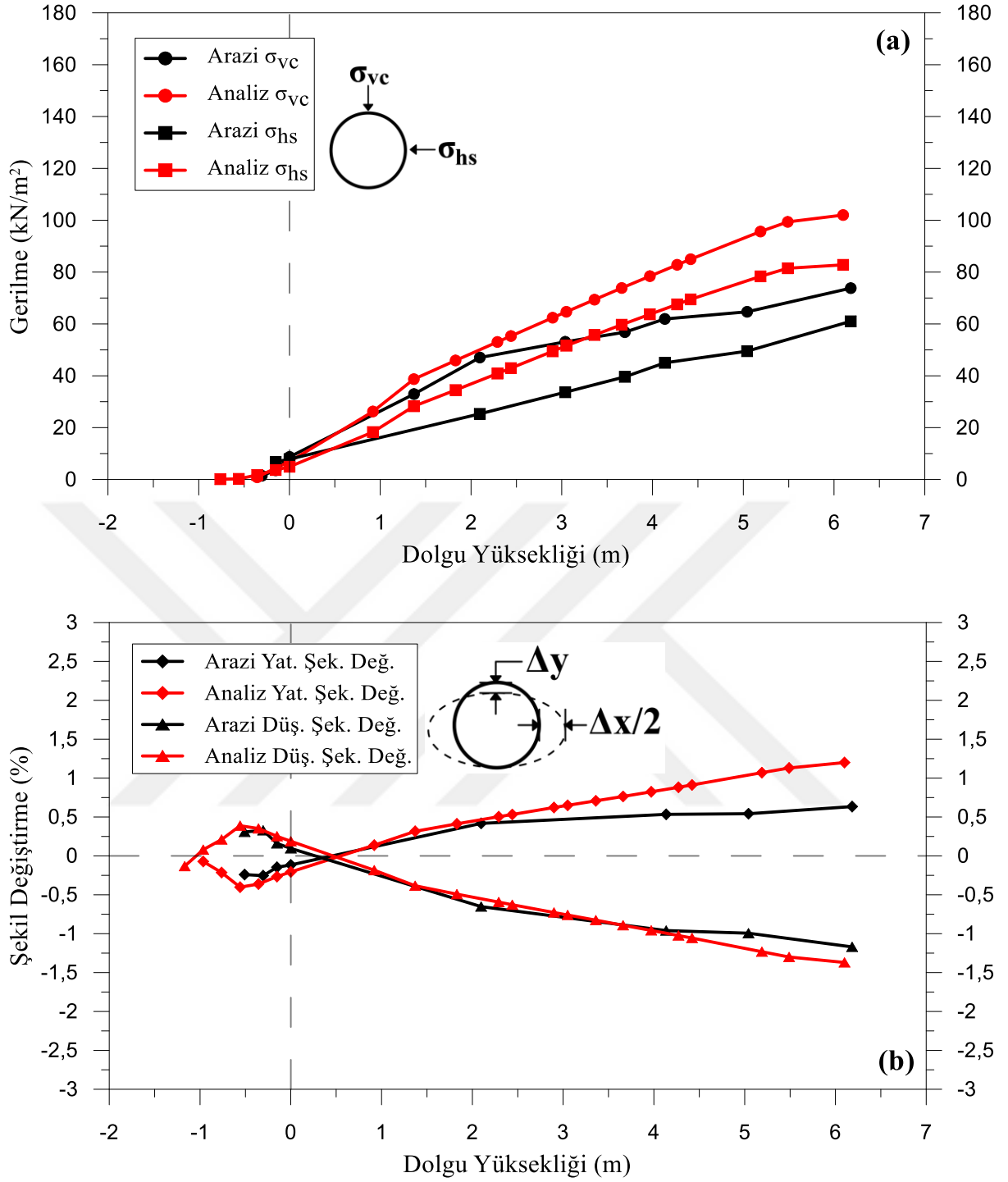


Şekil 4.7. Boru 2'ye ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

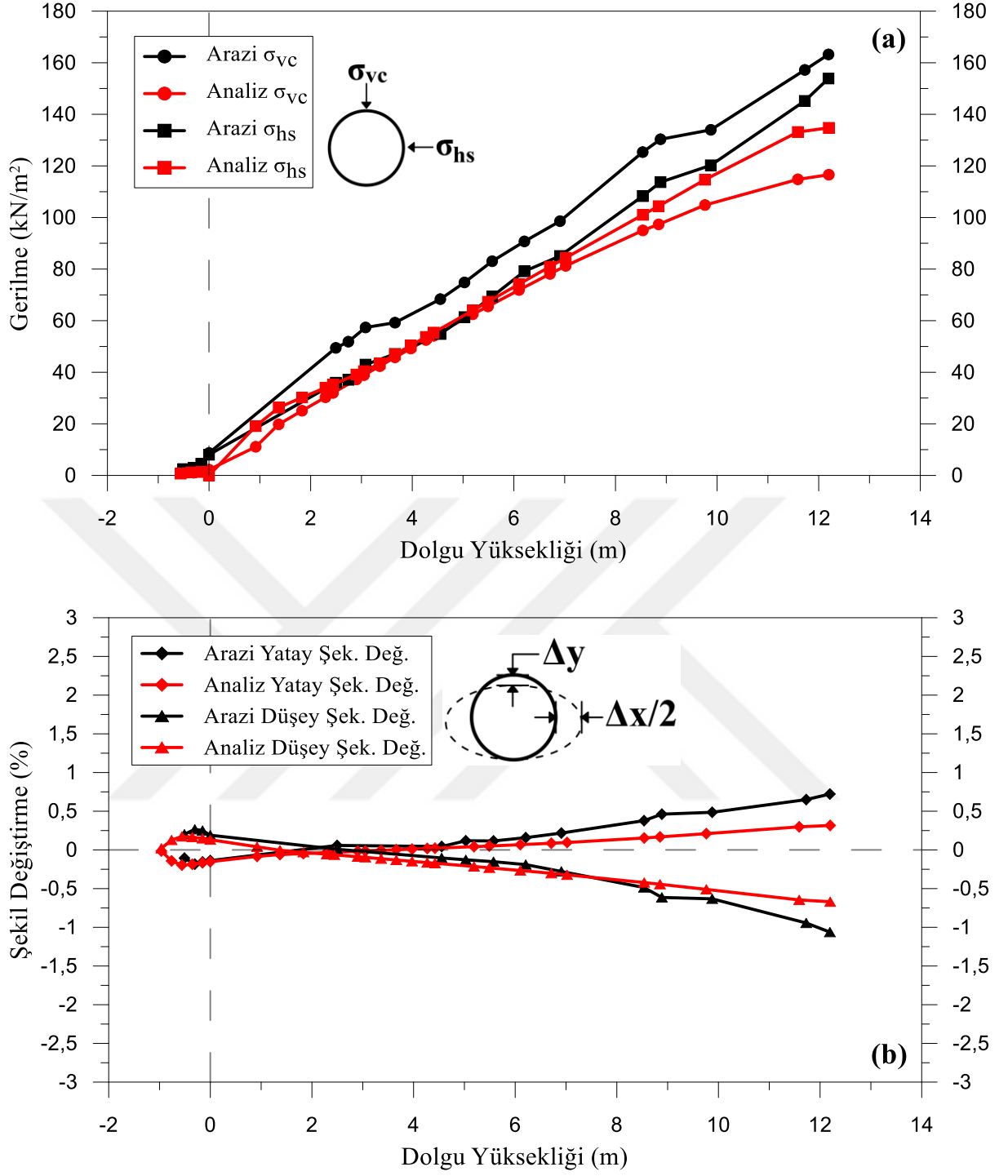
A tipi borularda arazi ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında Boru 1'e etkiyen gerilmelerin uyumlu olduğu görülmektedir. Boru 2'de ise boru tacına etkiyen düşey gerilme değerleri uyumlu iken boru yan duvarına etkiyen yanal gerilme değerlerinde önemli bir fark vardır. 12,2 m dolgu altında arazide ölçülen yanal gerilme değeri, sayısal analizler sonucu elde edilen değerden yaklaşık 170 kN/m<sup>2</sup> fazla olduğu görülmektedir. Arazi deneylerinde yer alan diğer borularda bu kadar yüksek gerilme değerinin olmayışı Boru 2'nin yerleşimi ile ilgili bir hata olabileceğini düşündürmüştür. Ancak Derin Gömü Projesi ile ilgili çalışmalarda bu boruyla ilgili bir hata olduğuna dair bir bilgi yer almamaktadır.

A tipi borulara ait şekil değiştirme verileri karşılaştırıldığı Boru 1 ve Boru 2'nin yatay şekil değiştirmelerin olabildiğince uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak düşey şekil değiştirmelerde Boru 1'de %0,38'lik, Boru 2'de ise %1,1'lik bir fark oluşmuştur. Bu fark mm cinsinden ifade edilirse Boru 1 için 2,9 mm, Boru 2 için ise 8 mm'yi bulmaktadır.

B tipi olan Boru 4 ve Boru 5 borularının tacına etki eden düşey gerilmeler ile yan duvarına etki eden yanal gerilmeler ve bu borularda meydana gelen düşey şekil değiştirmeler ile yatay şekil değiştirmelerin arazi deneyi ve sayısal analiz sonuçlarına göre karşılaştırılması Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



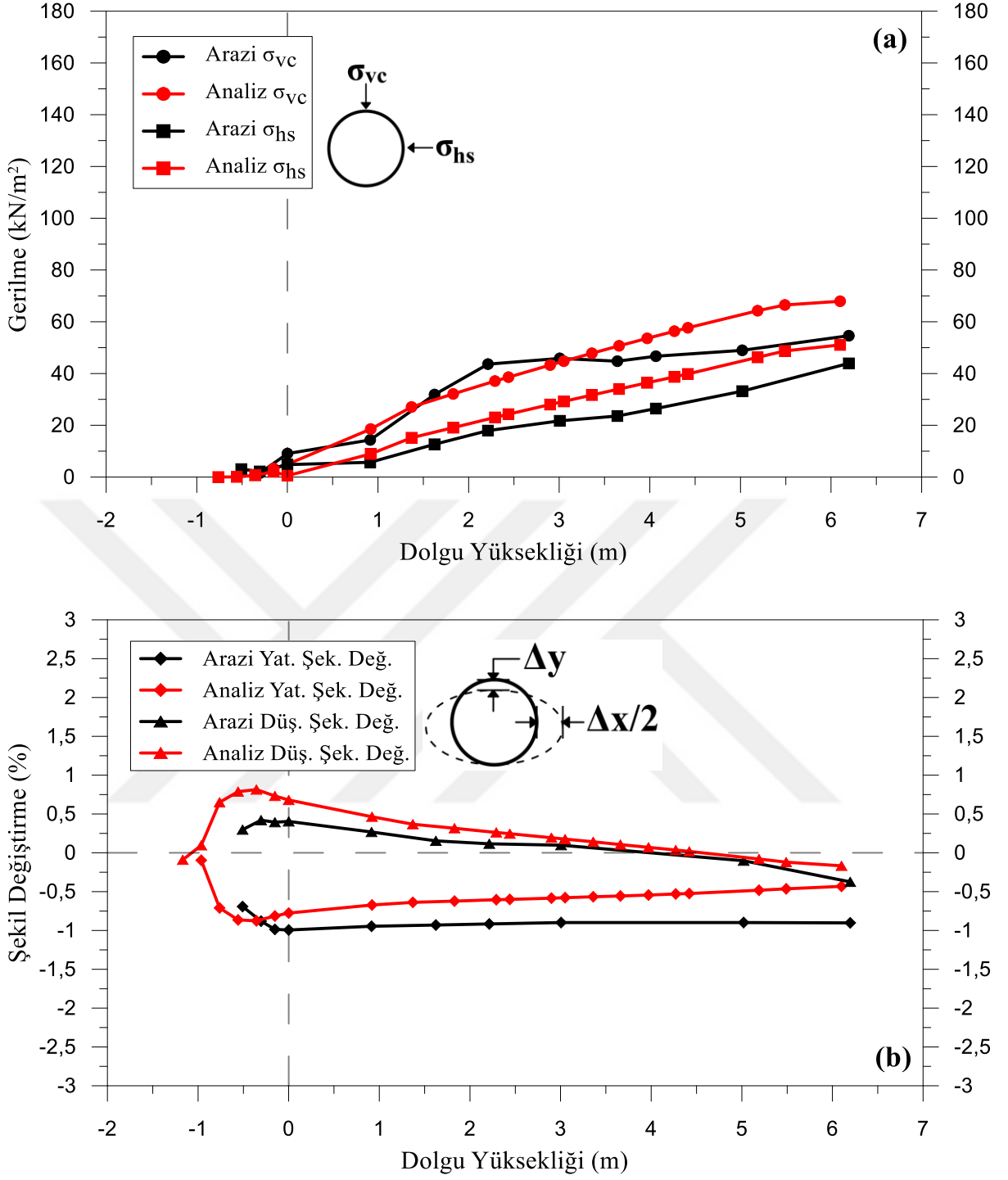
Şekil 4.8. Boru 4'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler



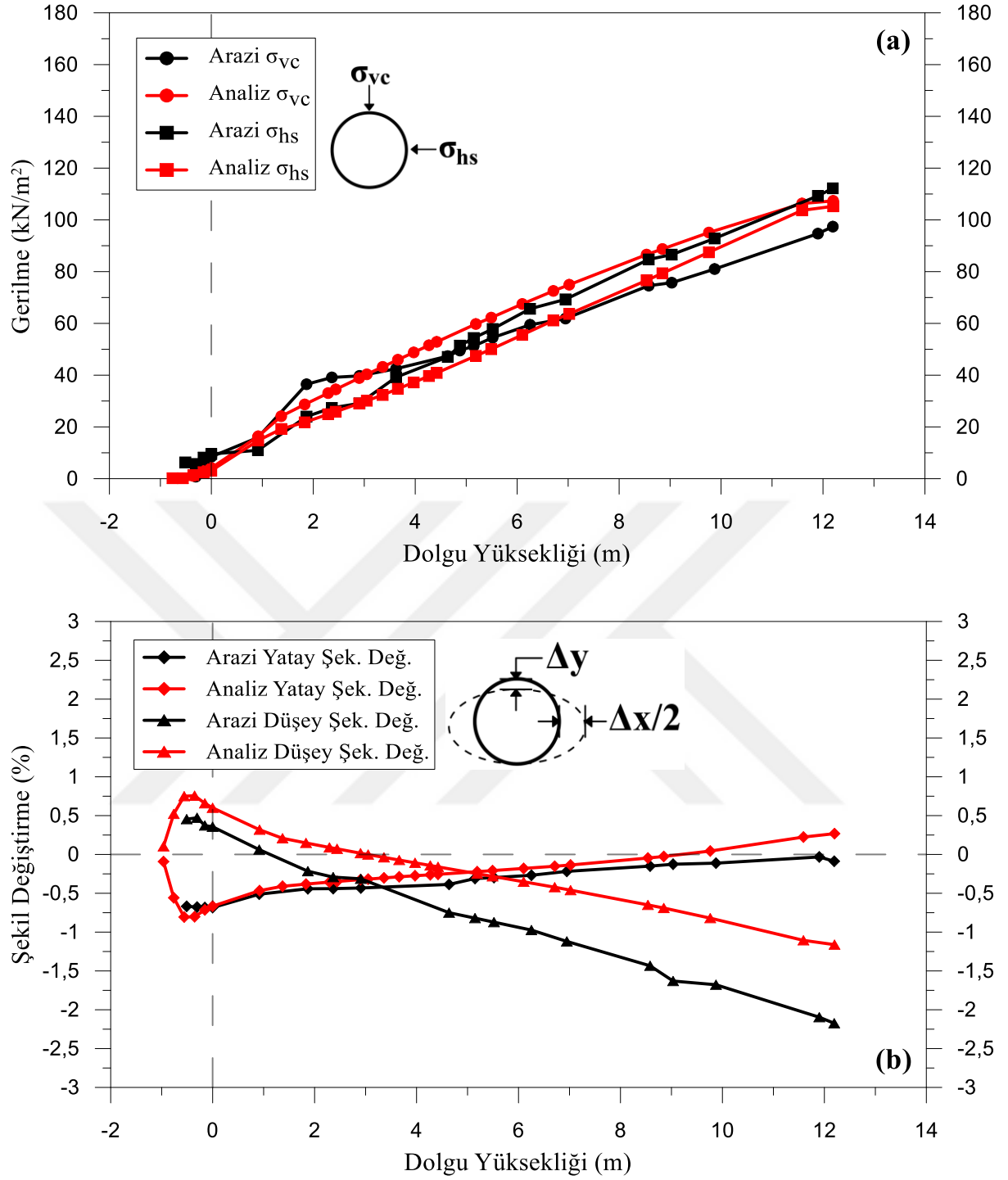
Şekil 4.9. Boru 5'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

B tipi borularda gerilmeler incelendiğinde Boru 4 ve Boru 5'te Plaxis verileriyle arazi verileri arasında bir miktar fark oluşmuştur. Bu fark Boru 4'te yaklaşık 20 kN/m<sup>2</sup> iken Boru 5'te bu fark yaklaşık 40 kN/m<sup>2</sup> bulmaktadır. Şekil değiştirme oranları karşılaştırıldığında Boru 4 ve Boru 5'te arazi ve Plaxis verilerine ait eğrilerinde genel bir uyum olduğu söylenebilir. Bununla birlikte Boru 4'te 6,1 m dolgu altında yatay şekil değiştirme oranında Plaxis ile elde edilen analiz değeri, arazi değerinin yaklaşık %0,5 üzerinde olduğu Şekil 4.8b'de görülmektedir.

C tipi olan Boru 7 ve Boru 8 borularının tacına etki eden düşey gerilmeler ile yan duvarına etki eden yanal gerilmeler ve bu borularda meydana gelen düşey şekil değiştirmeler ile yatay şekil değiştirmelerin arazi deneyi ve sayısal analiz sonuçlarına göre karşılaştırıldığında Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Boru 7'ye ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

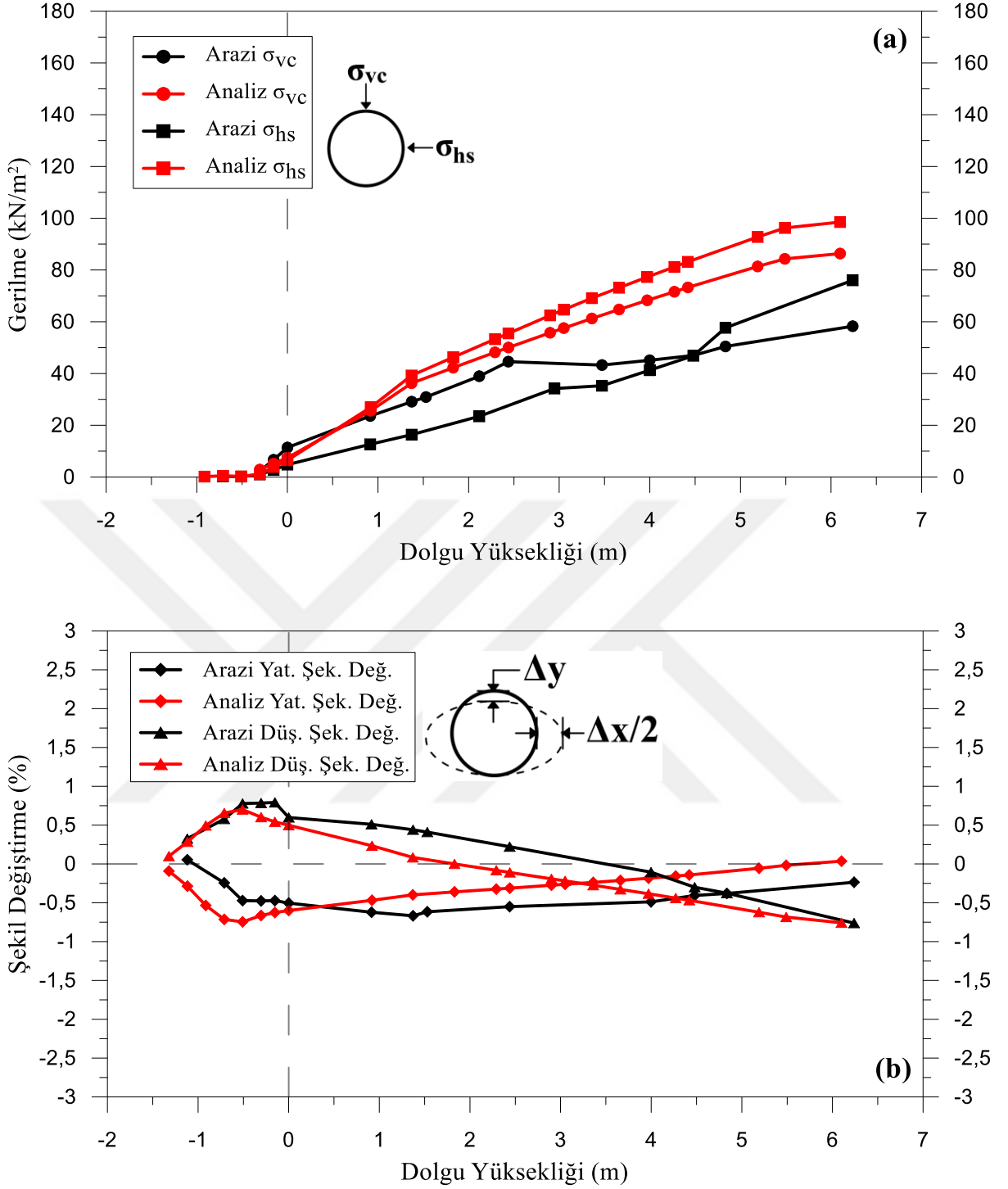


Şekil 4.11. Boru 8'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

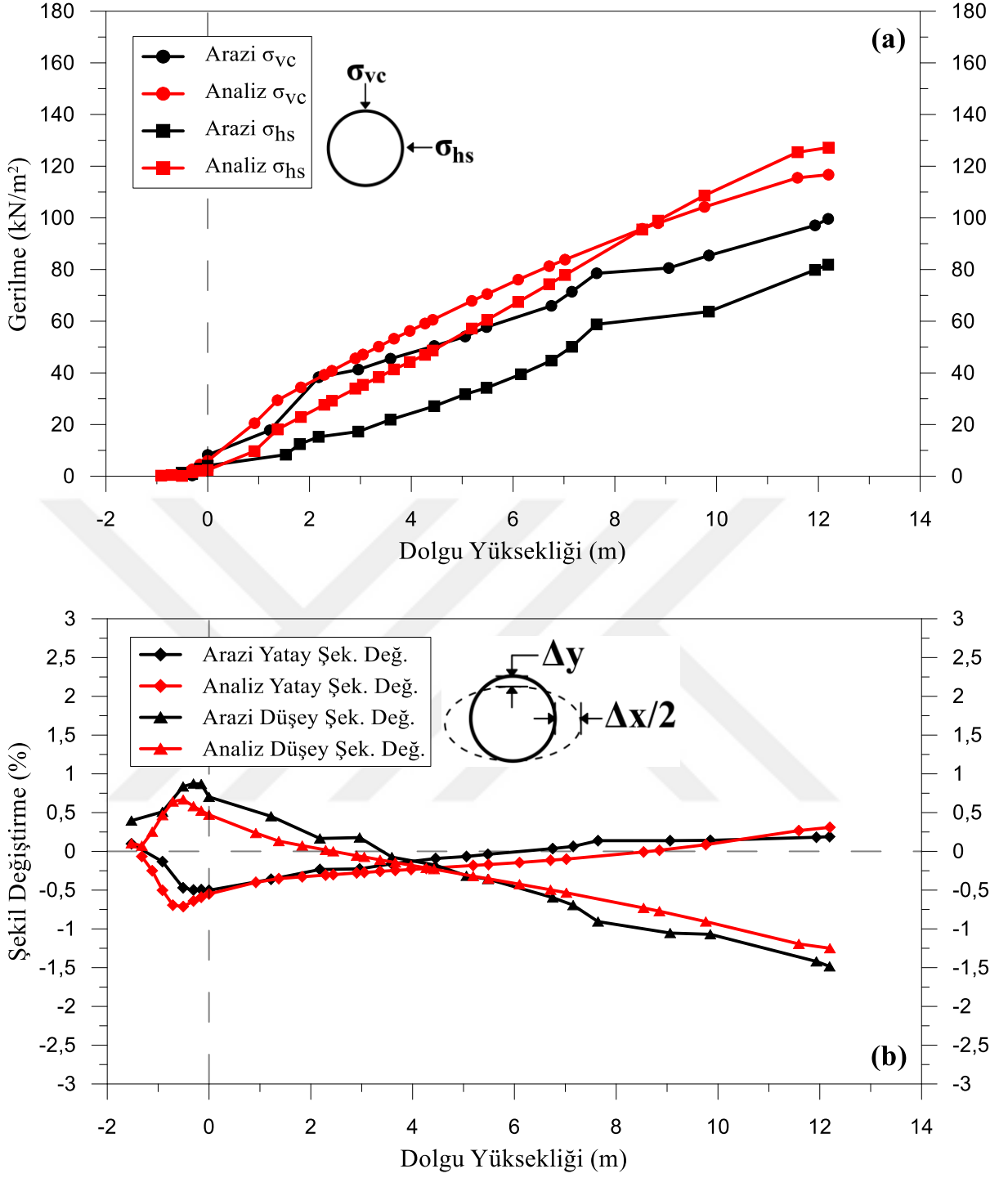
C tipi borulara ait gerilme verileri incelendiğinde Boru 8'e ait olan arazi gerilme verileri ile Plaxis programıyla elde edilen gerilme verilerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Boru 7'de ise 6,1 m dolgu altında sayısal analizlerle elde edilen gerilme değerleri arazi deneylerinden elde edilen gerilme değerlerinden yaklaşık 10 kN/m<sup>2</sup> yüksek olarak elde edilmiştir. Arazi deneylerinden ve sayısal analizlerden elde edilen şekil değiştirme durumlarına bakıldığında ise 6,1 m dolgu altında Boru 7' de %0,4 oranında yatay şekil değiştirmede, 12,2 m dolgu altında olan Boru 8'de ise %1,1 oranında düşey şekil değiştirmede fark oluşmuştur.

E tipi olan Boru 13 ve Boru 14 borularının tacına etki eden düşey gerilmeler ile yan duvarına etki eden yanal gerilmeler ve bu borularda meydana gelen düşey şekil değiştirmeler ile yatay şekil değiştirmelerin arazi deneyi ve sayısal analiz sonuçlarına göre karşılaştırılması Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir.





Şekil 4.12. Boru 13'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

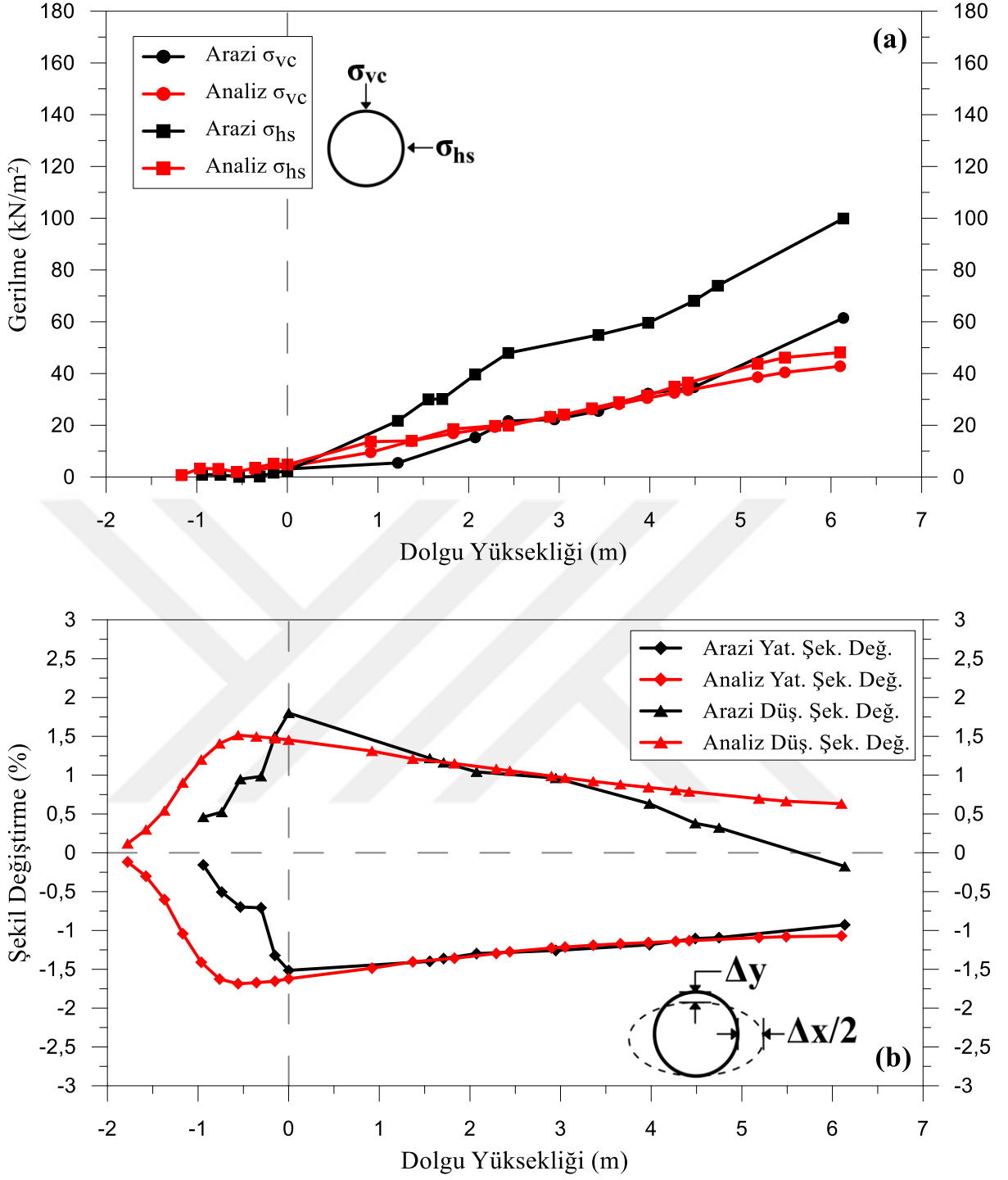


Şekil 4.13. Boru 14'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

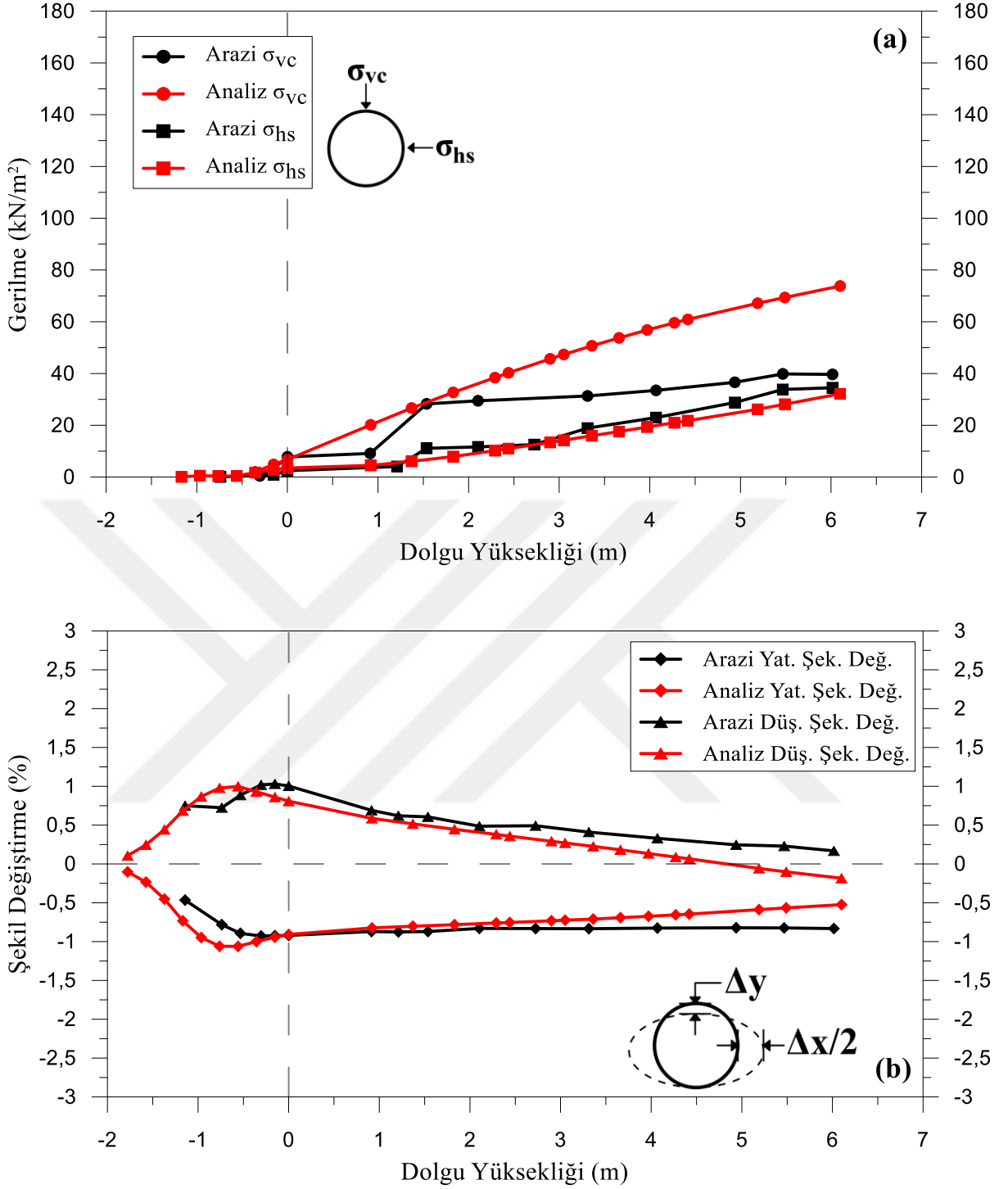
E tipi borulara etki eden gerilmeler incelendiğinde Boru 13 ve Boru 14'te sayısal analizler ile elde edilen değerler arazi deneylerinden elde edilen değerlerin üzerinde çıkmıştır. 6,1 m dolgu yükü altında Boru 13'e etki eden gerilmelerde Plaxis verileri ile arazi deneyi verileri arasındaki fark yaklaşık 30 kN/m<sup>2</sup> değerini bulmaktadır. 12,2 m dolgu yükü altındaki Boru 14'te ise bu fark boru tacına etki eden düşey gerilmelerde yaklaşık 20 kN/m<sup>2</sup> değerine, boru yan duvarına etki eden yanal gerilmelerde ise 45 kN/m<sup>2</sup> değerine ulaşmaktadır.

E tipi borularda meydana gelen şekil değiştirmeler incelendiğinde Boru 14'e ait olan arazi deneyi verileri ile sayısal analiz verilerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Boru 13'te 6.1 m dolgu altında düşey şekil değiştirme eğrileri uyumlu iken yatay şekil değiştirmede yaklaşık %0,30 oranında bir fark vardır.

F tipi olan Boru 16 ve Boru 18 borularının tacına etki eden düşey gerilmeler ile yan duvarına etki eden yanal gerilmeler ve bu borularda meydana gelen düşey şekil değiştirmeler ile yatay şekil değiştirmelerin arazi deneyi ve sayısal analiz sonuçlarına göre karşılaştırılması Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Boru 16'ya ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanıl gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler



Şekil 4.15. Boru 18'e ait arazi deneyi ve sayısal analizler sonucunda elde edilen gerilmeler ve şekil değiştirmeler a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler ve boru yan duvarına etki eden yanal gerilmeler b) Boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler

Boru 16'da arazi deneyi ve sayısal analizlere ait boru tacına etki eden düşey gerilme eğrileri birbirleri ile uyumludur. Ancak 6,1 m dolgu altında boru yan duvarına etki eden yanal gerilmelerde arazi deneyi ölçümü sayısal analiz verilerinden yaklaşık 50 kN/m<sup>2</sup> daha fazladır. Boru 18'de ise boru yan duvarına etki eden yanal gerilme eğrileri uyumlu iken boru tacına etki

eden düşey gerilmede Plaxis'ten elde edilen gerilme değeri arazi deneylerinden elde edilen gerilme değerinden yaklaşık 35 kN/m<sup>2</sup> daha fazla bulunmuştur. Her iki boruda da arazi deneyine ve sayısal analiz sonuçlarına ait şekil değiştirme eğrilerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Arazi deneyi ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırıldığı grafikler incelendiğinde bazı borularda istenildiği seviyede uyum yakalanamadığı görülmektedir. Bu borulara ait grafikler incelendiğinde gerilme grafiklerinde uyum olmasa bile şekil değiştirmeler uyumlu olarak elde edilmiştir ya da tam tersi şekil değiştirmeler uyumlu olmasa bile gerilme eğrileri uyumlu olarak elde edilmiştir. Uyumlu olmayan şekil değiştirme grafiklerindeki eğrilerin eğilimlerine bakılacak olursa arazi deneyinde ve sayısal analizlerde boruların benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Bu durumlar birlikte değerlendirilerek modellenmenin yeterli olduğu görülüp EPS geofam malzemenin borulara olan etkisinin belirlenmesi için çalışmaya devam edilmiştir. Bölüm 5'te EPS geofam malzemenin boru duvarlarına etki eden gerilmelere ve borularda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmelere etkileri incelenmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.

## 5. EPS GEOFOAM MALZEMENİN ARAZİ DENEYLERİ ÜZERİNDE KULLANIMININ SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ

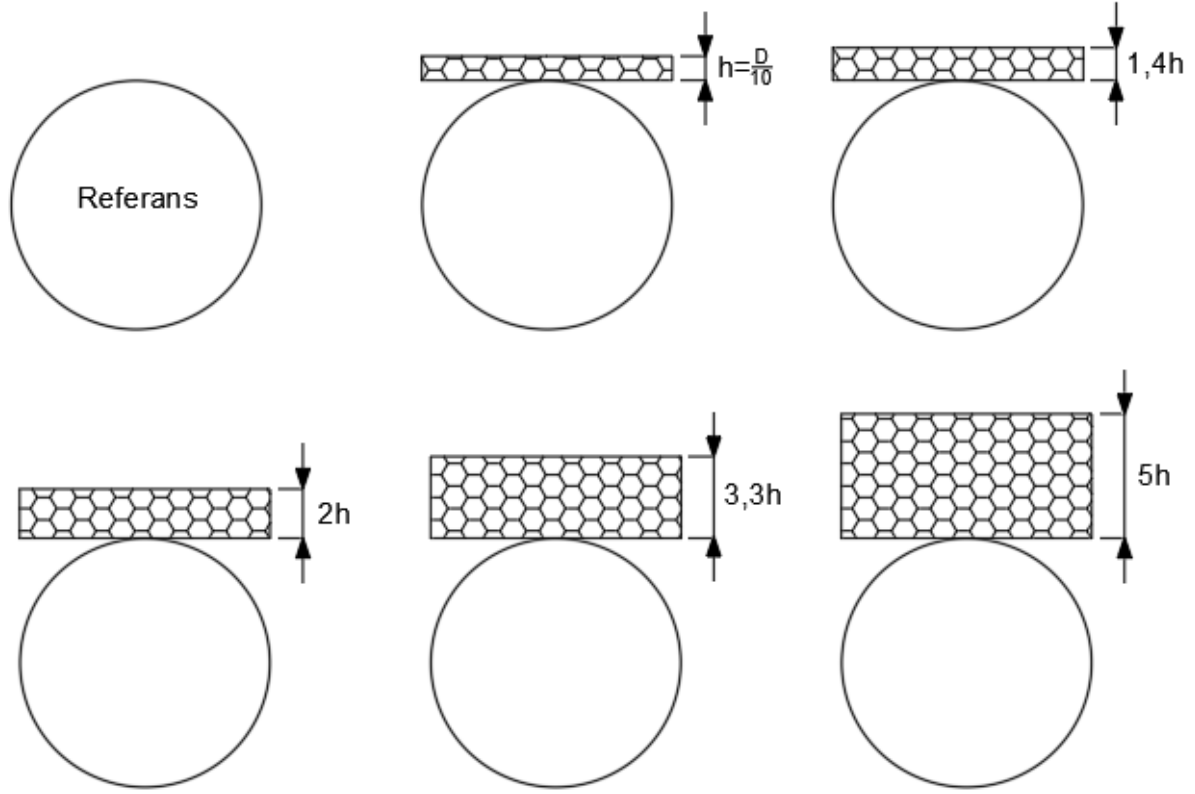
EPS geofom malzemenin borular üzerindeki etkisi Derin Gömü Projesi kapsamında gerçekleştirilen arazi deneyleri üzerinde sayısal analizlerle incelenmiştir. Arazi deneyleri farklı çaplardaki borular, farklı geri dolgu türleri ve farklı dolgu yükseklikleri durumlarını sağlamıştır. Bu durumlar altında EPS geofom malzemenin etkinliği araştırılmıştır. Bir önceki bölümde arazi deneylerinin Plaxis programında gerçekleştirilen kalibrasyonu anlatılmıştır. Bu bölümde ise EPS malzemenin etkinliği oluşturulan kalibrasyon modelleri üzerinden incelenmiştir.

### 5.1. EPS Geofom Malzeme Kalınlığının Değişimi

Bu çalışmada esas olarak boru üzerine yerleştirilen EPS malzeme kalınlığı değişimin boru üzerine etkiyen gerilmeler ve boruda meydana gelen şekil değiştirmeler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Borunun taç seviyesinin üzerine yerleştirilen EPS'nin kalınlığı boru çapına göre belirlenmiştir. Belirlenen kalınlıklar boru çapına göre  $D/10$ ,  $D/7$ ,  $D/5$ ,  $D/3$  ve  $D/2$  oranlarında belirlenmiştir. Boru çapına göre belirlenen “ $D/10$ ” oranı “ $h$ ” olarak ifade edilip diğer kalınlık oranları bu oranın katı olarak belirtilmiştir. Boru çaplarına bağlı olarak belirlenen EPS kalınlık değerleri Çizelge 5.1’de, kalınlık değişimlerinin şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Belirlenen oranlar ve boru çapları dikkate alınarak belirlenen EPS geofom kalınlıkları

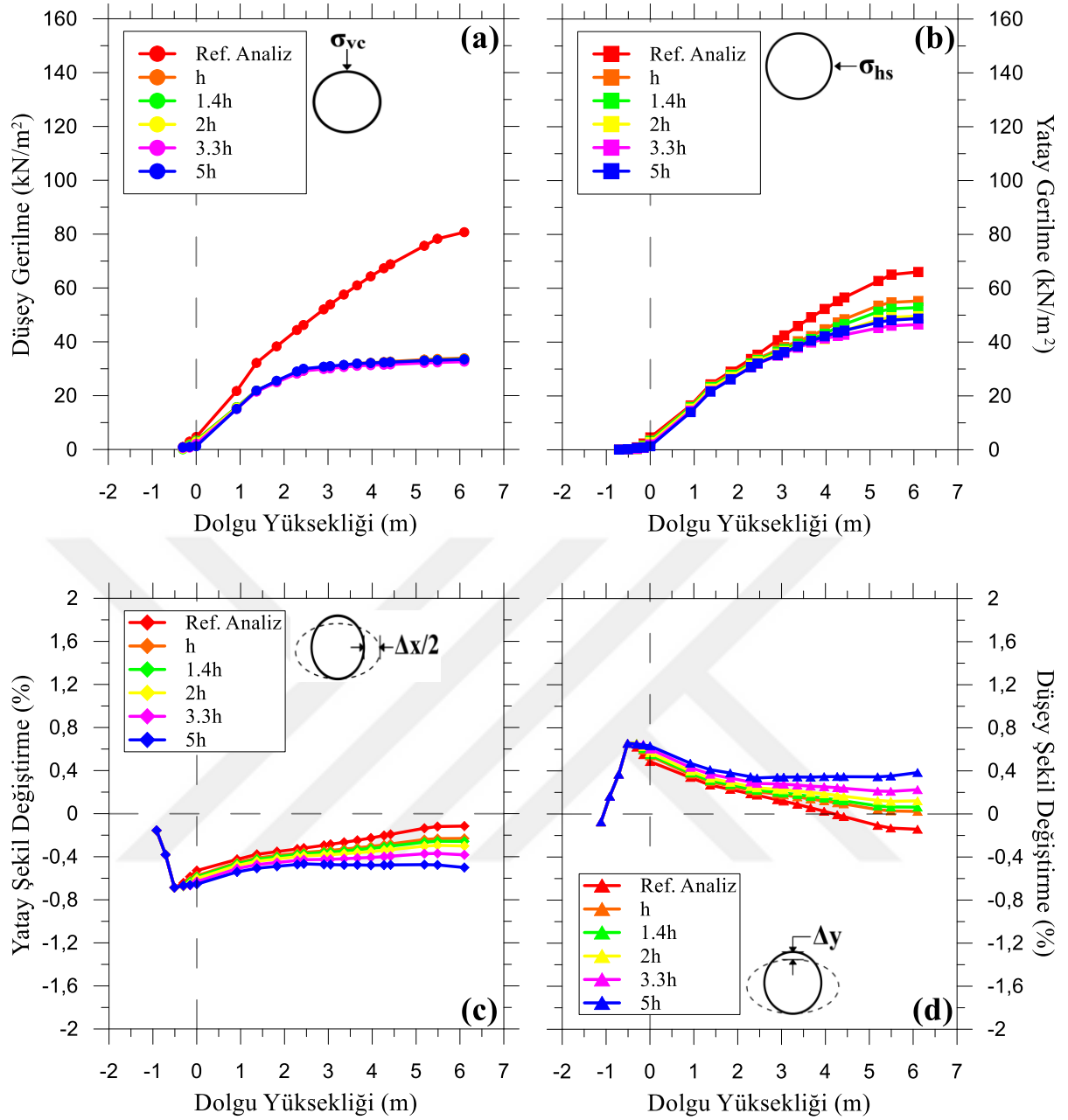
Boru Çapları	EPS Geofom Kalınlıkları (cm)				
	$h$ ( $D/10$ )	$1,4h$ ( $D/7$ )	$2h$ ( $D/5$ )	$3,3h$ ( $D/3$ )	$5h$ ( $D/2$ )
0,762 m	7	10	15	25	38
1,067 m	10	15	20	35	50
1,524 m	15	20	30	50	76



Şekil 5.1. EPS geofoaam kalınlık değişiminin Şematik gsterimi

EPS geofoaam kalınlıklarının incelenmesinde kullanılan EPS yoğunluğu  $15 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bu malzemeye ait ozellikler Şekil 4.4'te verilen grafiklerden elde edilip analizler geręekleřtirilmiřtir. Analizlerin geręekleřtirilmesinden sonra gerilme ve Şekil değiştirmede meydana gelen değişimlerin belirlenmesi için elde edilen sonuçlar referans durumla karşılaştırılmıştır. Referans durum ise bir önceki bölümde yer alan grafiklerde ‘‘Analiz’’ olarak ifade edilip arazi deneyinin Plaxis 2D programında kalibrasyonu yapılarak elde edilmiştir. Analizlerden elde edilen veriler grafiklerle sunulmuştur. Bu grafiklerde EPS'li durumlar  $h$ ,  $1,4h$ ,  $2h$ ,  $3,3h$  ve  $5h$  olarak ifade edilmiştir. Referans durum ise önceki bölümlerle devamlılığı sağlamak ve EPS'li durumlarla ilgili veriler analizlerle elde edilmesinden dolayı karışıklık olmaması için ‘‘Ref. Analiz’’ olarak ifade edilmiştir. EPS kalınlık değişiminin incelendiği grafikler Şekil 5.2 – Şekil 5.11 arasında verilmiştir. Verilen her bir Şekilde dört farklı grafik yer almaktadır. Bu grafiklerden a boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimini, b boru yan duvarına etkiyen yanal gerilme değişimini, c boruda meydana gelen yatay Şekil değiştirme farkını ve d ise boruda meydana gelen düşey Şekil değiştirme farkını gstermektedir.

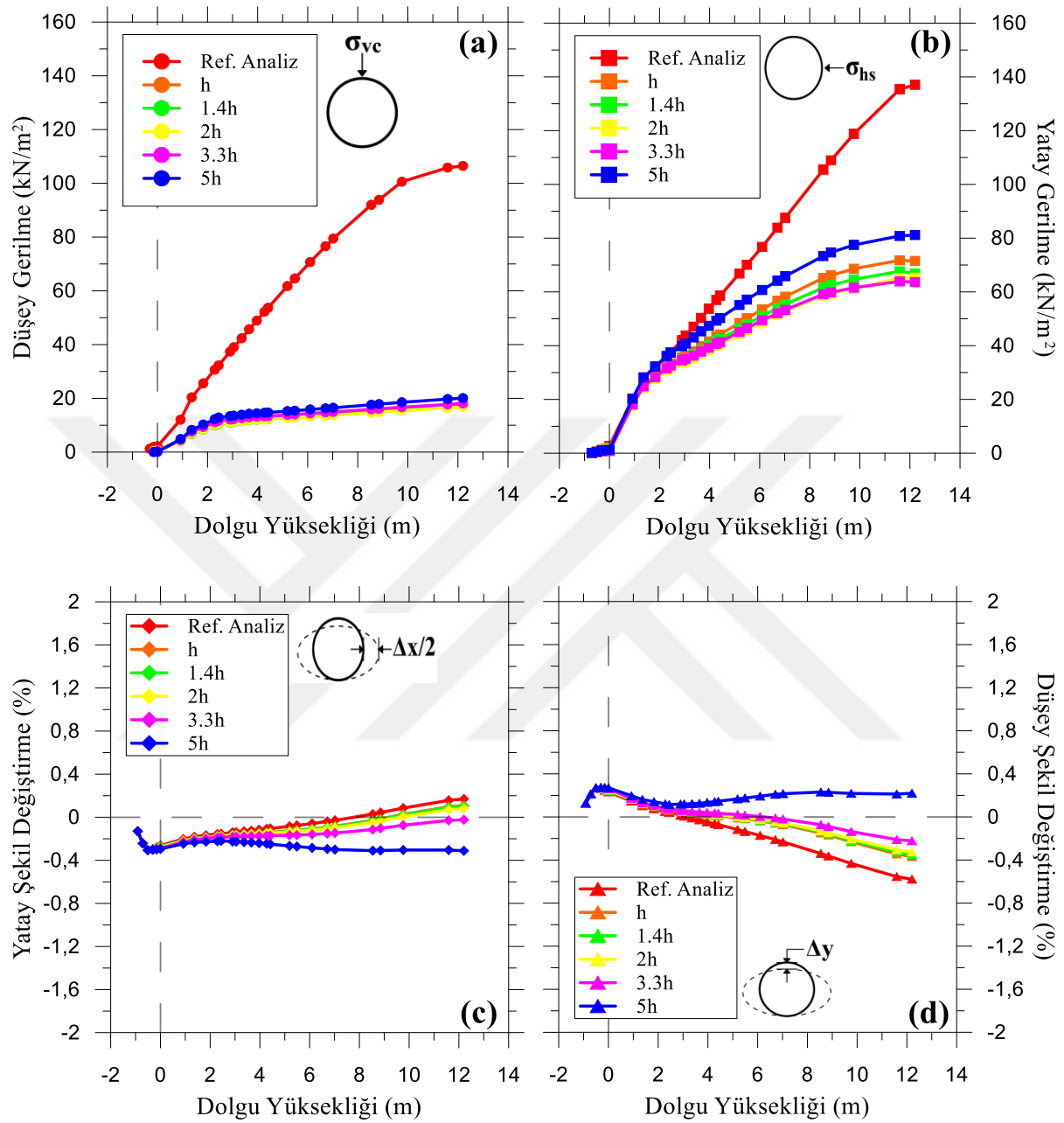




Şekil 5.2. Boru 1 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi

Boru 1 üzerine EPS geofom eklenmesi ile boru tacına etki eden düşey gerilme ortalama 45 kN/m<sup>2</sup> azalmıştır ancak elde edilen yatay gerilme değerleri EPS kalınlığının artışıyla önemli derecede etkilenmediği görülmektedir. Boru yan duvarına etkiyen gerilmelerdeki azalma ise 10 kN/m<sup>2</sup> ile 20 kN/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Şekil değiştirmeler incelendiğinde ise EPS kalınlığı arttıkça şekil değiştirmelerdeki azalma oranı artmıştır. EPS'nin 5h kalınlığında

hem yatay hem düşey şekil değiştirme eğrileri yaklaşık 2,5 m dolgu yüksekliğinden itibaren oldukça yatay bir seyir göstermiştir. Böylece şekil değişimini engellemiştir.

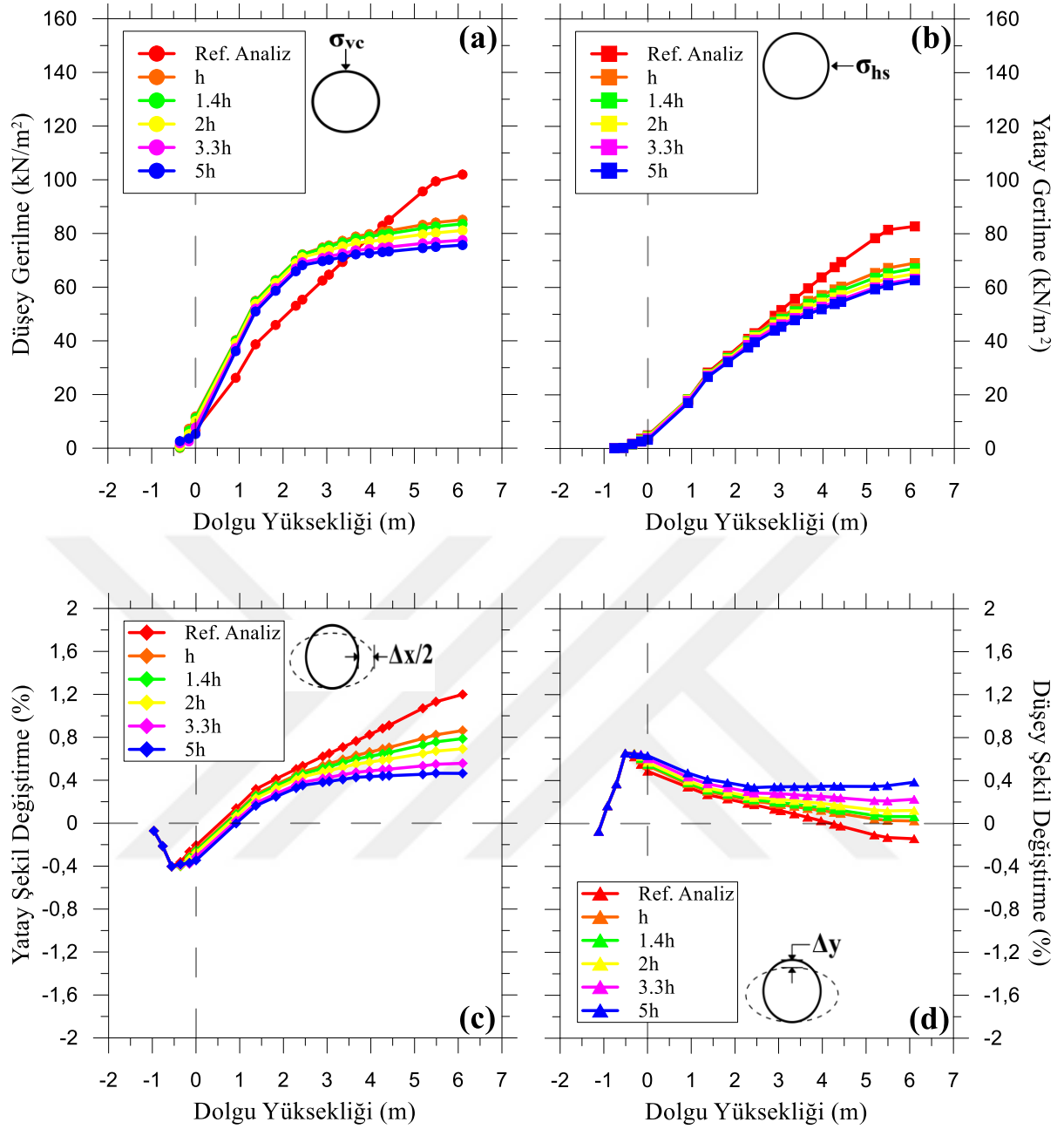


Şekil 5.3. Boru 2 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi

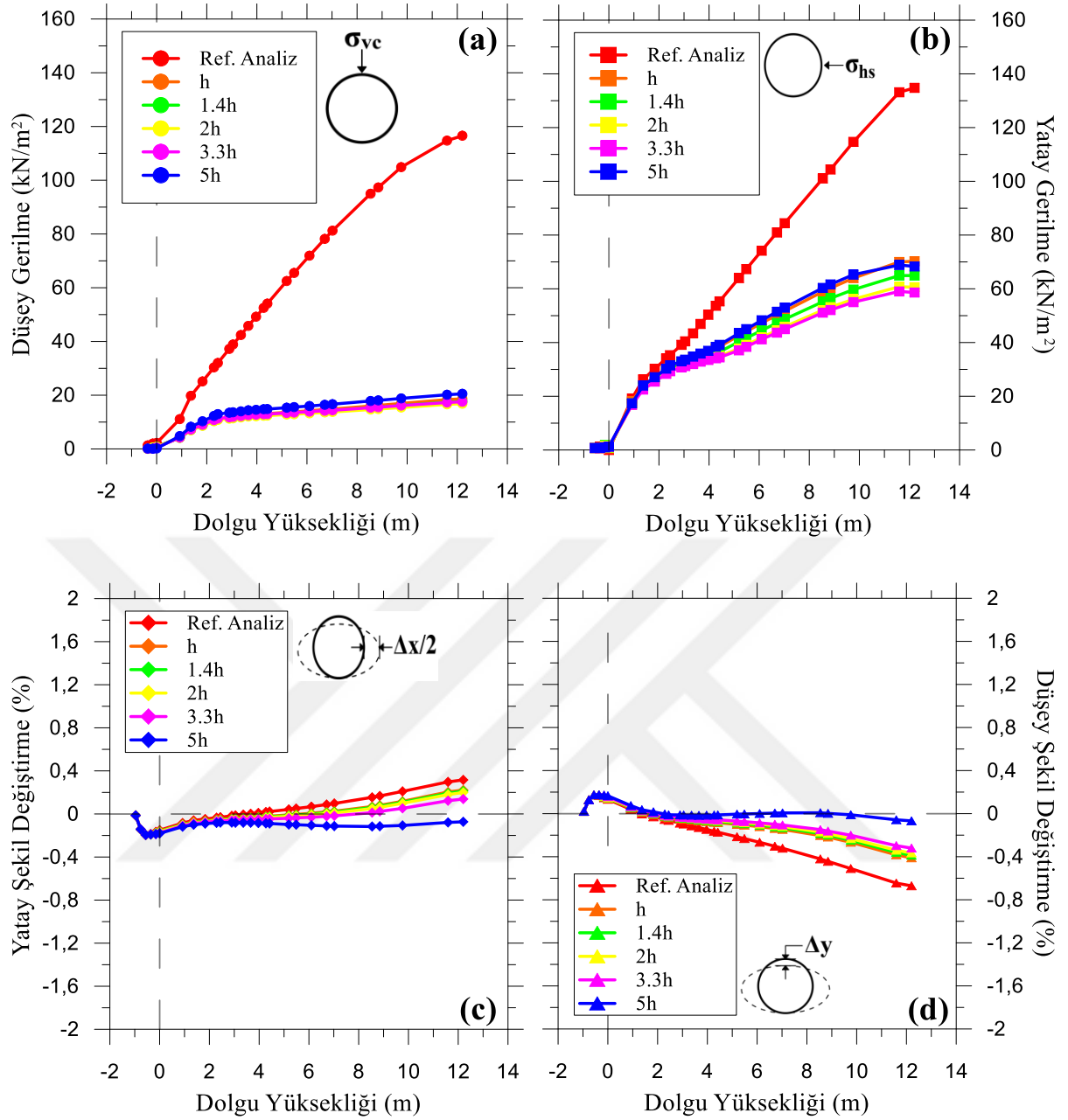
Boru 2 için boru tacına etkiyen düşey gerilmelerde ortalama  $85 \text{ kN/m}^2$  azalma meydana gelmiştir. Boru yan duvarına etkiyen gerilmelerde meydana gelen azalmalar ise  $65 \text{ kN/m}^2$  ile

73 kN/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. 5h kalınlığındaki EPS kalınlığı durumunda diğer EPS kalınlıklarına göre gerilmeler daha yüksek çıkmıştır. Boru 2’de meydana gelen şekil değiştirmeler incelendiğinde kalınlık değişimi ile şekil değiştirmeler azalmıştır ancak 5h EPS kalınlığında boru yatay ekseninde kısılma düşey ekseninde ise uzama eğilimi göstermektedir. 12,2 m dolgu yükü altında yatay şekil değiştirme referans durumunda %0,17 iken EPS ile birlikte %0,11 ile %-0,31 arasında, düşey şekil değiştirme referans durumunda %-0,57 iken EPS ile birlikte %-0,36 ile %0,22 arasında değişmiştir.

Grafikleri bir sonraki sayfada verilen Boru 4’ün taç seviyesine etkiyen zemin gerilmeleri EPS’li durumlarda referans duruma göre 15 kN/m<sup>2</sup> ile 25 kN/m<sup>2</sup> arasında azalma meydana gelmiştir. Grafikten de görüleceği üzere düşey gerilme önce referans gerilmelerin üzerine çıkıyor daha sonra yaklaşık 4 m dolgu seviyesinden itibaren gerilme değerleri referans gerilme değerlerinin altına iniyor. Boru yan duvarına etkiyen gerilmelerde ise 13 kN/m<sup>2</sup> ile 20 kN/m<sup>2</sup> arasında azalma meydana gelmiştir. Yatay şekil değiştirme oranı %1,2 seviyesinden %0,4 seviyesine kadar, düşey şekil değiştirme oranı ise %-1,4 seviyesinden %-0,5 seviyesine kadar azaltılmıştır.



Şekil 5.4. Boru 4 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değişirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değişirme değişimi

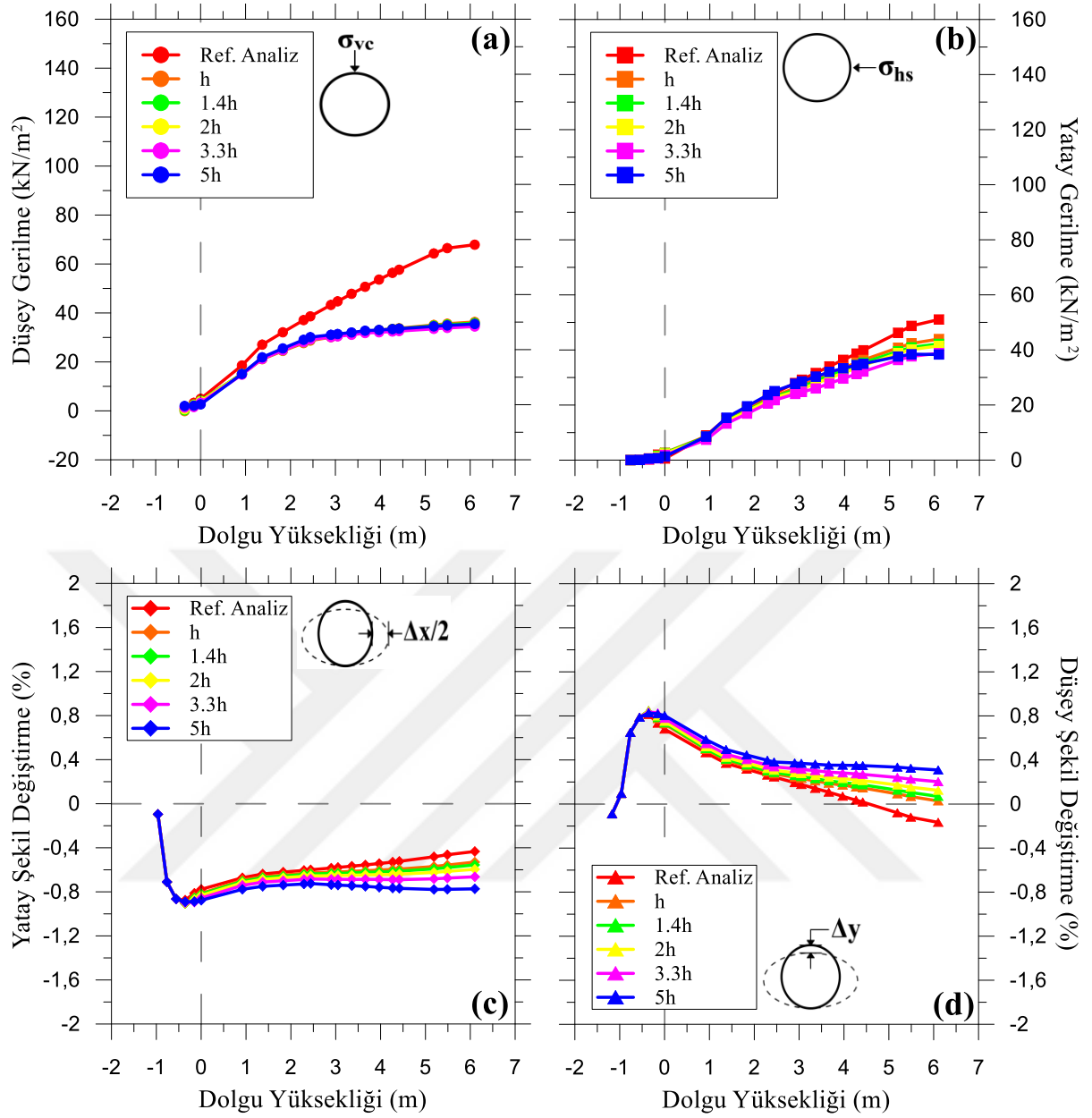


Şekil 5.5. Boru 5 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değişirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değişirme değişimi

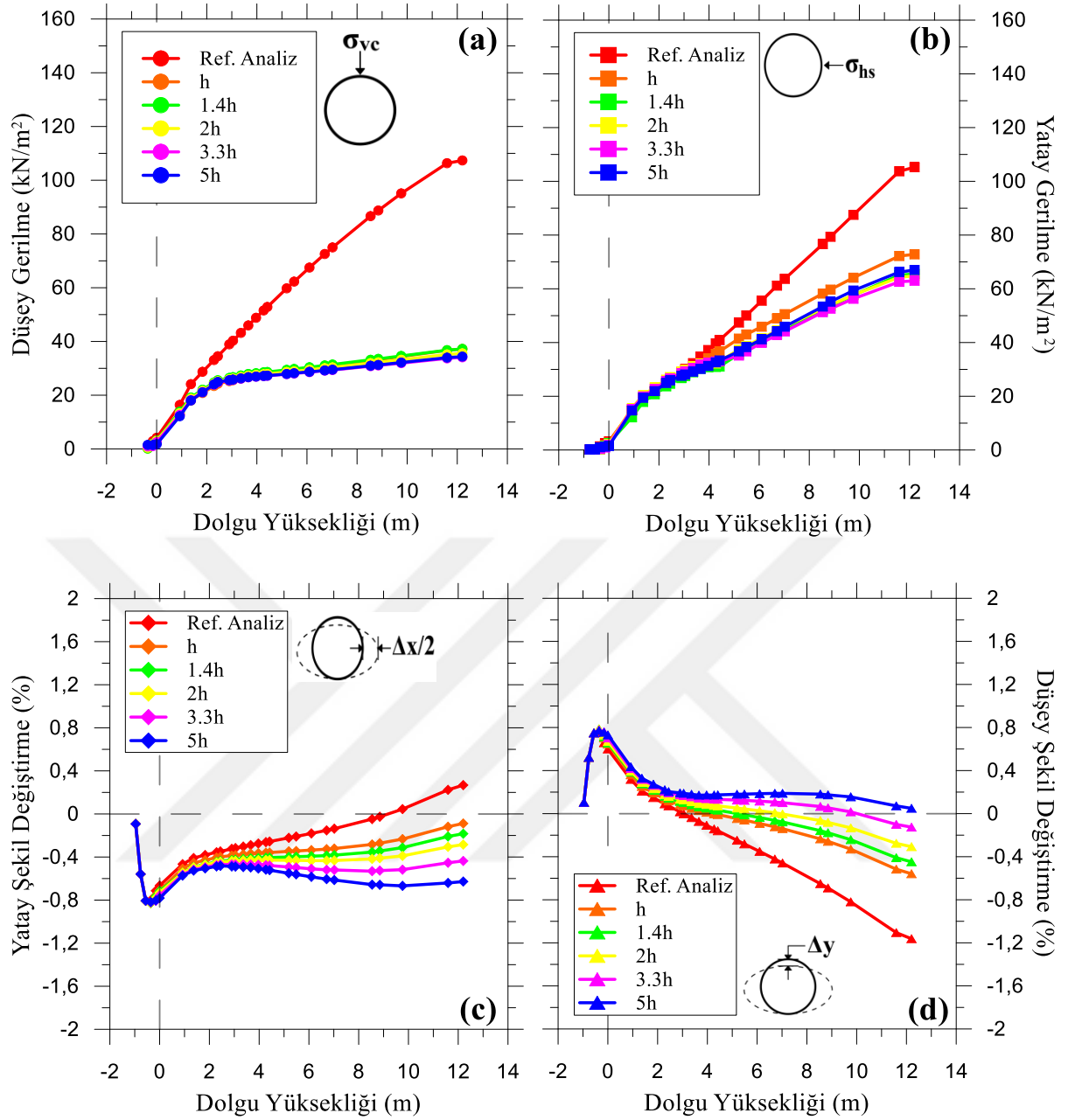
Boru 5 taç seviyesine etki eden düşey gerilmeler 115 kN/m<sup>2</sup> seviyesinden 20 kN/m<sup>2</sup> seviyesine inmiştir. Yan duvara etkiyen yanal gerilmelerde ise 65 kN/m<sup>2</sup> ile 76 kN/m<sup>2</sup> arasında azalmalar meydana gelmiştir. Yatay şekil değişirme oranı %0,3 seviyesinden -%0,07 seviyesine kadar, düşey şekil değişirme oranı ise %-0,6 seviyesinden %-0,06 seviyesine kadar azaltılmıştır. Böylece borunun yaptığı şekil değişirme neredeyse sıfırlanmıştır.

Grafikleri diğer sayfada olan Boru 7'nin ta seviyesine etki eden düşey gerilmeler 67 kN/m<sup>2</sup> seviyesinden 35 kN/m<sup>2</sup> seviyesine inmiştir, yan duvara etkiyen yanal gerilmelerde ise 43 kN/m<sup>2</sup> ile 38 kN/m<sup>2</sup> arasında azalmalar meydana gelmiştir. Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme oranı %-0,43 seviyesinden %-0,77 seviyesine kadar, düşey şekil değiştirme oranı ise %-0,17 seviyesinden %0,30 seviyesine ulaşmıştır.





Şekil 5.6. Boru 7 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değişirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değişirme değişimi



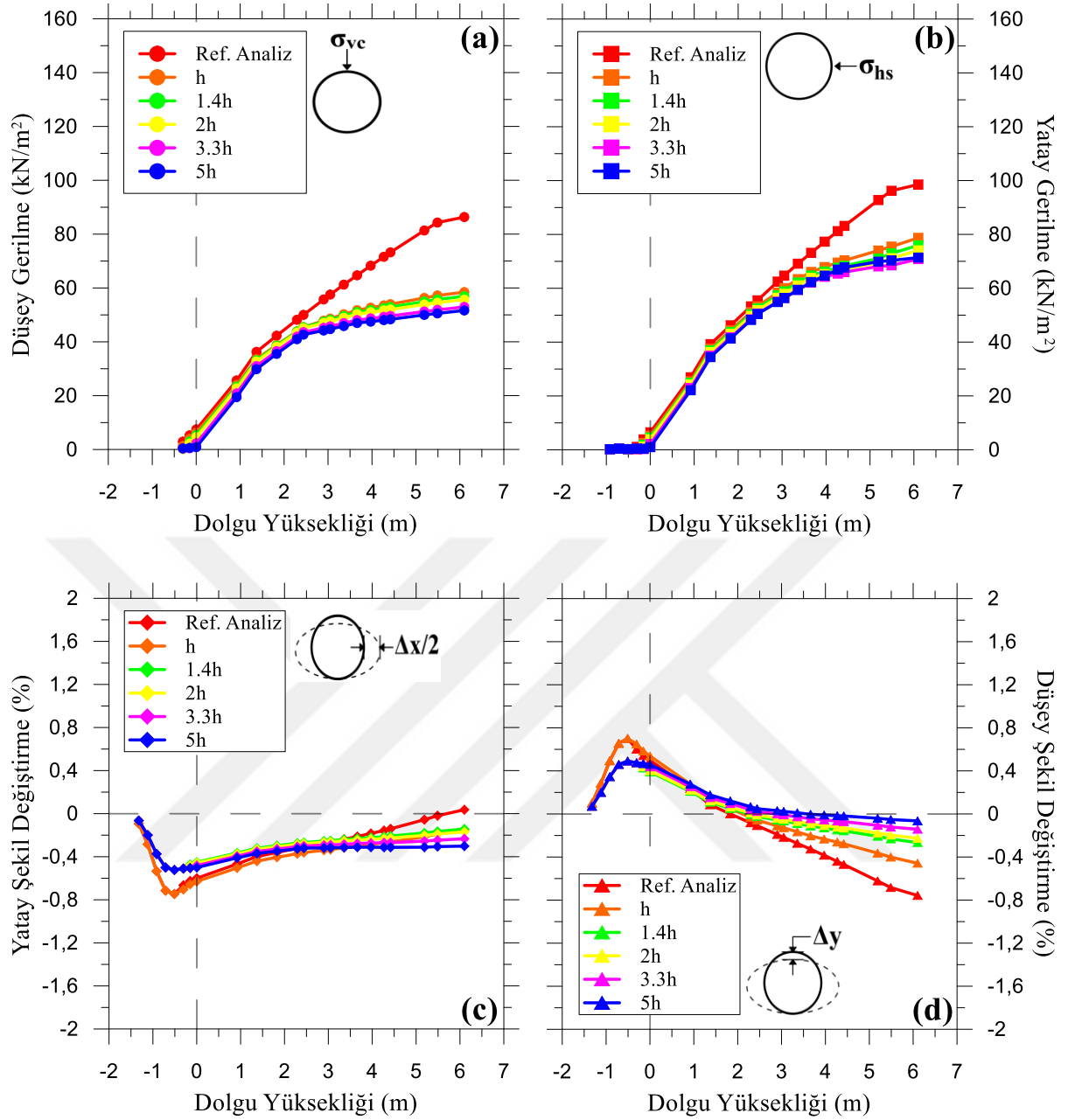
Şekil 5.7. Boru 8 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi

Boru 8'in taç seviyesine etki eden düşey gerilmeler  $110 \text{ kN/m}^2$  seviyesinden  $40 \text{ kN/m}^2$  seviyesine inmiştir. Yan duvara etkiyen yanıl gerilmelerde ise  $105 \text{ kN/m}^2$  seviyesinden yaklaşık  $70 \text{ kN/m}^2$  seviyesine kadar azalmıştır. Boru 8 şekil değiştirmeleri geniş bir aralıkta azalma göstermiştir. Yatay şekil değiştirme oranı  $\%0,27$  seviyesinden  $\%-0,62$  seviyesine kadar, düşey şekil değiştirme oranı ise  $\%-1,16$  seviyesinden  $\%0,05$  seviyesine ulaşmıştır.

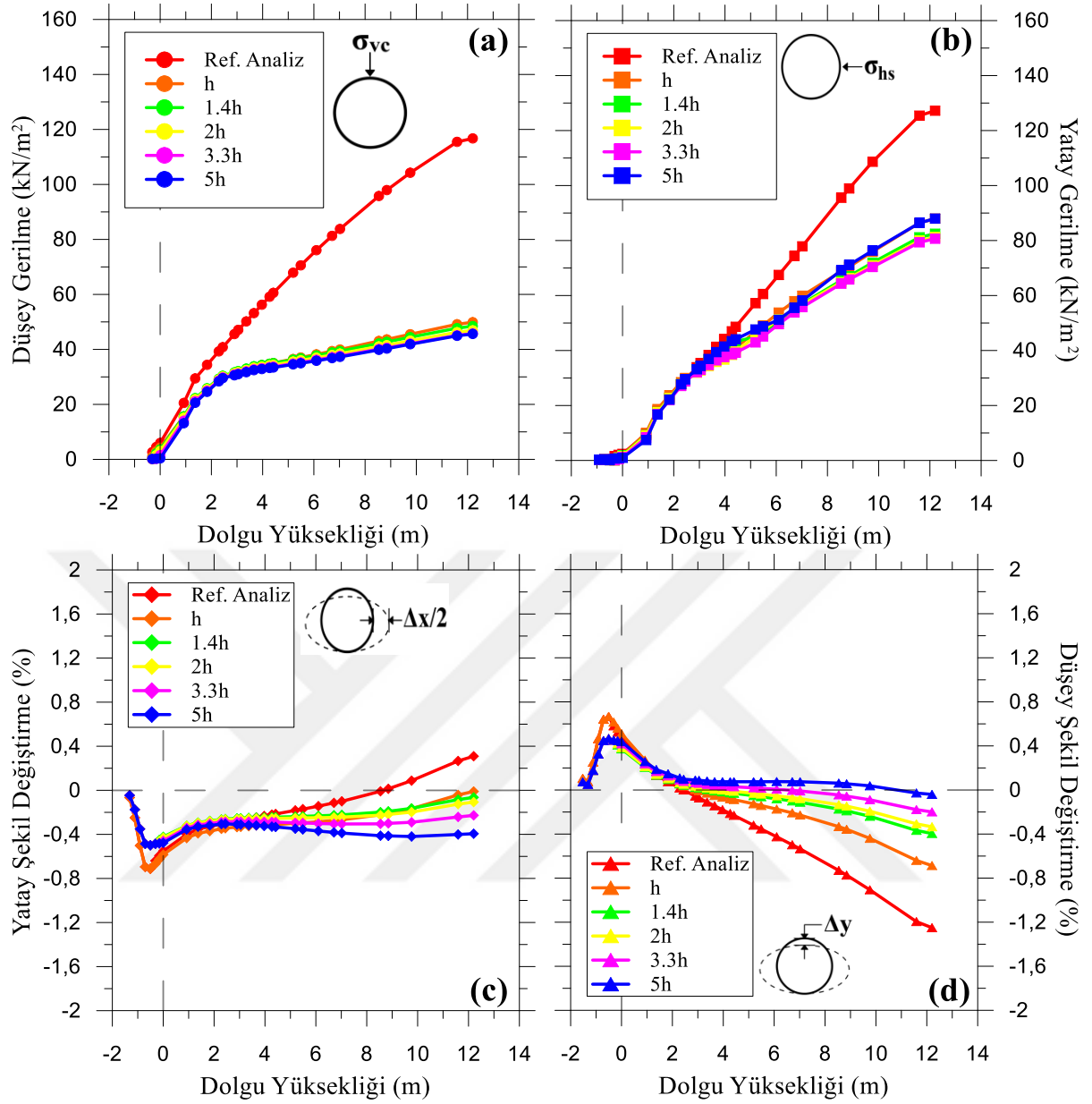


Grafikleri sonraki sayfada verilen Boru 13'ün ta seviyesine etki eden düşey gerilmeler yaklaşık 85 kN/m<sup>2</sup> seviyesinden 55 kN/m<sup>2</sup> seviyesine, boru yan duvarına etki eden yanall gerilmeler ise yaklaşık 100 kN/m<sup>2</sup> seviyesinden 75 kN/m<sup>2</sup> seviyesine inmiştir. Her iki gerilme türünde de EPS'li durumlarda elde edilen gerilmeler dar bir aralıkta değişim göstermiştir. Yatay şekil değiştirme oranı %0,04 seviyesinden %-0,30 seviyesine kadar, düşey şekil değiştirme oranı ise %-0,75 seviyesinden -%0.06 seviyesine ulaşmıştır. Yalnız her iki şekil değiştirmede de geri dolgu seviyesinde değişimler meydana gelmiştir.



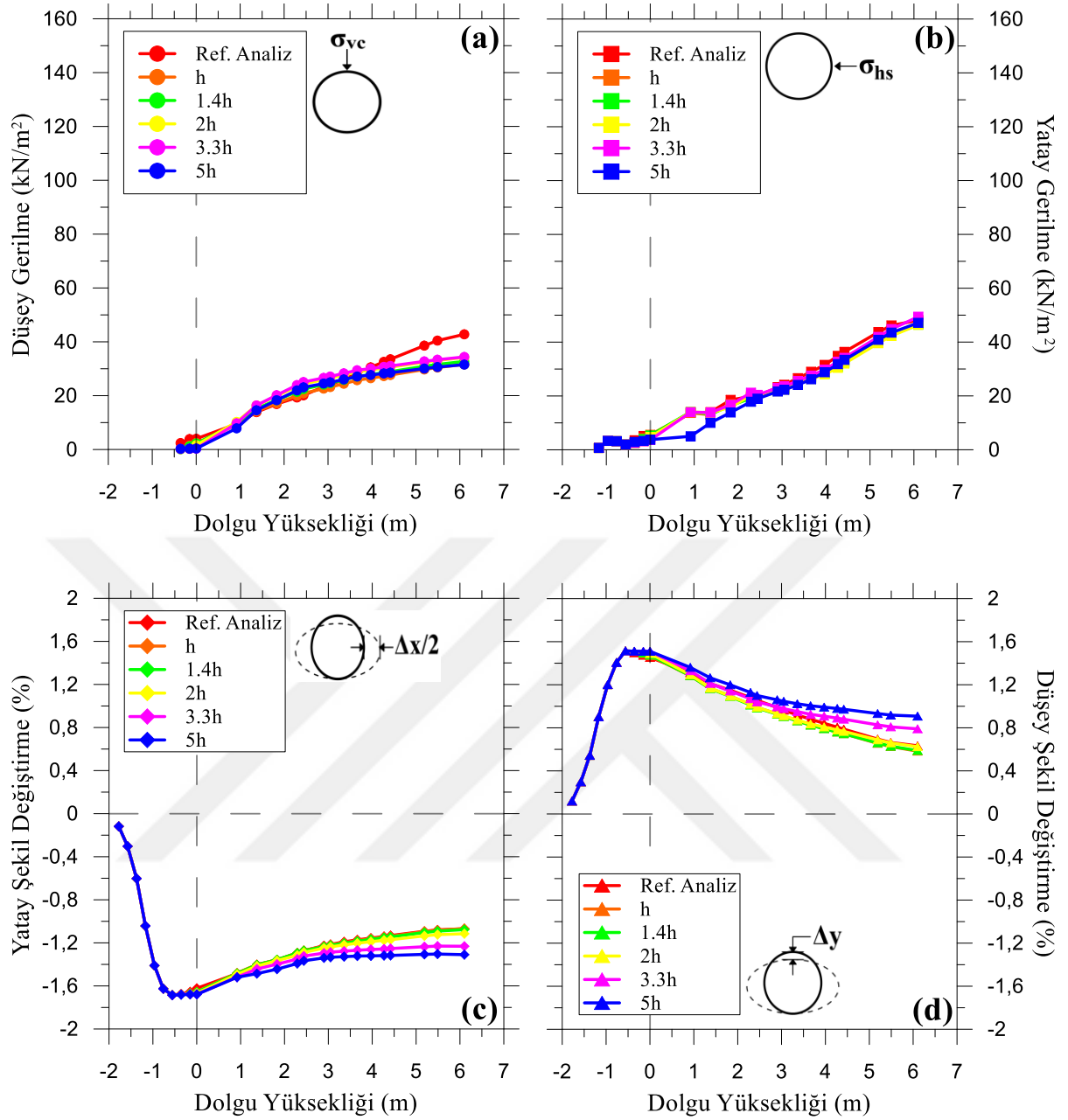


Şekil 5.8. Boru 13 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi



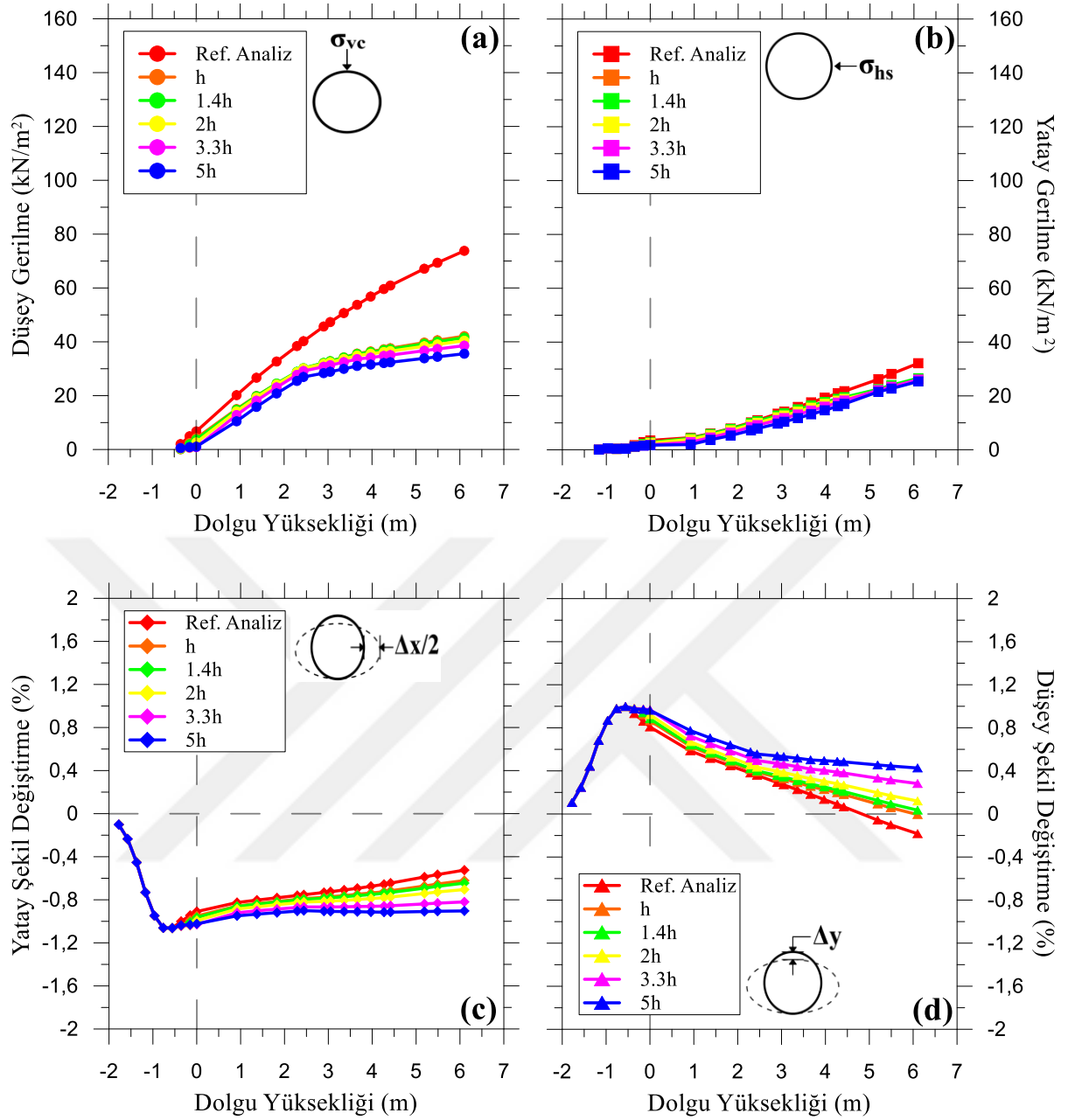
Şekil 5.9. Boru 14 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkileyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkileyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi

Boru 14'ün taç seviyesine etkileyen düşey gerilmeler 115 kN/m<sup>2</sup> seviyesinden 50 kN/m<sup>2</sup> seviyesine kadar azalırken, boru yan duvarına etkileyen yanal gerilmeler ise 125 kN/m<sup>2</sup> seviyesinden yaklaşık 85 kN/m<sup>2</sup> seviyesine inmiştir. Yatay şekil değiştirme oranı %0,30 seviyesinden %-0,4 seviyesine kadar, düşey şekil değiştirme oranı ise %-1,25 seviyesinden %-0,04 seviyesine kadar ulaşmıştır.



Şekil 5.10. Boru 16 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi

Boru 16'nın tacına etkiyen gerilmelerde yaklaşık  $10 \text{ kN/m}^2$  azalma gözlenirken, boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmelerde önemli bir değişiklik olmadığı grafiklerde görülmektedir. Yatay şekil değiştirme oranı  $\% -1,07$  seviyesinden  $\% -1,3$  seviyesine kadar, düşey şekil değiştirme oranı ise  $\% 0,63$  seviyesinden  $\% 0,9$  seviyesine kadar ulaşmıştır.



Şekil 5.11. Boru 18 için EPS kalınlığı değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değişirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değişirme değişimi

Boru 18'e ait grafikler diğer sayfada verilmiştir. Boru 18'nin tacına etkiyen gerilmelerde yaklaşık  $30 \text{ kN/m}^2$  azalma gözlenirken, Boru 16'da olduğu boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmelerde önemli bir değişiklik olmadığı grafiklerde görülmektedir. Yatay şekil değişirme oranı  $\% -0,5$  seviyesinden  $\% -0,9$  seviyesine kadar, düşey şekil değişirme oranı ise  $\% -0,2$  seviyesinden  $\% 0,4$  seviyesine kadar ulaşmıştır.

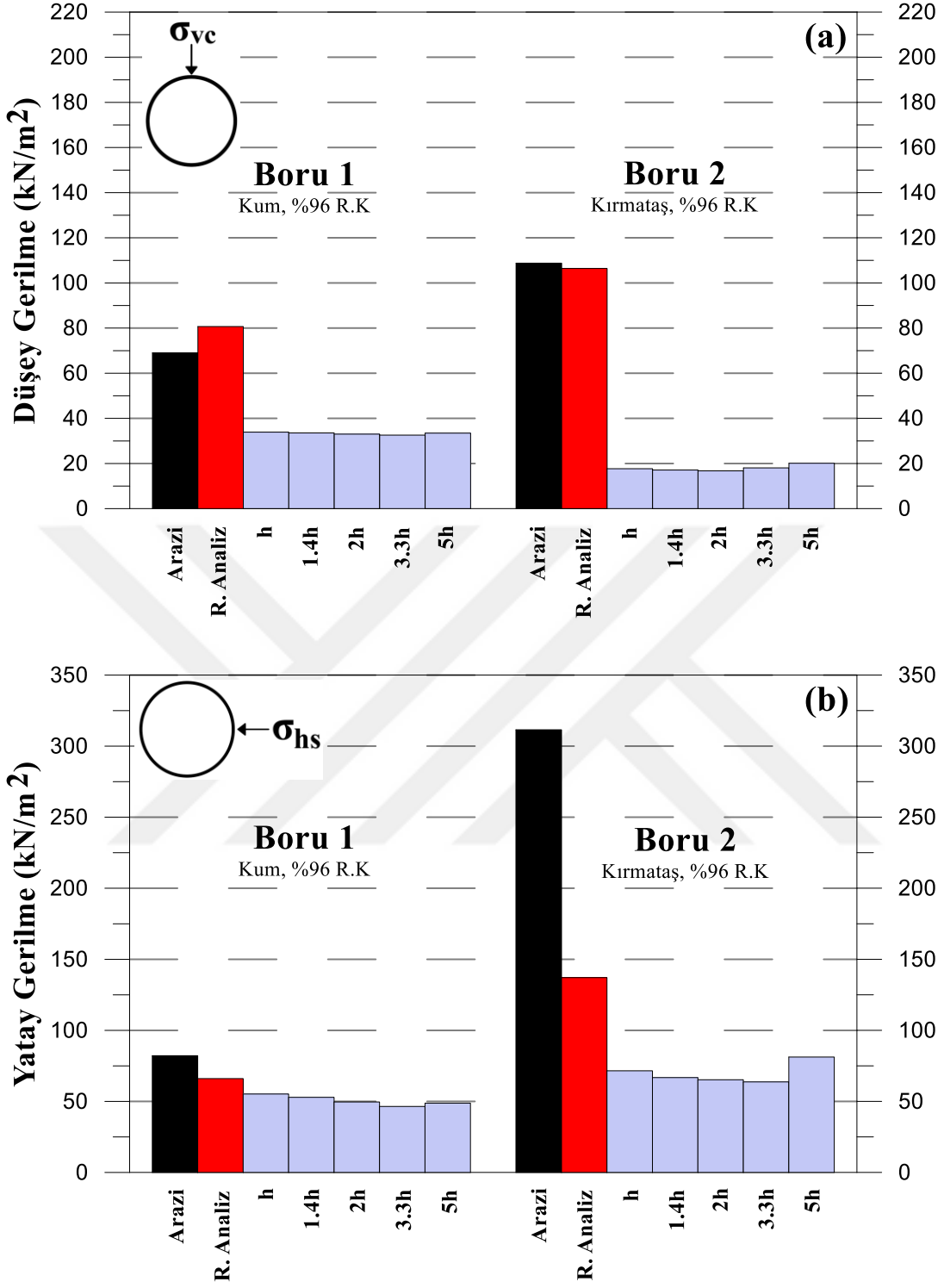
Verilen bu grafiklerde göze çarpan ilk durum boru tacına etki eden düşey gerilme grafiklerinde EPS'li durumları temsil eden eğrilerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bazı eğrilerin üst üste bindiği (1 ve 7 nolu borular gibi), bazılarında ise önemli olmayan bir gerilme aralığında değişim gösterdiği (4, 8 ve 13 nolu borular gibi) görülmektedir. Düşey gerilme grafiklerinde görülen bir diğer durum ise bazı borularda EPS kullanımı ile gerilme değerleri önce referans gerilmelerin üzerine çıkıp daha sonra azalma eğilimi göstermektedir (4 ve 16 nolu borular). Boru tacına etkileyen düşey gerilmeler için bir başka durum ise 12,2 m dolgu yükü altına gerilmelerde meydana gelen azalma 6,1m dolgu yüküne göre daha fazladır.

Boru yan duvarına etkileyen yatay gerilme grafikleri incelendiğinde bu gerilmelerde boru tacına etkileyen düşey gerilmelerden daha az azalma olduğu görülmektedir. Boruya etkileyen yatay gerilmeler bazı borular hariç belirli bir gerilme aralığında değişim göstermektedir. Bunlarla birlikte Boru 16 yan duvarına etkileyen yatay gerilmelerde EPS'li durumlar referans durumla karşılaştırıldığında gerilmelerde bir değişim olmadığı söylenebilir.

Şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde eğriler belirli aralıklarda değişmektedir. Bu aralıklar bazı borular için (7 nolu boru gibi) dar bir aralıkken, bazı borular için (4 ve 8 nolu borular gibi) geniş bir aralık olmaktadır. Grafiklerde de görüleceği üzere 5h kalınlığındaki EPS'li durumu temsil eden eğri, referans durumu temsil eden eğriden en uzak konumda yer almaktadır. Yani şekil değiştirmeleri en fazla azaltan EPS kalınlığı 5h'tır.

Sonraki sayfalarda verilen sütun grafikler ile maksimum dolgu yükü altında (6,1 m ve 12,2 m dolgu yükü) boruya etki eden gerilmelerdeki değişimler hendek içerisindeki geri dolgu türü ve relatif kompaksiyon oranları da belirtilerek verilmiştir. Böylece geri dolgu malzemesi ve relatif kompaksiyonun etkinliği hakkında da yorumlar yapılabilecektir. Grafiklerdeki gerilme verileri boru tiplerine göre verilmiştir. Grafiklerde yine EPS'li durumlarda elde edilen gerilme değerleri referans durumla karşılaştırılmıştır.

A tipi borulara ait boru tacına etki eden düşey gerilme verileri Şekil 5.12a'da, boru yan duvarına etkileyen yatay gerilme verileri Şekil 5.12b'de verilmiştir.



Şekil 5.12. A tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler

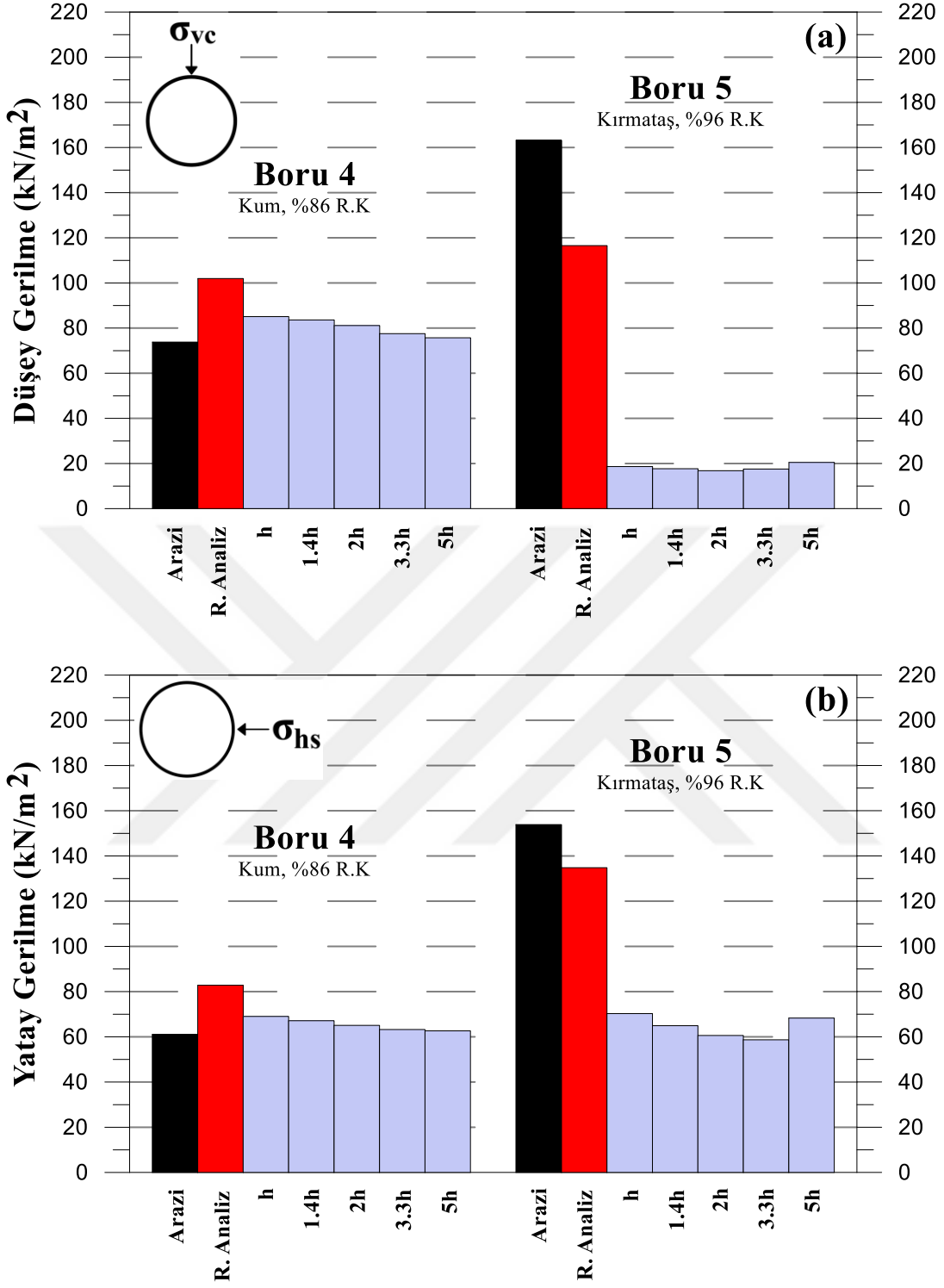
A tipi borulara ait gerilme grafikleri incelendiğinde kırmataş geri dolguya sahip borularda hem düşey gerilmelerde hem de yatay gerilmelerde meydana gelen azalma kum geri dolguya göre daha fazla olduğu görülmektedir. 1 ve 2 nolu borular için sırasıyla boru tacına

etki eden düşey gerilmede %58 ve %83 oranında azalma meydana gelirken, boru yan duvarına etkiyen gerilmede ise %24 ve %48 oranında azalma oluşmuştur. Bu oranlardan da görüldüğü gibi Boru 2’de meydana gelen azalma Boru 1’e göre daha fazladır. Bu durum Boru 2’nin geri dolgu malzemesinin kırmataş olmasıyla birlikte bu boru üzerindeki dolgu yüksekliğinin Boru 1’e göre iki katı olmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerden görülen bir diğer durum ise EPS kalınlığının artması ile gerilmelerde azalma miktarı ufakta olsa devam etmiştir ancak 5h EPS kalınlığında gerilmelerde bir artış yaşanmıştır. Bu artış düşey gerilmelerde oldukça küçük olsa da yatay gerilmelerde fark edilmektedir. Özellikle Boru 2’de yaklaşık 20 kN/m<sup>2</sup>’lik bir artış yaşanmıştır.

B tipi borulara ait boru tacına etki eden düşey gerilme verileri Şekil 5.13a’da, boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme verileri Şekil 5.13b’de verilmiştir.

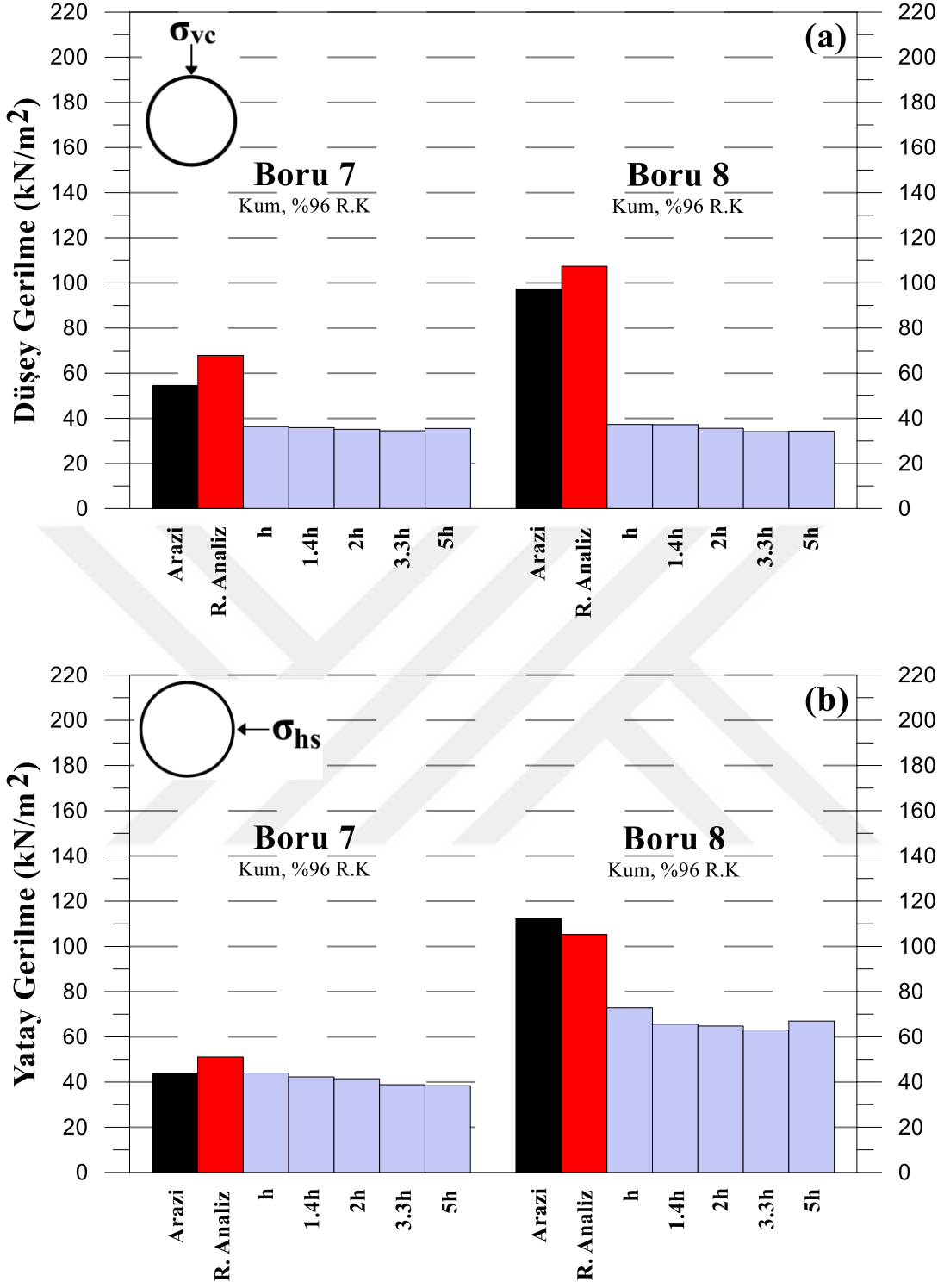
B tipi borular olan 4 ve 5 nolu borular için sırasıyla boru tacına etki eden düşey gerilmede %19 ve %84 oranında azalma meydana gelirken, boru yan duvarına etkiyen gerilmede ise %20 ve %55 oranında azalma meydana gelmiştir. Burada %86 Relatif kompaksiyon oranında sıkıştırılan kum geri dolguya sahip Boru 4’ü, %96 Relatif kompaksiyon oranında sıkıştırılan kum geri dolguya sahip Boru 1 ile karşılaştırılabilir. Bu durumda daha düşük rijitlikte geri dolguya sahip Boru 4’te boru tacına etki eden düşey gerilmedeki azalma oranı, daha yüksek rijitlikte geri dolguya sahip olan Boru 1’e göre oldukça az olduğu görülmektedir. Yine kırmataş geri dolguya sahip borulardaki gerilme azalma oranı kum geri dolguya göre fazla olduğu görülmektedir.





Şekil 5.13. B tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler

C tipi borulara ait boru tacına etki eden düşey gerilme verileri Şekil 5.14a'da, boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme verileri Şekil 5.14b'de verilmiştir.



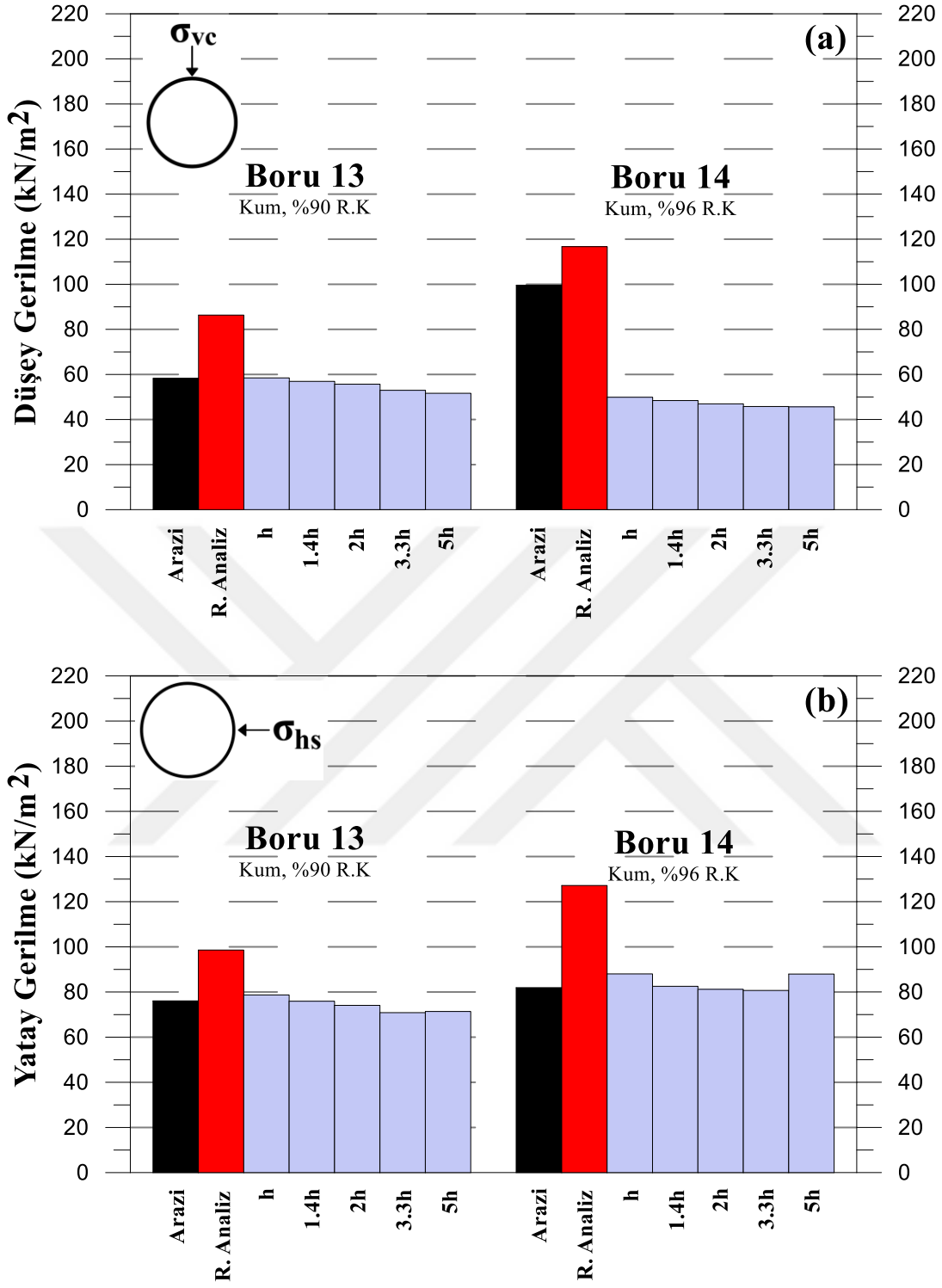
Şekil 5.14. C tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler

C tipi borular olan 7 ve 8 nolu borular için sırasıyla boru tacına etki eden düşey gerilmelerde %46 ve %65 oranında azalma meydana gelirken, boru yan duvarına etkiyen gerilmelerde ise %19 ve %38 oranında azalma meydana gelmiştir. B-B' ekseninde yer alan Boru

2 ve Boru 5'ten sonra gelen Boru 8'de geri dolgu malzemesinin kum olmasıyla birlikte gerilmelerde meydana gelen azalma oranının azaldığı görülmüştür.

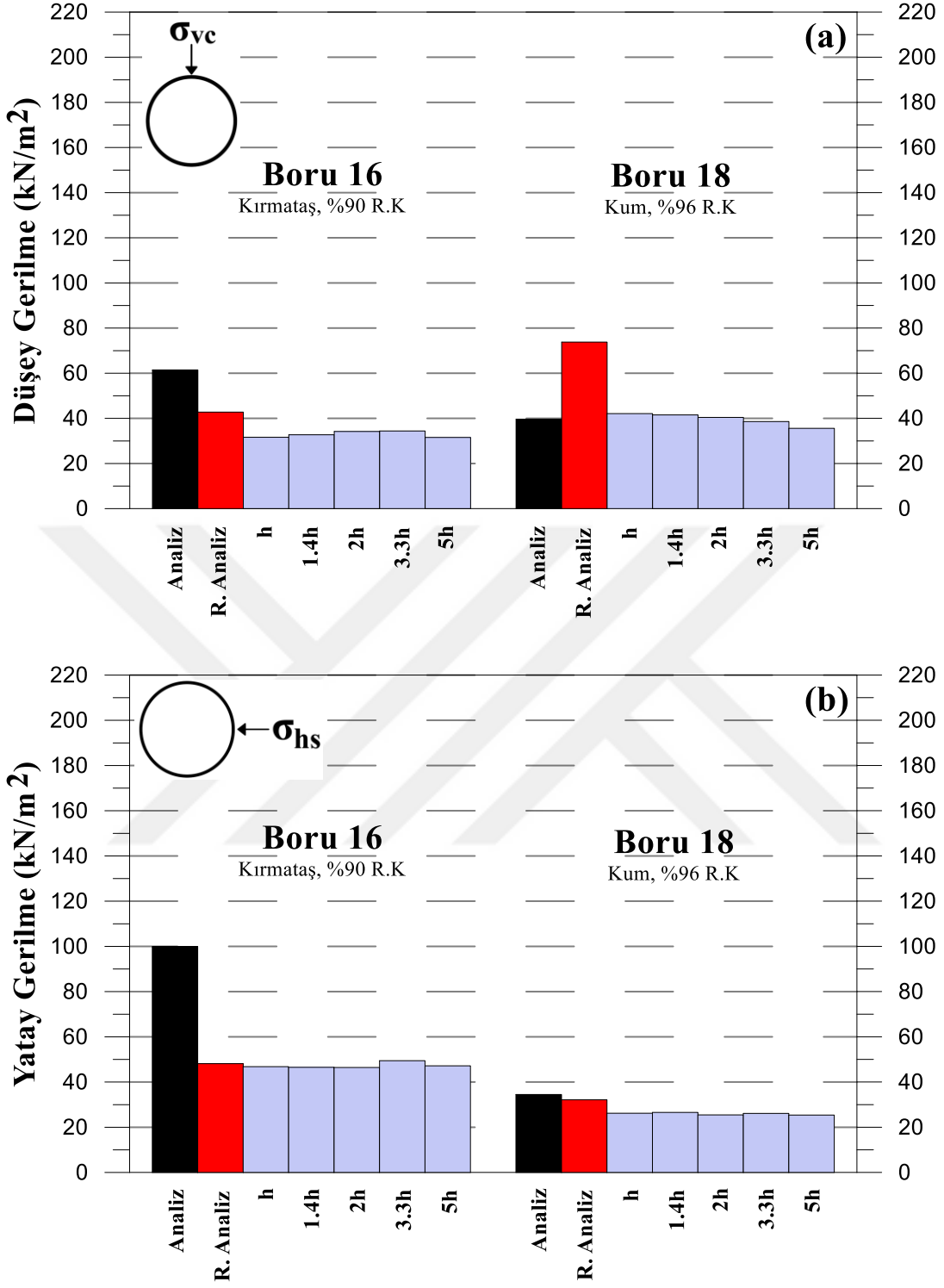
E tipi borulara ait boru tacına etki eden düşey gerilme verileri Şekil 5.15a'da, boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme verileri Şekil 5.15b'de verilmiştir. E tipi borular olan 13 ve 14 nolu borular için sırasıyla boru tacına etki eden düşey gerilmelerde %36 ve %60 oranında azalma meydana gelirken, boru yan duvarına etkiyen gerilmelerde ise %24 ve %36 oranında azalma meydana gelmiştir. Grafikler incelendiğinde daha kalın dolgu altında olan ve daha yüksek relatif kompaksiyon oranındaki Boru 14'te gerilmelerde meydana gelen azalma oranları Boru 13'e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Küçük çaplı borularda kırmataş geri dolgunun gerilmeleri azaltma konusunda sağladığı fayda bu tip borularda görülmemiştir.





Şekil 5.15. E tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler

F tipi borulara ait boru tacına etki eden düşey gerilme verileri Şekil 5.16a'da, boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme verileri Şekil 5.17b'de verilmiştir.



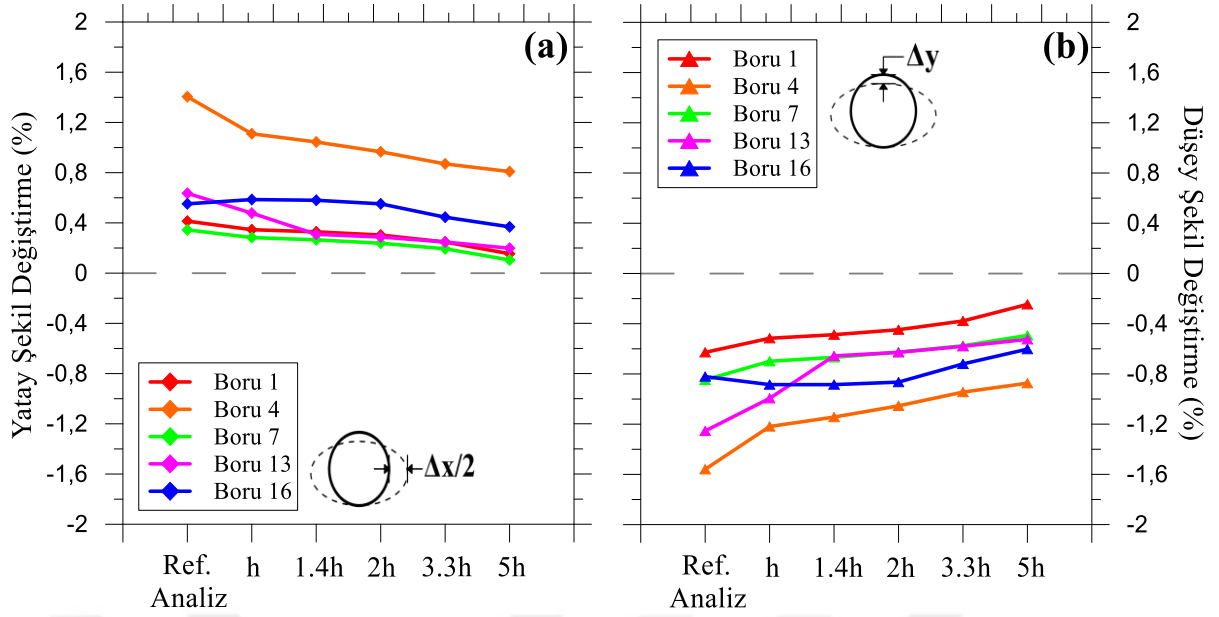
Şekil 5.16. F tipi borularda a) Boru tacına etki eden düşey gerilmeler b) boru yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler

F tipi borular olan 16 ve 18 nolu borular için sırasıyla boru tacına etki eden düşey gerilmelerde %23 ve %45 oranında azalma meydana gelirken, boru yan duvarına etkiyen gerilmelerde ise %4 ve %18 oranında azalma meydana gelmiştir. Burada da görüldüğü gibi

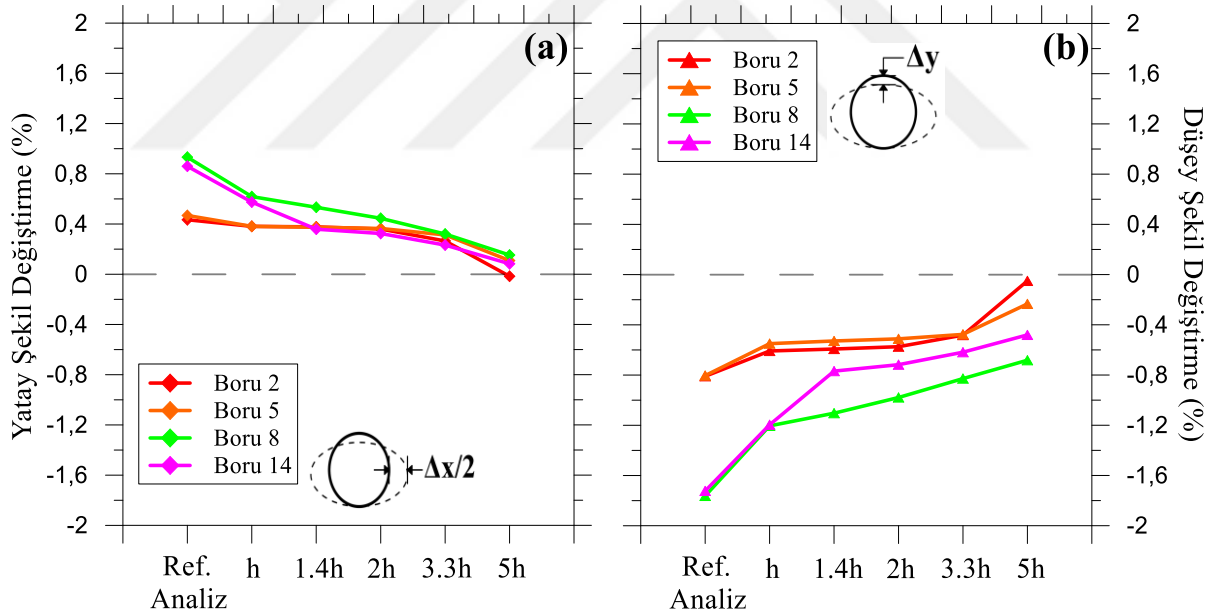
kırmataş geri dolgu kullanılan Boru 16'da gerilmeye meydana gelen azalma oranı kum geri dolgu kullanılan Boru 18'e göre daha düşük kalmıştır. Bu durumun sebebi olarak F tipi boruların çaplarının (1,524 m), E tipi boruların çapları gibi geniş olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Şekil 5.12 – Şekil 5.16 arasında verilen grafikler birlikte değerlendirildiğinde ilk söylenebilecek durum daha iyi sıkıştırma oranına sahip geri dolguya sahip borulara etkiyen gerilmelerde meydana gelen azalma oranları daha yüksek olmaktadır. Çalışmada kullanılan küçük çaplı borularda (0,762 m) kırmataş geri dolgu kullanımı ile kum geri dolguya göre gerilmelerdeki azalma oranları daha yüksektir. Diğer yandan boru çapının artması ile (1,067 m ve 1,524 m) kum geri dolgu kullanılan borulara etkiyen gerilmelerdeki azalma oranı kırmataş geri dolgu kullanılanlar göre daha yüksek çıkmıştır.

Borularda meydana gelen şekil değiştirmelerde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Boruların yaptığı şekil değiştirmeler referans ve EPS'li durumlara göre incelenmiş ve Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 arasında verilen grafiklerde sonuçlar paylaşılmıştır. Bu grafiklerde sadece dolgudan kaynaklanan şekil değiştirmeler gösterilmek istenmiştir. Bu doğrultuda dolgu inşaatından sonra elde edilen şekil değiştirme oranından, geri dolgu inşaatından sonra elde edilen şekil değiştirme oranı çıkarılarak dolgunun sebep olduğu şekil değiştirme oranı belirlenmiştir. Verilen grafikler boruların gömülme eksenlerine göre verilmiştir. A-A' ve B-B' eksenlerine ait yatay ve dikey şekil değiştirmenin EPS kullanılmayan ve EPS kullanılan durumlara göre değişimin incelendiği grafikler sırasıyla Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'te verilmiştir.



Şekil 5.17. A-A' ekseninde yer alan borularda dolgu inşaatından kaynaklanan şekil değiştirmelerin referans ve EPS'li durumlara göre incelenmesi a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme



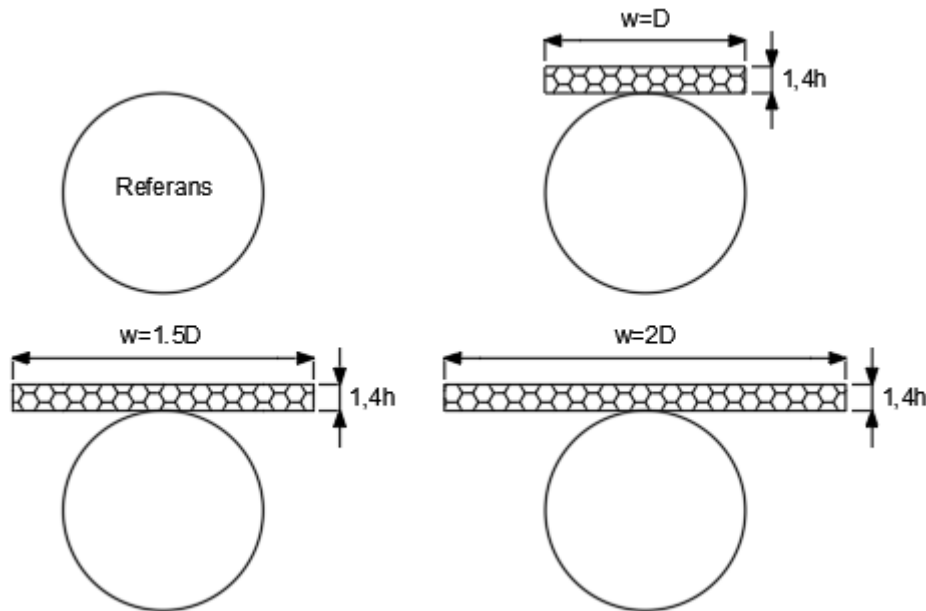
Şekil 5.18. B-B' ekseninde yer alan borularda dolgu inşaatından kaynaklanan şekil değiştirmelerin referans ve EPS'li durumlara göre incelenmesi a) Yatay şekil değiştirme b) Düşey şekil değiştirme

Bu grafiklere bakıldığında dolgu yükünün etkisi ile beklenildiği gibi düşey ekseninde bir kışılmanın, yatay ekseninde de bir uzamanın olduğu görülmektedir. Bir diğer beklenildiği gibi gerçekleşen durumda boruların üzerine eklenen EPS geofoam malzemenin kullanımı ile

referans durumda meydana gelen uzama ve kısalma oranları azalmaktadır. Ayrıca 5.18a’da görüldüğü gibi B-B’ ekseninde yer alan boruların yatay şekil değiştirme değerlerinin birbirlerine yakın değerler aldığı görülmektedir. Çıkarılacak bir diğer sonuç ise EPS kalınlığının artması şekil değiştirmede meydana gelen azalma oranını arttırmaktadır. En fazla şekil değiştirme yüzdesine sahip borulara bakıldığında A-A’ ekseninde 0,762 m çaplı Boru 4’te meydana gelirken B-B’ ekseninde ise yine 0,762 m çaplı olan Boru 8’te en fazla şekil değiştirme meydana gelmiştir.

## 5.2. EPS Geofoam Malzeme Genişliği

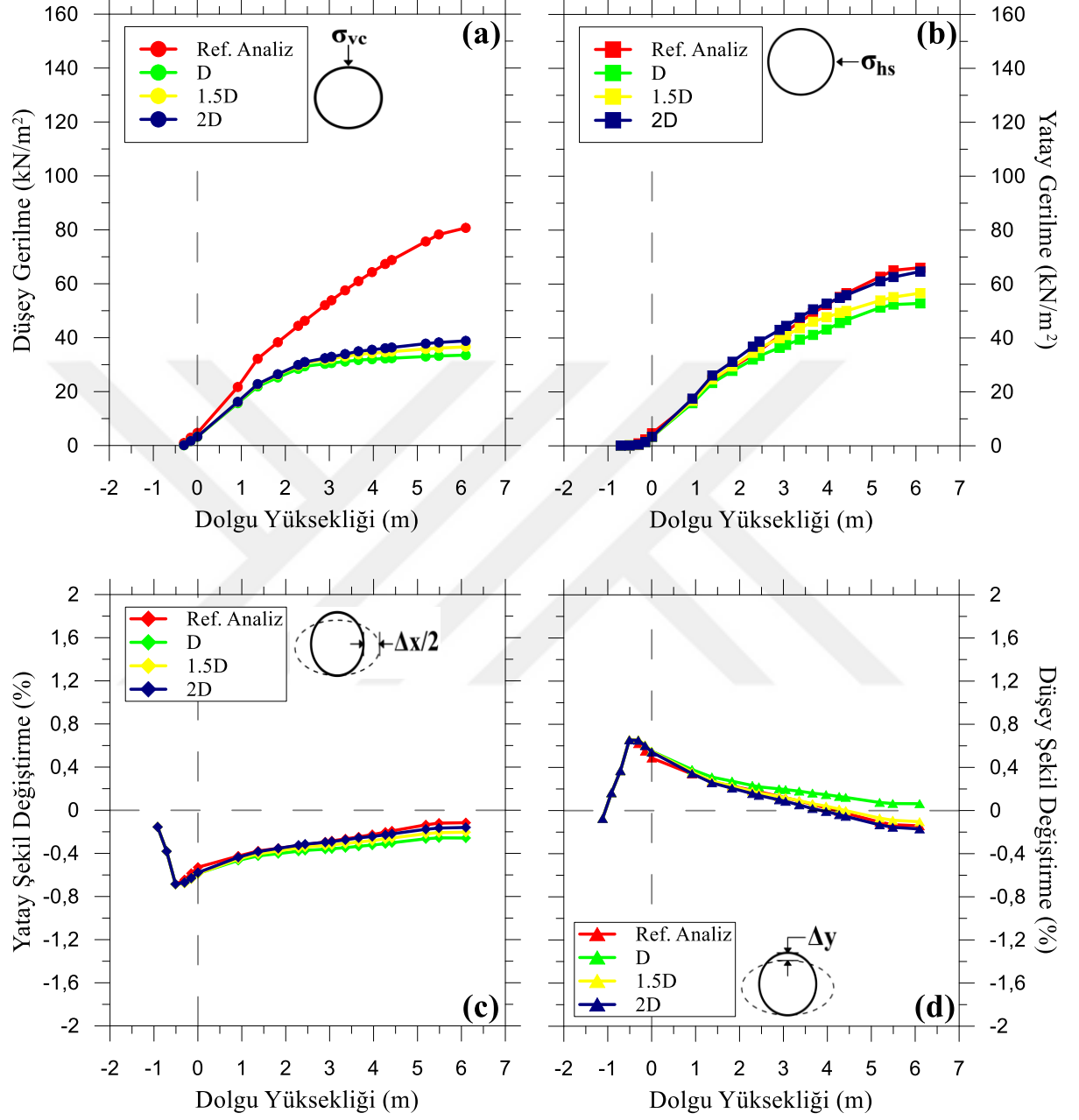
EPS geofoam malzemenin etkinliği konusunda incelenen bir diğer parametre ise EPS’nin genişliği olmuştur. EPS’nin genişlik değişiminin incelenmesi bu çalışmada ikincil bir inceleme alanı olup sadece A-A’ ekseninde bulunan borulara uygulanmıştır. Şekil 5.20 – Şekil 5.24 arasında verilen grafiklerde EPS genişliğinin etkinliği araştırılmıştır. Verilen grafiklerde boru tacına etki eden düşey gerilme, boru yan duvarına etkiyen yanal gerilme, boruda meydana gelen düşey gerilme ve boruda meydana gelen düşey gerilme değişimleri yer almaktadır. Şekil 5.19’da görüldüğü gibi boru çapına bağlı olarak D, 1.5D ve 2D genişliğinde olmak üzere üç farklı EPS genişliği incelenmiştir.



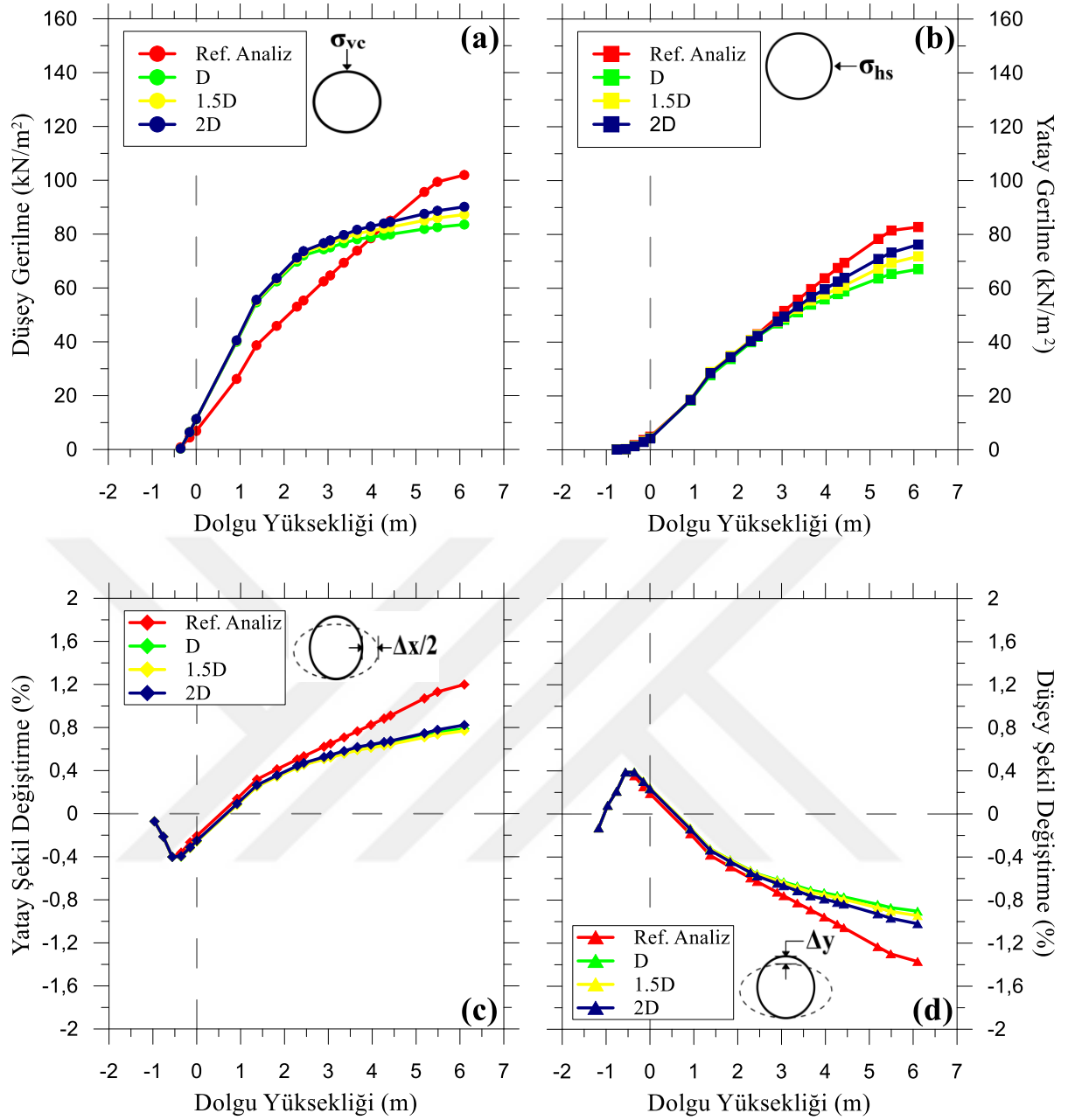
Şekil 5.19. EPS geofoam malzemenin genişlik değişiminin şematik gösterimi



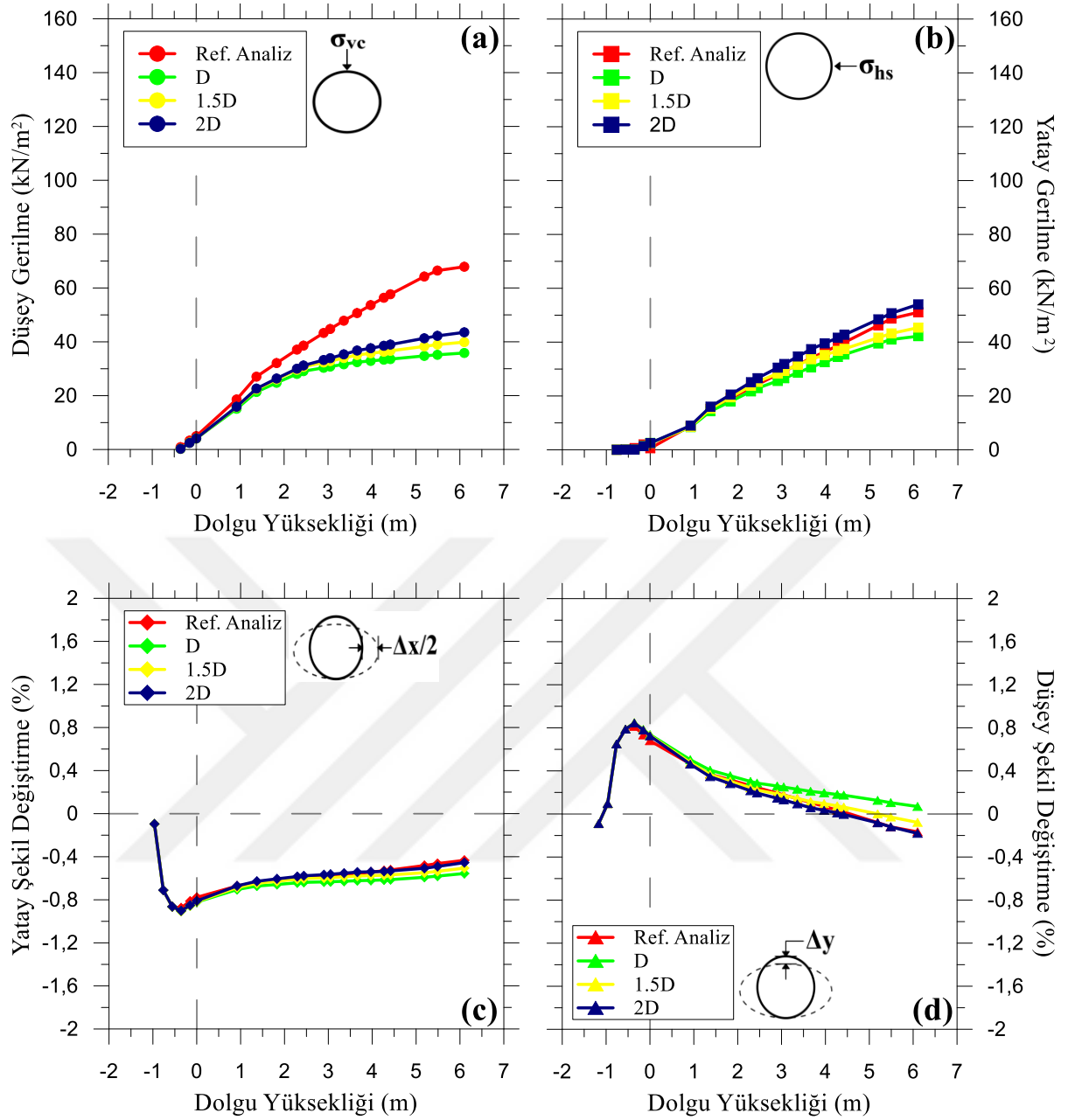
A-A' ekseninde yer alan Boru 1, Boru 4, Boru 7, Boru 13 ve Boru 16 üzerinde yer alan EPS geofom malzeme genişliğinin arttırılması ile meydana gelen değişimler Şekil 5.20 – Şekil 5.24 arasında yer alan grafiklerde verilmiştir.



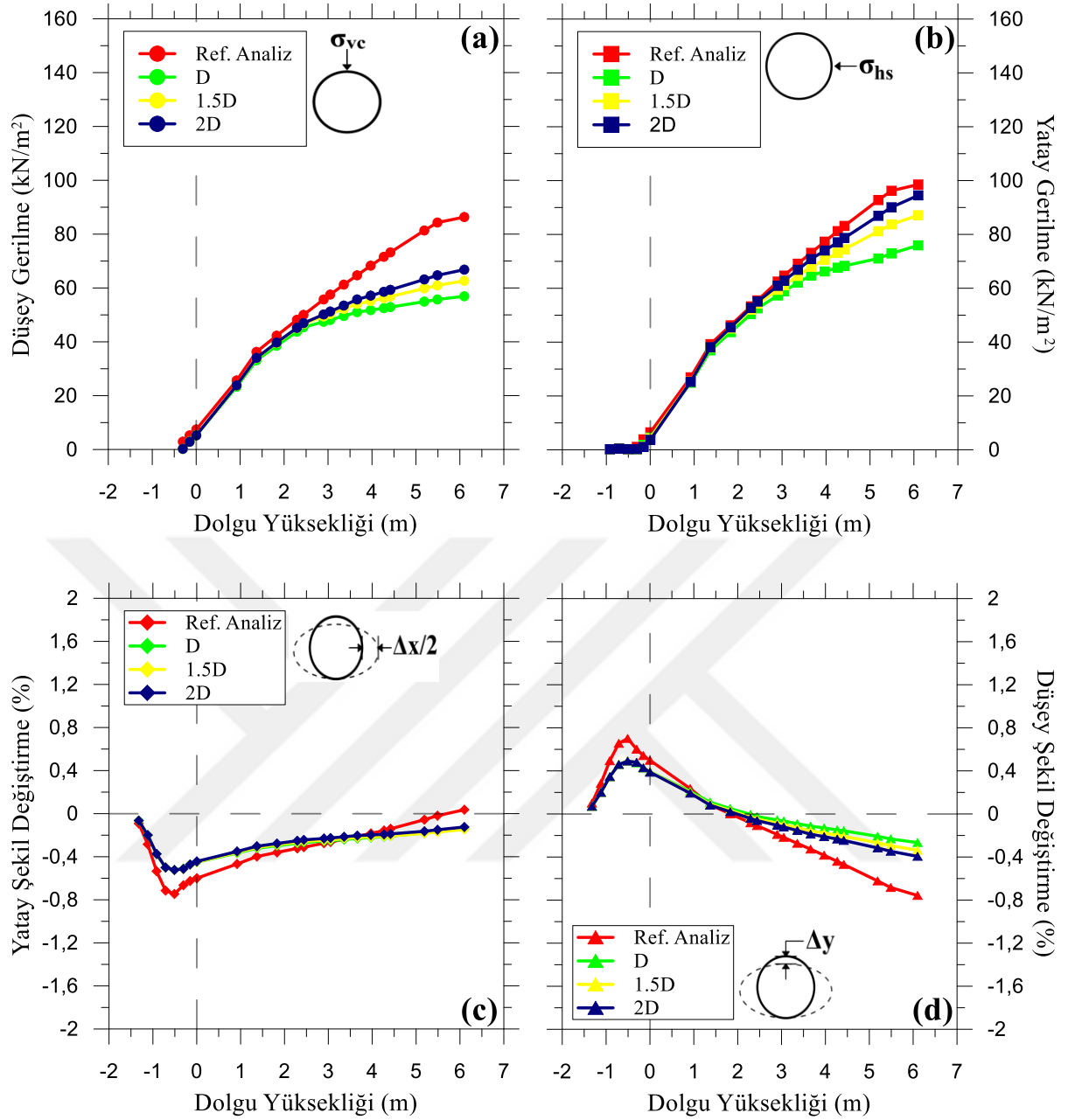
Şekil 5.20. Boru 1 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değişirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değişirme değişimi



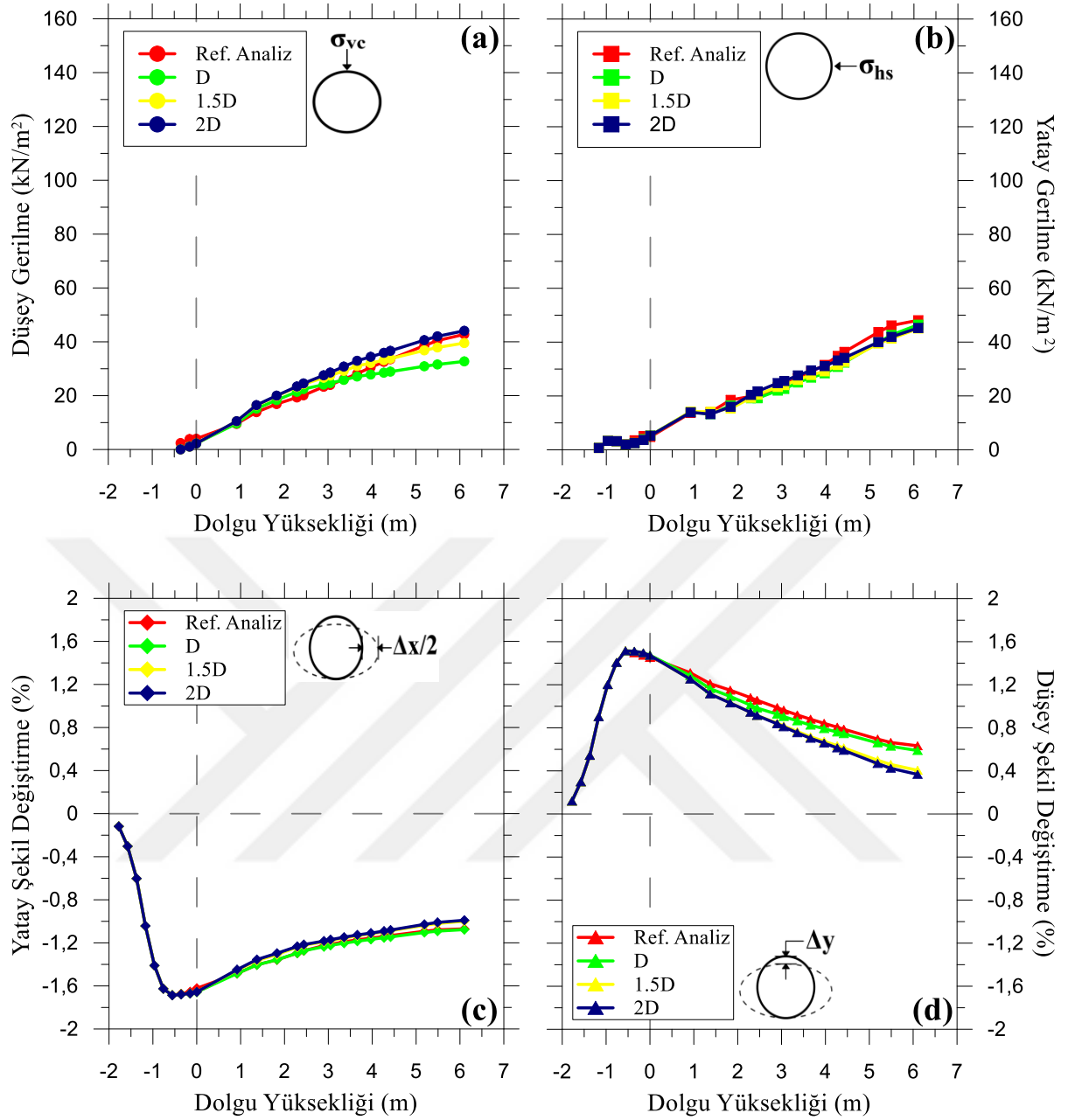
Şekil 5.21. Boru 4 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi



Şekil 5.22. Boru 7 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi



Şekil 5.23. Boru 13 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değişirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değişirme değişimi



Şekil 5.24. Boru 16 için EPS genişliği değişimine göre a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme değişimi b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme değişimi c) Boruda meydana gelen yatay şekil değiştirme değişimi ve d) Boruda meydana gelen düşey şekil değiştirme değişimi

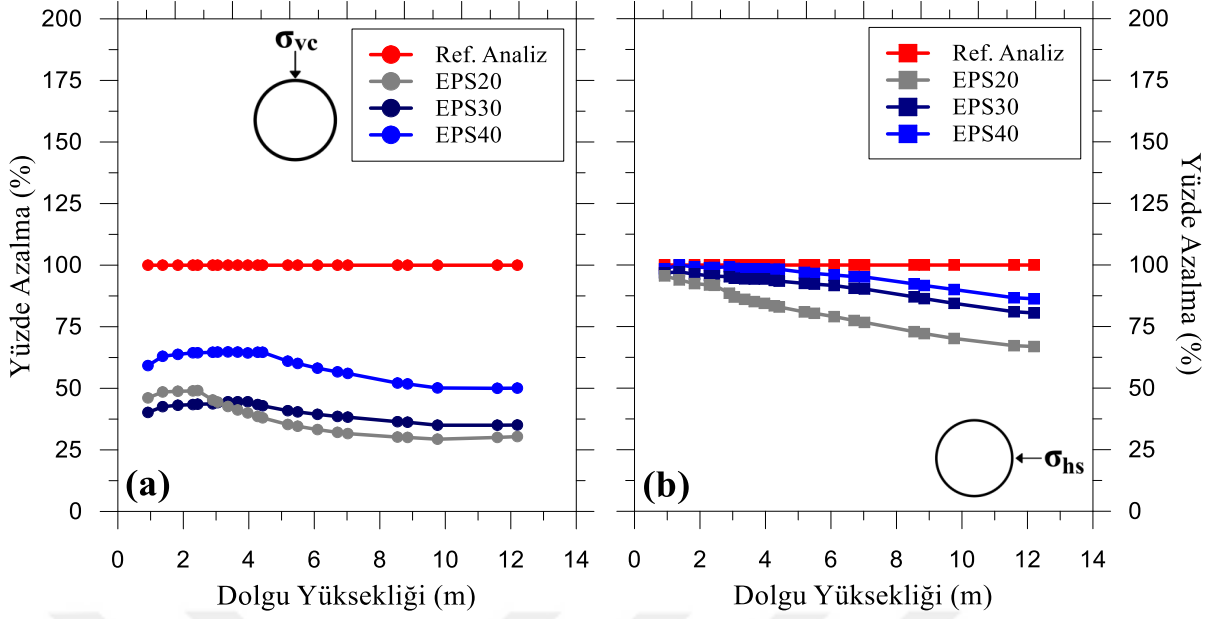
EPS geofoamın  $w = D$  genişliğinden  $w = 1.5D$  ve  $w = 2D$  genişliğine gelmesi nedeniyle gerilmelerde ve şekil değiştirme değerlerinde artışlar görülmektedir. Genişlik artışıyla birlikte borulara etkiyen gerilmelerde  $3 \text{ kN/m}^2$  ile  $10 \text{ kN/m}^2$  arasında artışlar meydana gelmiştir. Boruların yaptığı şekil değiştirmelere bakılacak olursa şekil değiştirmelerde %0,2'yi bulan değişimler oluşmuştur.

Bu bölümde yapılan analizlere göre EPS geoföamın  $w = D$  genişliğinde gerilmelerde ve şekil değiştirmelerde sağladığı azalmalar, EPS geoföamın  $w = 1.5D$  ve  $w = 2D$  genişliğine ulaşması ile tersine dönerek gerilmelerde ve şekil değiştirmelerde bir miktar artışa neden olmuştur. Kısaca EPS malzemenin genişliğinin artmasının faydalı olmadığı görölmüştür.

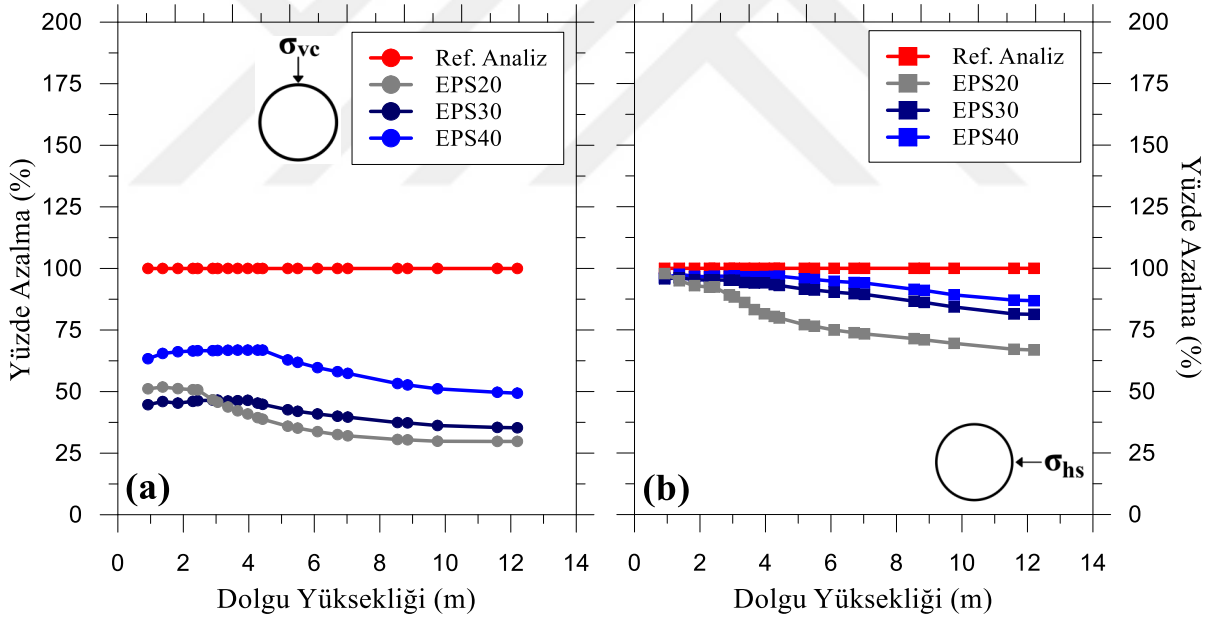
### 5.3. EPS Geoföam Malzemenin Yoğunluk Değişimi

Parametrik olarak çalışılan bir diğer durumda EPS malzemenin yoğunluk değişiminin boru üzerine etki eden gerilmeler ve boruda meydana gelen şekil değiştirmeler üzerindeki etkinliğinin incelenmesi olmuştur. Bu çalışmada B-B' ekseninde 12,2 m dolgu altında bulunan borular kullanılmıştır. Bölüm 5.1'de ve Bölüm 5.2'deki sonuçlara göre EPS malzeme boyutu olarak 1,4h kalınlık ve  $w = D$  genişlik belirlenmiştir. EPS malzemenin özelliklerini belirlemek için ise Bölüm 4.1.3'te verilen Tefera vd.'nin (2010) çalışmalarından elde edilen verilerden yararlanılmıştır. EPS20, EPS30 ve EPS40 olarak ifade edilen EPS malzemelerin yoğunlukları sırasıyla  $20 \text{ kg/m}^3$ ,  $30 \text{ kg/m}^3$  ve  $40 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Belirtilen malzemelerle gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar referans durumuyla karşılaştırılmıştır.

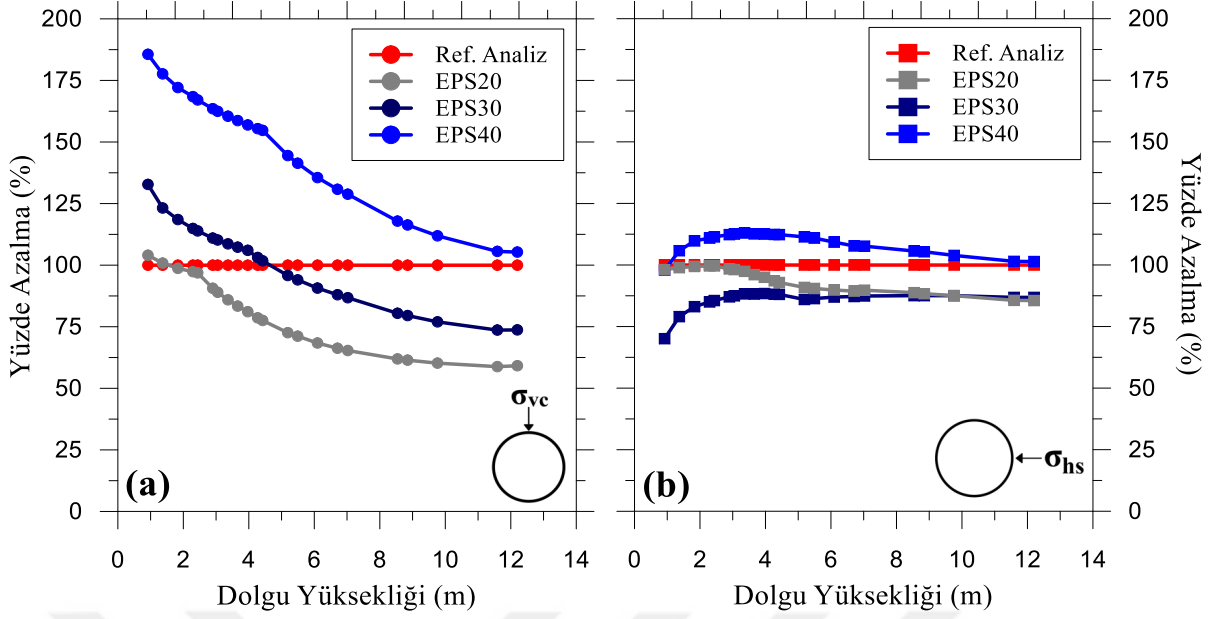
EPS yoğunluğu ile ilgili grafiklerde yüzdesel azalmalar dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu grafiklerde %100 seviyesinde verilen doğru referansı ifade etmektedir. Bu doğrunun üstünde veya altında yer alan eğriler ise EPS'li durumları ifade etmektedir. Referans doğrusu ile diğer eğriler arasında kalan yüzdesel mesafe gerilmadaki azalmayı veya artışı ifade etmektedir. EPS'li durumları temsil eden eğriler referans doğrusunun altında ise gerilmeye azalma meydana gelmiştir, üzerinde ise gerilmeye artış meydana gelmiştir. Örnek olarak vermek gerekirse Boru 2'de düşey gerilmadaki yüzdesel azalma grafiğine bakılacak olursa 4m dolgu civarında EPS40'a ait eğri yaklaşık %60'lar civarındadır, bu durumda referans doğrusu ile arada %40'lık bir fark vardır ve bu fark da gerilmadaki azalmayı ifade etmektedir. Ayrıca bu grafiklerin hazırlanmasından dolgu yüküyle oluşan gerilmeler kullanılmıştır. Şekil 5.25 – Şekil 5.28 arasında verilen grafiklerde EPS yoğunluk değişiminin gerilmelere etkisi incelenmiştir.



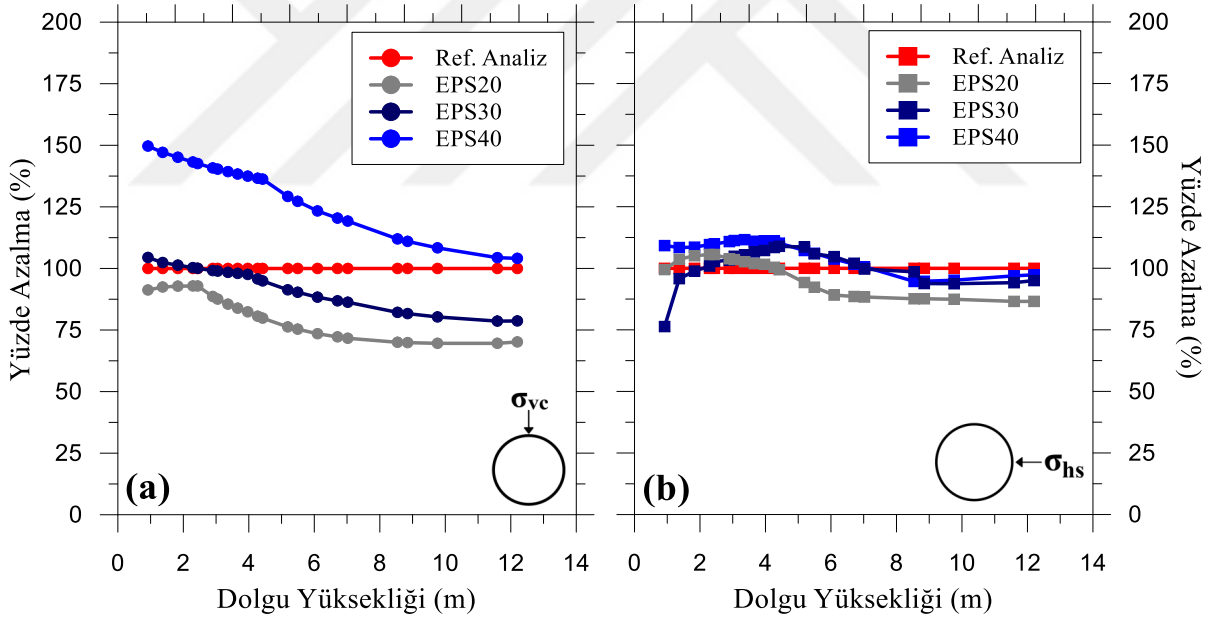
Şekil 5.25. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 2'ye etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme



Şekil 5.26. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 5'e etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme



Şekil 5.27. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 8'e etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme



Şekil 5.28. EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemelerinin Boru 14'e etki eden gerilmelere etkisi a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme

Grafikler incelendiğinde Boru 2 ve Boru 5'e ait gerilme grafiklerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Bu duruma her iki borunun da %96 relatif kompaksiyonda sıkıştırılan kırmataş geri dolguya gömülmüş olması olabilir. Bunun dışında her iki boruda da bütün EPS türlerinde gerilmelerde azalma meydana gelmiştir. Meydana gelen azalma yüzdesi EPS yoğunluğu azaldıkça artmıştır. Her iki boru içinde maksimum dolgu yükü altında EPS40,



EPS30 ve EPS20 malzemeleri için sırasıyla boru tacına etki eden düşey gerilmede yaklaşık %50, %65 ve %70 oranlarında azalma, boru yan duvarına etki eden yatay gerilmede yaklaşık %13, %20 ve %30 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

%96 relatif kompaksiyonda sıkıştırılan kum geri dolguya gömülü olan Boru 8 ve Boru 14'te gerilmelerde artış yaşanmıştır. Boru 8 düşey gerilme grafiğinde EPS40 başlangıçta referans durumun %85 üstünde yer alırken, 12,2m dolgu altında bu artış %5 oranına kadar düşmüştür. EPS30 malzeme ile gerilmede başlangıçta %32 artış yaşanırken 12,2m dolgu altında %25 azalma meydana gelmiştir. EPS20 malzeme ile gerilmede %4 artışın ardından 12,2m dolgu altında %40 azalma meydana gelmiştir. Boru yan duvarına etki eden yatay gerilme incelendiğinde EPS40 malzemeye ait eğrinin referans doğrusunun üzerinde olduğu görülmektedir. EPS40'a ait gerilme değerleri referans gerilme değerlerine göre maksimum %12 artış göstermiştir. EPS30 ve EPS20'de ise gerilme değerleri yaklaşık %15 azalmıştır.

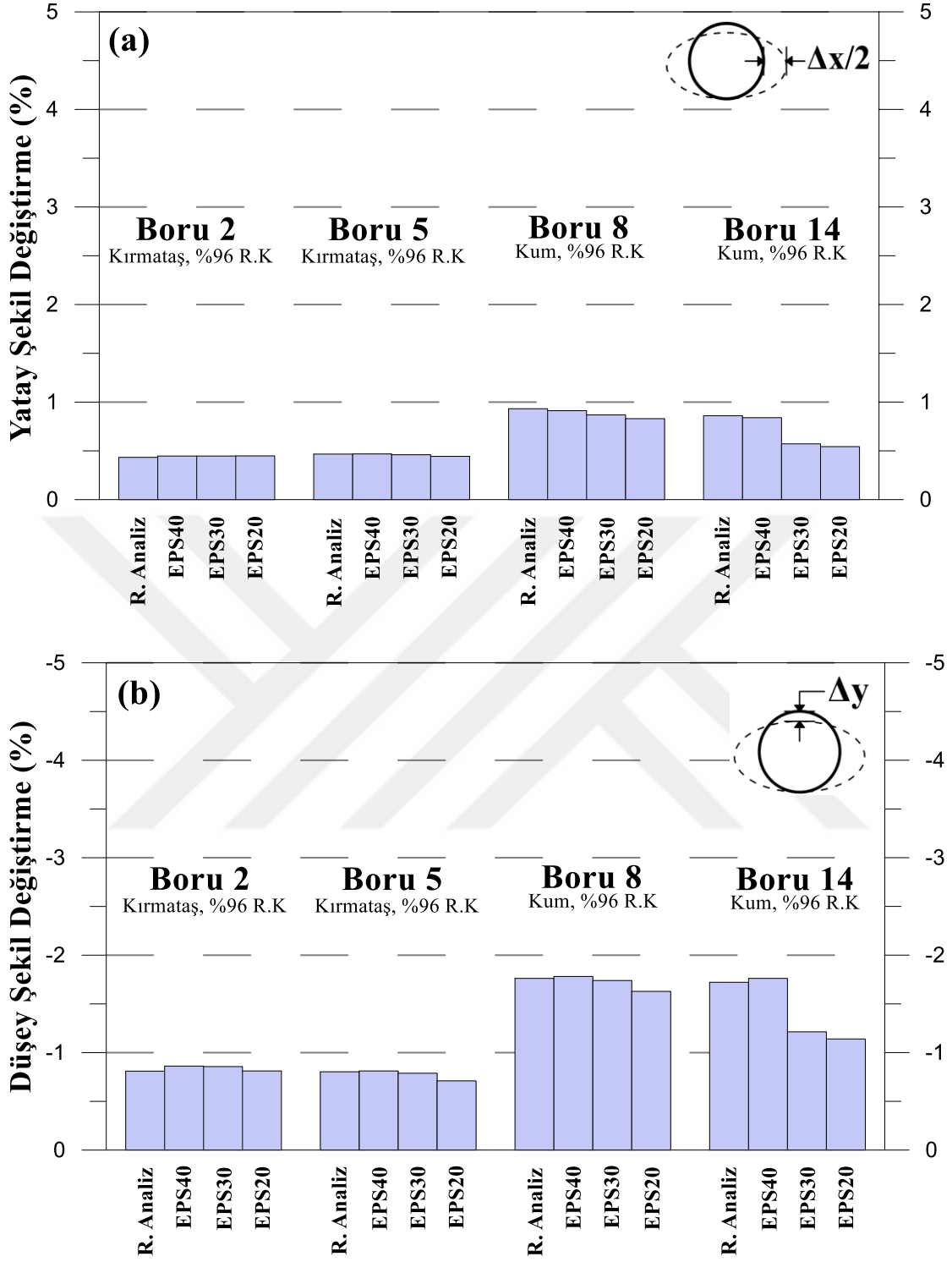
Boru 14 tacına etki eden gerilmelerde EPS40 referansın üzerine çıkmıştır, başlangıçta referans durumun %50 üstünde yer alırken, 12,2m dolgu altında bu artış %4 oranına kadar düşmüştür. EPS30 ve EPS20'de sırasıyla %20 ve %30 azalma meydana gelmiştir. Boru yan duvarına etki eden gerilmeye bakılacak olursa her üç malzemeye ait eğriler önce referans durumun üzerine çıkıp daha sonra altına inmiştir. Her üç malzeme için gerilmede meydana gelen artış ve azalma yaklaşık %10 oranını bulmaktadır.

EPS yoğunluğunun değişimi ile gerilmelerde meydana gelen değişimler yüzdesel azalma grafikleri ile incelenmiştir. Şekil değiştirmelerde meydana gelen değişimler ise Şekil 5.29'da verilen sütun grafiklerde incelenmiştir. Bu grafiklerde yine dolgu yükünden dolayı boruda meydana gelen değişimler verilmiştir. Bundan dolayı daha önce yapıldığı gibi dolgu inşaatından sonra elde edilen şekil değiştirme oranından, geri dolgu inşaatından sonra elde edilen şekil değiştirme oranı çıkarılarak dolgu yükünden kaynaklanan şekil değiştirme oranları belirlenmiştir.

Grafikler incelendiğinde Boru 2 ve Boru 5'in yatay şekil değiştirme oranlarında EPS malzemenin yoğunluk değişiminin bir etkisi olmadığı söylenebilir, her iki boru içinde yatay şekil değiştirme oranı yaklaşık %0,5 olduğu görülmektedir. Boru 2 ve Boru 5'in düşey şekil değiştirme oranlarında da önemli bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu boruların düşey şekil değiştirme oranı yaklaşık -%0,8'dir.

Boru 8'e ait yatay şekil değiştirme oranı referans durumda %0,9'ken, EPS20 malzeme kullanılmasıyla bu oran %0,8'e inmiştir. Aynı şekilde dūřey şekil değiştirme oranı referans durumda %-1,8'ken EPS20 malzeme kullanılmasıyla %-1,6'ya inmiştir. Boru 14' e ait grafiklere bakıldığında EPS yoğunluğunun 30 kg/m<sup>3</sup> ve 20 kg/m<sup>3</sup>'e dūřmesiyle şekil değiştirmelerde azalmalar meydana gelmiştir. Referans duruma gōre EPS20 kullanımı ile yatay şekil değiştirmede %0,30'luk, dūřey şekil değiştirmede ise %0,60'luk azalma meydana gelmiştir.

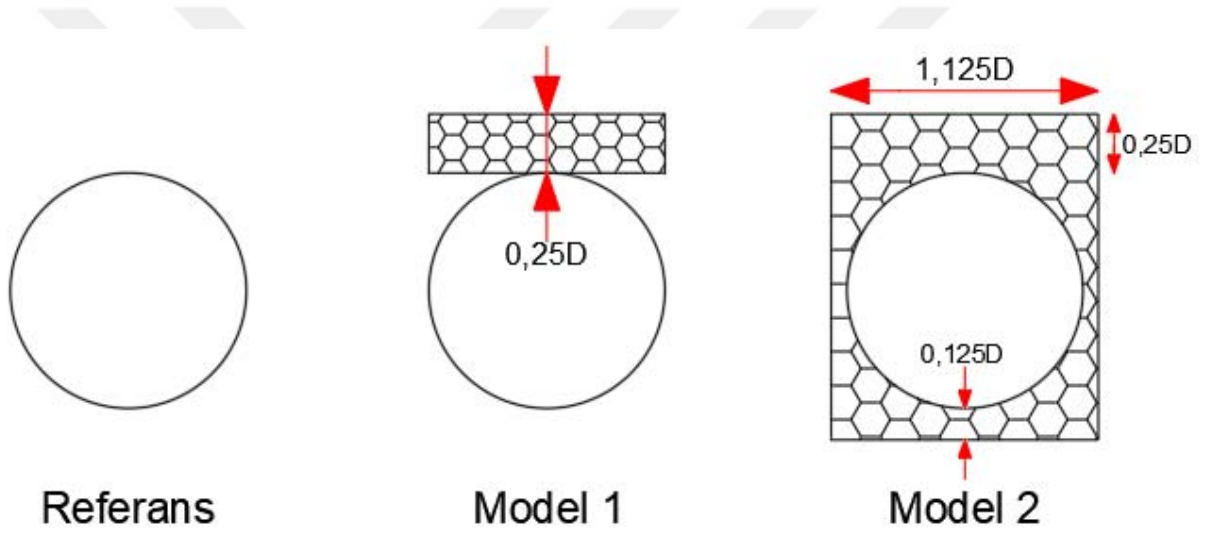
EPS geofoamın yoğunluk değişimi genel olarak incelendiğinde yoğunluk artışı ile EPS'nin sağlamış olduğu etkinlikte azalma meydana gelmektedir. Yani daha dūřük yoğunluktaki EPS malzeme gerilmenin ve şekil değiştirimin daha fazla azalmasını sağladığı grafiklerde gōr÷lmektedir. Ayrıca şekil 5.27 ve şekil 5.28'de verilen grafiklerinde kum geri dolgu ile birlikte y÷ksek yoğunluklu EPS kullanımı sonucu elde edilen gerilme değerlerinin EPS'siz durumda elde edilen gerilme değerlerinin de ¼zerine çıktığı gōr÷lmüştür.



Şekil 5.29. EPS geofoam yoğunluk değişiminin B-B' ekseninde yer alan borularda oluşan şekil değiştirmelere etkisi

## 6. GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNDE KALIN DOLGU YÜKÜNÜN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Daha önceki bölümlerde yapılan analizlerde arazi deneyinde borular üzerine etki eden 6,1 m ve 12,2 m dolgu yükü kullanılmıştır. Bu bölümde ise bu yüksekliklerin üzerine çıkılarak 30 m dolgu yükü kullanılıp analizler gerçekleştirilmiştir. Borular üzerine 1 m'lik dolgu tabakaları ile 30 m dolgu yükü eklenmiştir. Kalın dolgu yükü ile yapılan analizlerde kullanılan modeller Şekil 6.1'de verilmiştir. Bu şekilde verilen Referans boruyla birlikte EPS kullanılmayan durumu ifade etmektedir. Model 1 boru üstünde EPS kullanımını ifade ederken Model 2 ise boru etrafının EPS ile sarıldığı durumu göstermektedir. Model 2'de verilen EPS geometrisini belirleyen sayısal değerler Kang (2007)'nin çalışmalarından elde edilmiştir.



Şekil 6.1. Yüksek dolgu yükünün incelendiği analizlerde kullanılan modeller

Bu bölümde yapılan çalışmalarda 4 farklı çapa 7 adet boru kullanılmıştır. Bu borulardan 5 tanesi daha önceki analizlerde kullanılan A-A' ekseninde yer alan borulardır. Bu borularla birlikte daha küçük çaplı 2 adet boru daha kullanılmıştır. Bu borulara ait özellikler Çizelge 6.1'de verilmiştir. Boruların isimlendirilmesinde boru çapları ve boru rijitliklerinden oluşan bir kodlama sistemi kullanılmıştır. Bu isimlendirmede ilk bölümde yer alan D ifadesi ile boru çapı, ikinci bölümde yer alan PS ifadesi ile boru rijitliği (pipe stiffness) ifade edilmiştir. Ayrıca bölüm içinde daha kolay ifade edilmesi için kodlama yapılmıştır. Bu borularda D-0,76.PS-650 (P3b) ve D-0,76.PS-302 (P3c) boruları PVC diğer borular ise HDPE'dir.

Boru rijitliğinin belirlenmesinde 6.1 ile verilen formül kullanılmıştır (Moser ve Folkman, 2008).

$$\text{Boru rijitliği} = 6,7 \frac{EI}{r^3} \quad (6.1)$$

6.1 eşitliğinde yer alan ifadeler;

E = Elastisite modülü, kN/m<sup>2</sup>

I = Boru duvarının birim uzunluktaki eylemsizlik momenti, m<sup>4</sup>/m

r = Boru yarıçapı (m)

Çizelge 6.1. Parametrik çalışmada kullanılan borular ve özellikleri

Boru Kodu	Boru Adı	Boru İç Çapı (m)	Poisson Oranı	Boru Rijitliği (kN/m/m)	Eylemsizlik Momenti (m <sup>4</sup> /m)	Normal Rijitlik, EA (kN/m)	Eğilme Rijitliği, EI (kNm <sup>2</sup> /m)
P1	D-1,5. PS-230	1,524	0,45	230	1,4x10 <sup>-5</sup>	18190	15,22
P2	D-1,0. PS-413	1,067	0,45	413	8,54x10 <sup>-6</sup>	11960	9,36
P3a	D-0,76. PS-490	0,762	0,45	490	4,67x10 <sup>-6</sup>	8335	4,05
P3b	D-0,76. PS-650	0,762	0,30	650	8,54x10 <sup>-6</sup>	35550	5,39
P3c	D-0,76 .PS-302	0,762	0,30	302	8,54x10 <sup>-6</sup>	32620	2,49
P4	D-0,60. PS-215	0,60	0,46	215	1,77x10 <sup>-6</sup>	7500	0,922
P5	D-0,30. PS-378	0,30	0,46	378	4,886x10 <sup>-7</sup>	7032,41	0,1906

Analizlerde geri dolgu olarak kırmataş, kum ve kil malzemeler kullanılarak farklı geri dolgu malzemelerinin yüksek dolgu yükü altındaki boru davranışları üzerindeki etkinliği

incelenmiştir. Çizelge 6.2’de belirtilen geri dolgu malzemelerine ait özellikler verilmiştir. Kum ve kil malzemeye ait parametreler bu çalışma içerisinde daha önce verilmişti. Kırmataş malzemeye ait özellikler ise Akyelken (2020)’in çalışmasından alınmıştır. Sıkışabilir malzeme olarak ise 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu EPS geofom kullanılmıştır.

Çizelge 6.2. Geri dolgu olarak kullanılan malzemelere ait özellikler

	<b>Kırmataş</b>	<b>Kum</b>	<b>Kil</b>
Doğal Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	22	17,70	20,4
Referans ortalama sekant modülü, $E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	180000	9500	5210
Referans tanjant ödometre modülü, $E_{oed}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	180000	9500	5210
Referans yük boşaltma-geri yükleme modülü, $E_{ur}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	54000	28500	15630
Kohezyon, c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	34,5
Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ (°)	40	37	15
Genleşme Açısı, $\psi$ (°)	5	7	-
Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet, m (-)	0,8	0,5	0,5

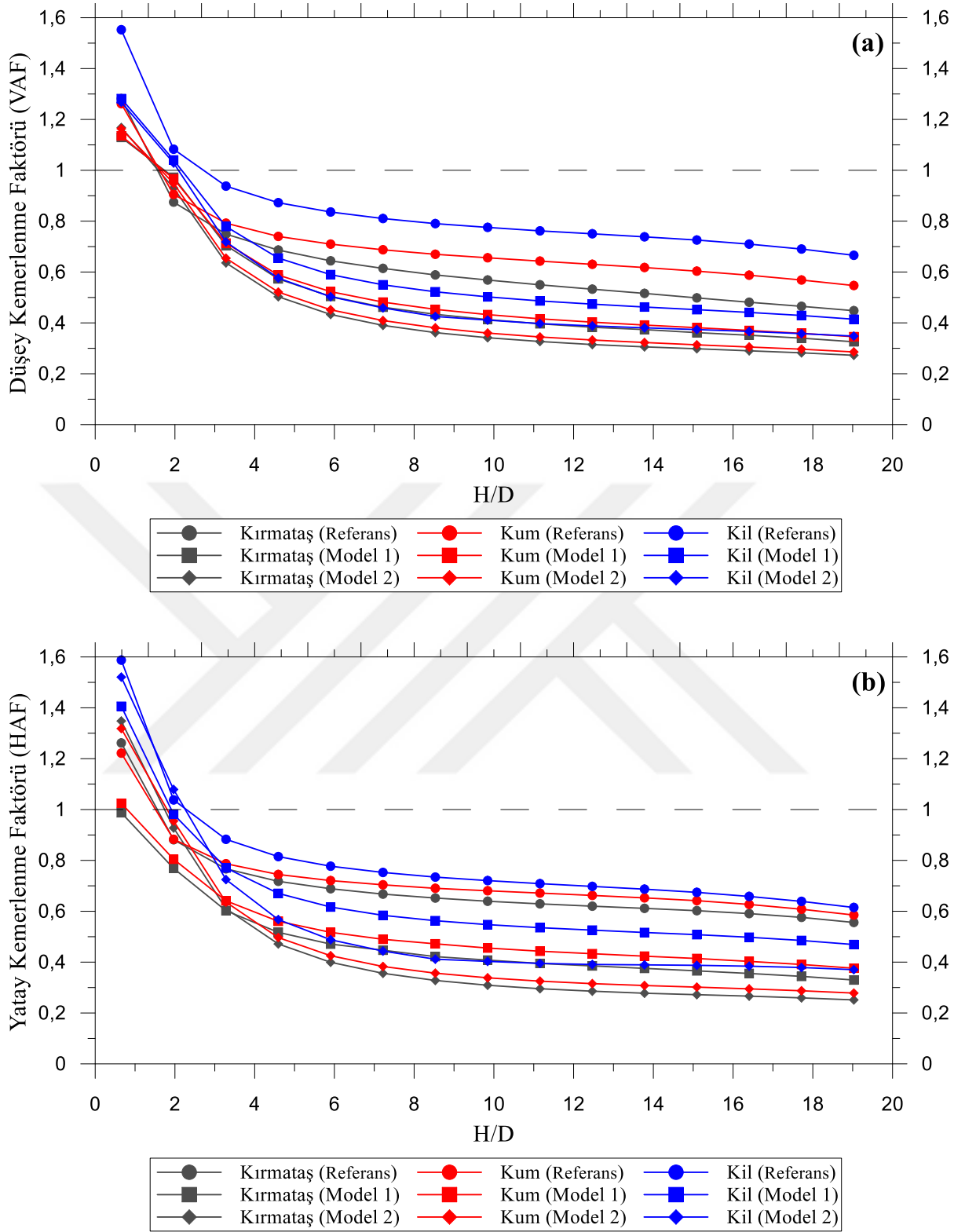
Her bir boru belirtilen geri dolgu malzemeleri içine Şekil 6.1’de verilen modellerle gömülerek 30 m dolgu yükü altında analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece farklı geri dolgu malzemeleri ile birlikte EPS geofomun kullanımının borulara etki eden gerilmeler ve borularda meydana gelen şekil değiştirmeler üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Bu analizlerle ilgili her bir boruya ait şekil değiştirme ve kemerlenme faktörleri grafikleri verilmiştir. Grafiklerde yer alan kemerlenme değerleri ve şekil değiştirme oranları H/D (Dolgu yüksekliği / Boru çapı) değişimine göre verilmiştir. Verilen grafikler en yüksek çaplı borudan en küçük çaplı boruya doğru verilmiştir.

P1 olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.2’de ve şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 6.3’te verilmiştir.

1,5 m çaplı boruda düşey kemerlenme faktörü değerleri (VAF) kırmataş ve kum geri dolgu kullanımı ile Model 1’de 0,3 seviyesine, Model 2’de ise 0,25 seviyesine inmiştir. Kil geri dolgu kullanımı ile VAF değerleri Model 1 ile 0,4 değerine, Model 2’de ise 0,34 değerine inmiştir.

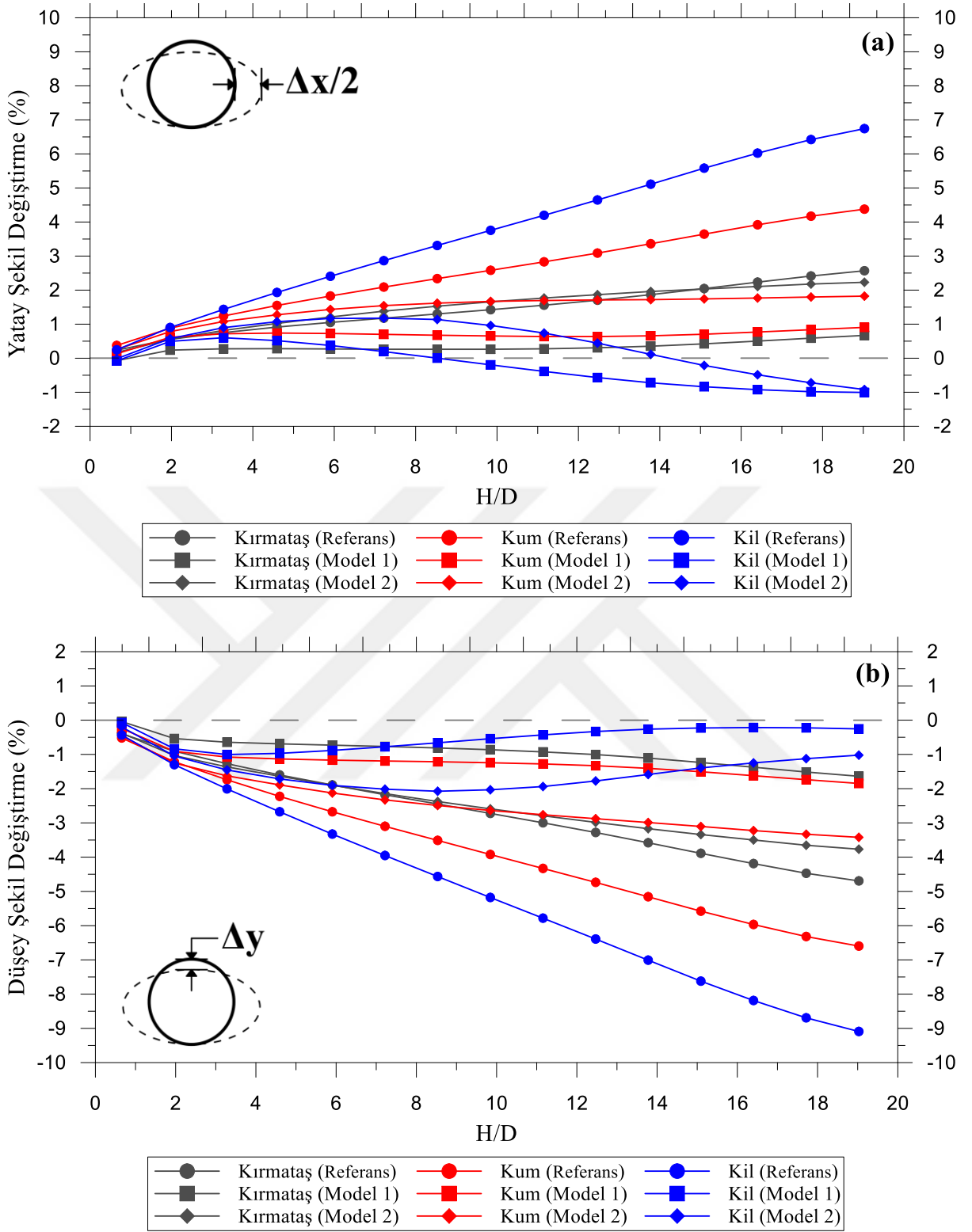
Yatay kemerlenme faktörü değerleri (HAF) kırmataş ve kum geri dolgu kullanımı ile Model 1’de 0,3 seviyesine, Model 2’te ise 0,25 seviyesine inmiştir. Kil geri dolgu kullanımı ile HAF değerleri Model 1 ile 0,45 değerine, Model 2’te ise 0,36 değerine inmiştir.

P1’e ait şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde Model 1 ile şekil değiştirmelerde en düşük seviyeler elde edilmiştir. Yatay şekil değiştirme oranları Model 1’in kırmataş geri dolgu ile birlikte kullanımında %2,62 seviyesinden %0,7 seviyesine, kum geri dolgu ile birlikte kullanımında %4,4 seviyesinden %0,92 seviyesine ve kil geri dolgu ile birlikte kullanımı ile %6,85 seviyesinden %-1 seviyesine düşmüştür. Düşey şekil değiştirme oranları ise Model 1’in kırmataş geri dolgu ile birlikte kullanımında %-4,77 seviyesinden %-1,7 seviyesine, kum geri dolgu ile birlikte kullanımında %-6,7 seviyesinden %-1,88 seviyesine ve kil geri dolgu ile birlikte kullanımı ile %-9,32 seviyesinden %-0,25 seviyesine düşmüştür. Model 2 kullanımı ile elde edilen şekil değiştirme oranlarının Model 1’de elde edilen değerlerin bir miktar üzerinde olduğu grafiklerden görülmektedir.



Şekil 6.2. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P1’de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi





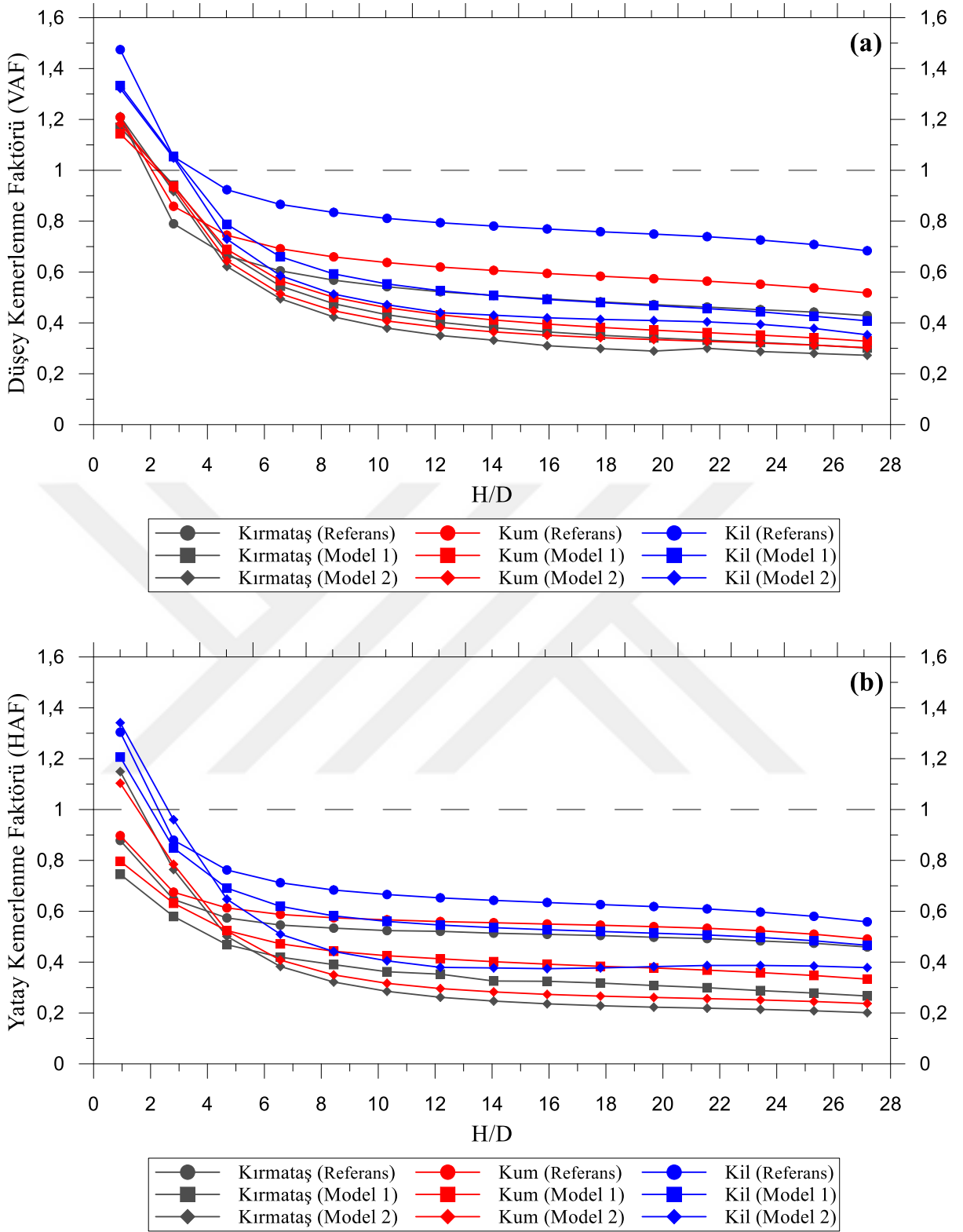
Şekil 6.3. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P1’de meydana gelen şekil değişimleri  
a) Yatay şekil değişirme b) Düşey şekil değişirme

P2 olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.4'te ve şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 6.5'te verilmiştir.

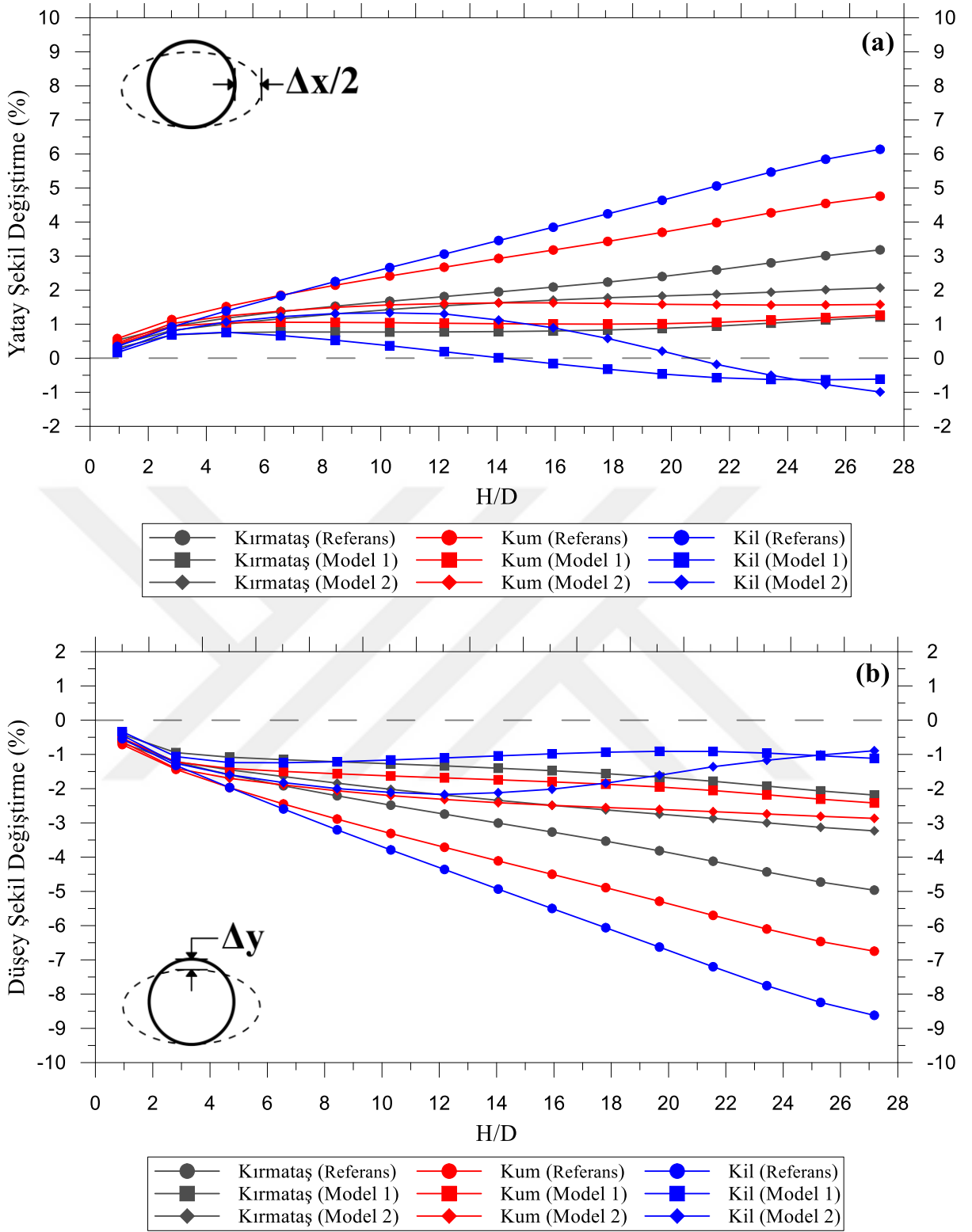
1,0 m çaplı boruda düşey kemerlenme faktörü değerleri (VAF) kırmataş geri dolgu kullanımı ile Model 1'de 0,3 seviyesine, Model 2'de ise 0,25 seviyesine inmiştir. Kum geri dolgu kullanımı ile VAF değerleri Model 1 ve Model 2 kullanımı ile yaklaşık 0,3 seviyesine inmiştir. Kil geri dolgu ise VAF değerleri Model 1'de 0,4 Model 2'de ise 0,3 seviyesine inmiştir.

Yatay kemerlenme faktörü değerleri (HAF) kırmataş geri dolgu kullanımı ile Model 1'de 0,25 seviyesine, Model 2'de ise 0,20 seviyesine inmiştir. Kum geri dolguda HAF değerleri Model 1'de 0,3 Model 2'de 0,2 olarak belirlenmiştir. Kil geri dolgu HAF değerleri Model 1'de 0,45 Model 2'de 0,37 olarak elde edilmiştir.

P2'nin şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde granüler geri dolgulara Model 1 ile kil geri dolguda ise Model 2 ile şekil değiştirmelerde en düşük seviyeler elde edilmiştir. Yatay şekil değiştirme oranları kırmataş geri dolguda %3,24 seviyesinden %1,2 seviyesine, kum geri dolguda %4,8 seviyesinden %1,3 seviyesine ve kil geri dolguda %6,2 seviyesinden %-1 seviyesine düşmüştür. Düşey şekil değiştirme oranları ise kırmataş geri dolguda %-5 seviyesinden %-2,2 seviyesine, kum geri dolguda %-6,8 seviyesinden %-2,45 seviyesine ve kil geri dolguda %-8,7 seviyesinden %-0,86 seviyesine düşmüştür.



Şekil 6.4. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P2’de elde edilen kemerlenme grafikleri a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi



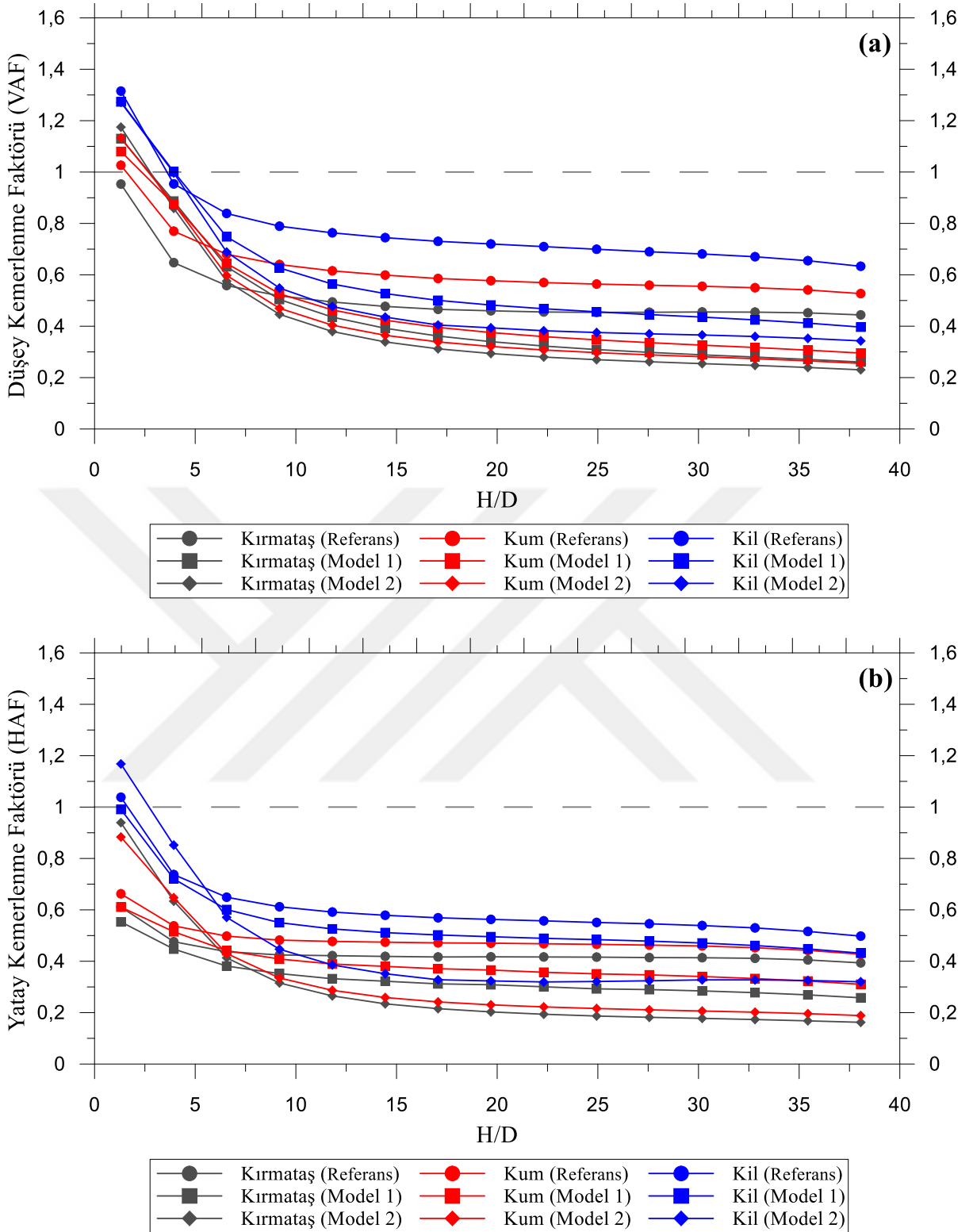
Şekil 6.5. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P2’de meydana gelen şekil değişimleri  
a) Yatay şekil değişirme b) Düşey şekil değişirme

P3a olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.6'da ve şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 6.7'de verilmiştir.

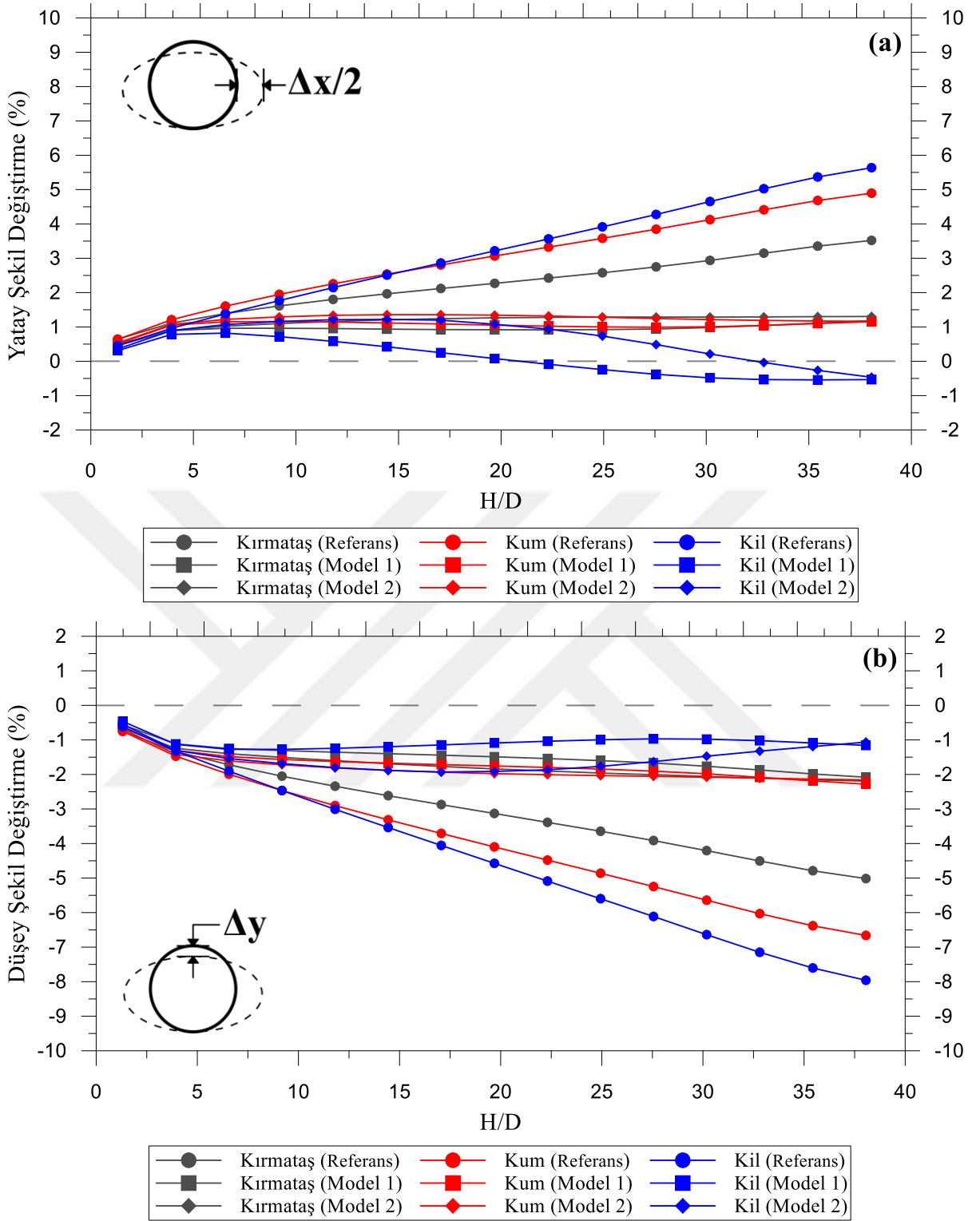
0,762 m çaplı bu boruda düşey kemerlenme faktörü değerleri (VAF) kırmataş geri dolguda Model 1 kullanımıyla birlikte 0,25 değerine, Model 2 kullanımı ile birlikte 0,22 değerine düşmüştür. Kum geri dolguda VAF değerleri Model 1'de 0,28 Model 2'de 0,25 değerine inmiştir. Kil geri dolguda VAF değerleri ise Model 1'de 0,38 değerine, Model 2'de ise 0,33 değerine düşmüştür.

Yatay kemerlenme faktörü değerleri (HAF) ise kırmataş geri dolguda Model 1 kullanımı ile 0,25 değerine, Model 2 kullanımı ile birlikte 0,15 değerine kadar düşmüştür. Kum geri dolgu HAF değerleri Model 1 ile birlikte 0,30 değerine, Model 2 ile birlikte 0,18 değerine inmiştir. Kil geri dolguda ise HAF değerleri Model 1'de 0,42 değerine, Model 2'de ise 0,31 değerine inmiştir.

P3a'ya ait şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde yatay şekil değiştirme oranları kırmataş geri dolguda %3,6 seviyesinden %1,3 seviyesine, kum geri dolguda %5 seviyesinden %1,15 seviyesine ve kil geri dolguda %5,7 seviyesinden %-0,5 seviyesine düşmüştür. Düşey şekil değiştirme oranları ise kırmataş geri dolguda %-5 seviyesinden %-2,2 seviyesine, kum geri dolguda %-6,7 seviyesinden %-2,15 seviyesine ve kil geri dolguda %-8 seviyesinden %-1 seviyesine düşmüştür.



Şekil 6.6. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3a’da elde edilen kemerlenme grafikleri  
a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi



Şekil 6.7. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3a’da meydana gelen şekil değiştirmeler a) Yatay şekil değişirme b) Düşey şekil değişirme

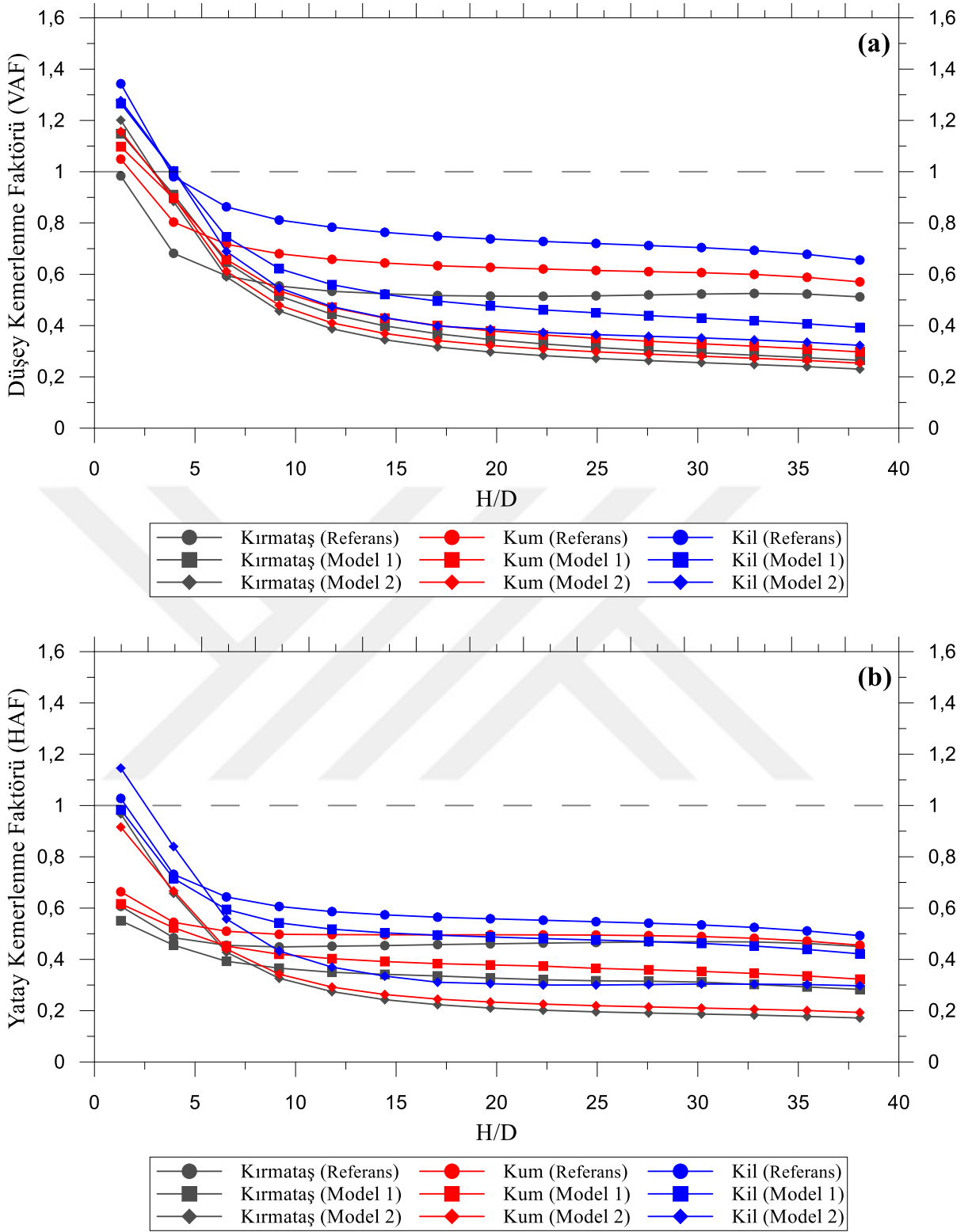
P3b olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.8’de ve şekil değişirme grafikleri ise Şekil 6.9’da verilmiştir.

0,762 m çaplı bu boruda elde edilen düşey kemerlenme faktörü (VAF) değerleri H/D oranının artması ile birlikte Model 1 ve Model 2’de kırmataş geri dolgu kullanımıyla sırasıyla 0,25 ve 0,22 değerlerine inmiştir. Yine Model 1 ve Model 2’de VAF değerleri kum geri dolgu kullanımıyla sırasıyla 0,29 ve 0,30 değerlerine, kil geri dolguda ise sırasıyla 0,38 ve 0,31 değerlerine inmiştir.

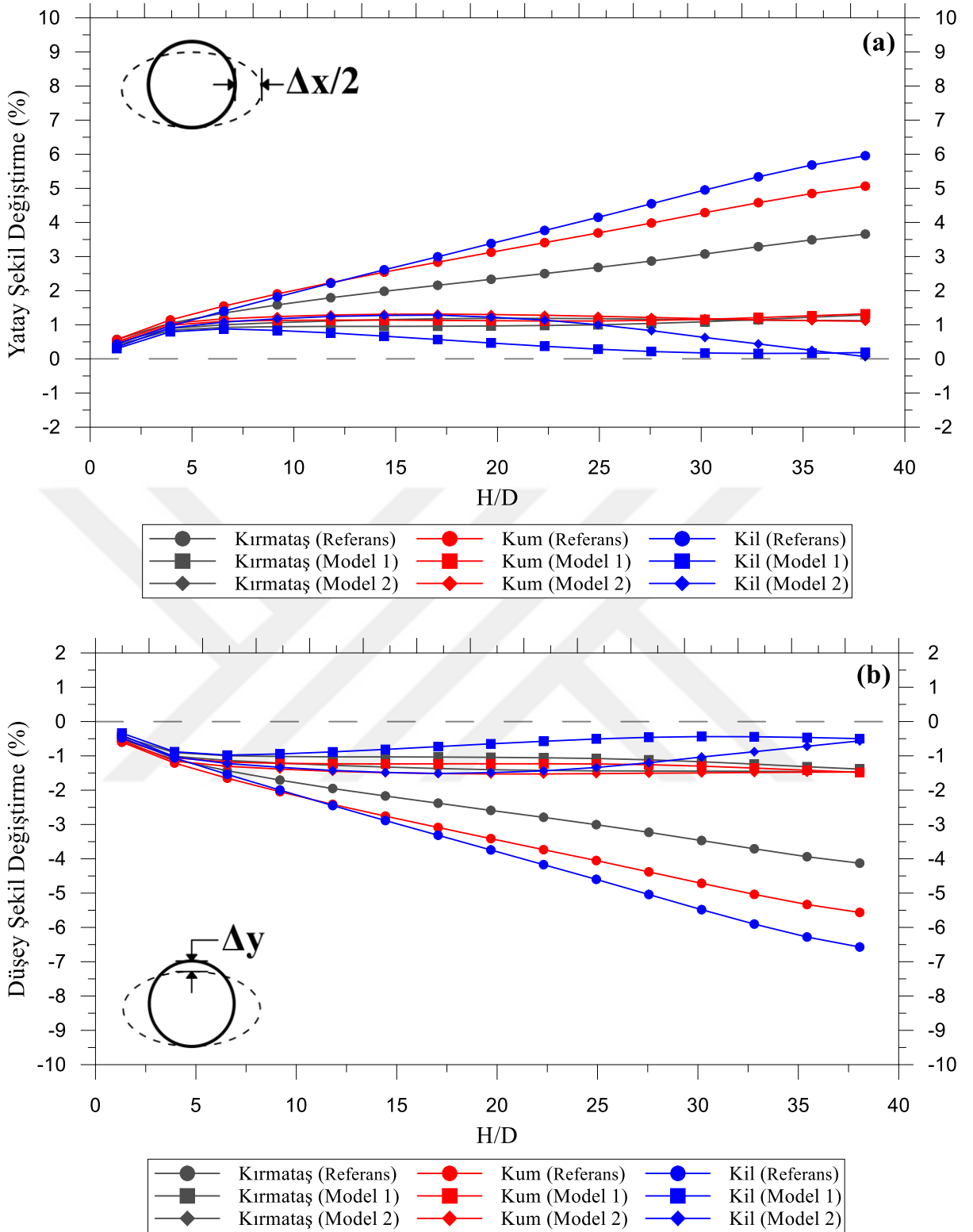
Yatay kemerlenme faktörü değerleri (HAF) H/D oranının artışı ile Model 1 ve Model 2 için kırmataş geri dolguda sırasıyla 0,27 ve 0,16 değerlerine, kum geri dolguda 0,31 ve 0,18 değerlerine, kil geri doluda ise 0,41 ve 0,29 değerlerine kadar düşmüştür.

P3b’nin şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde Model 1 ve Model 2 değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Her iki model için bakarsak yatay şekil değiştirme oranları kırmataş geri dolguda %3,7 seviyesinden %1,2 seviyesine, kum geri dolguda %5,1 seviyesinden %1,15 seviyesine ve kil geri dolguda %6 seviyesinden %0,1 seviyesine düşmüştür. Yine her iki model için düşey şekil değiştirme oranları ise kırmataş geri dolguda %-4,2 seviyesinden %-1,4 seviyesine, kum geri dolguda %-5,6 seviyesinden %-1,5 seviyesine ve kil geri dolguda %-6,7 seviyesinden %-0,5 seviyesine düşmüştür.





Şekil 6.8. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3b’de elde edilen kemerlenme grafikleri  
a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi



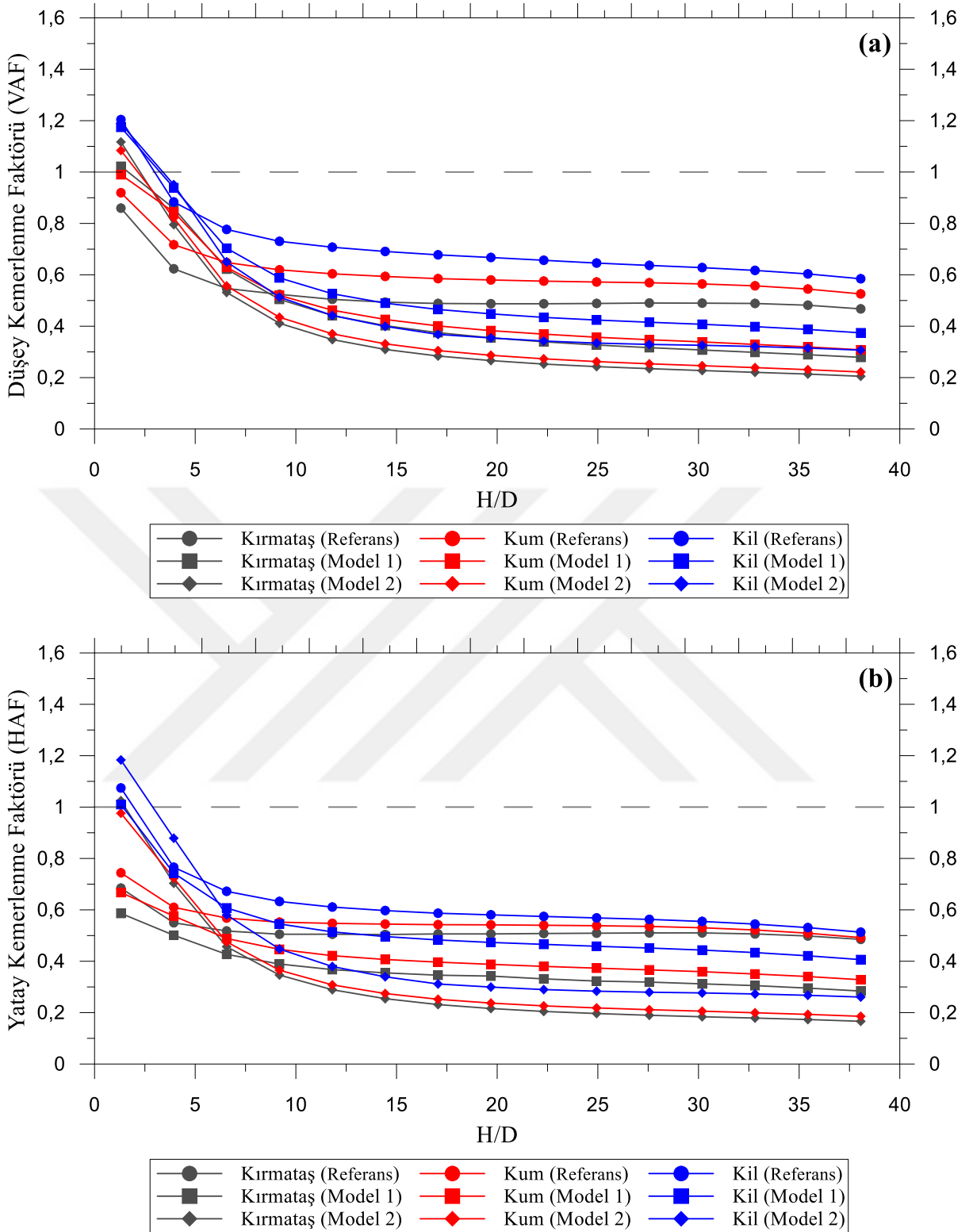
Şekil 6.9. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3b’de meydana gelen şekil değiştirmeler  
a) Yatay şekil değişirme b) Düşey şekil değişirme

P3c olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.10'da ve şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 6.11'de verilmiştir.

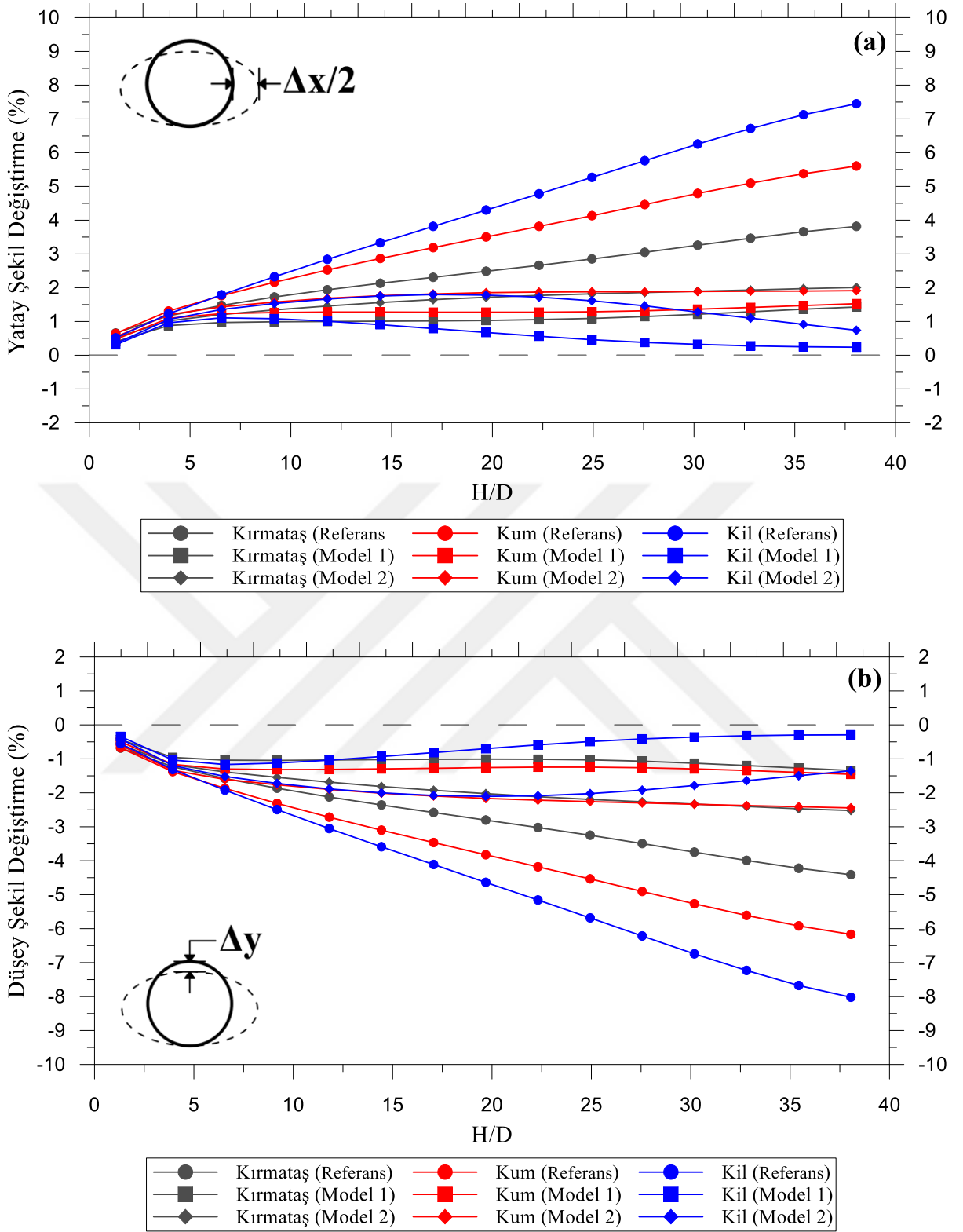
P3c kodlu boruda düşey kemerlenme faktörü değerleri (VAF) EPS kullanımı ile kırmataş ve kum geri dolguda benzer değerlerde elde edilmiştir. Kırmataş ve kum geri dolgu için VAF değerleri Model 1 ve Model 2'de H/D oranının artışı ile birlikte sırasıyla 0,3 ve 0,2 seviyelerine kadar düşmüştür. Kil geri dolguda VAF değerleri Model 1'de 0,36, Model 2'de ise 0,30 seviyelerine inmiştir.

Yatay kemerlenme faktörü değerleri (HAF) incelendiğinde geri dolgu türleri için farklı değerler aldığı görülmektedir. Kırmataş geri dolguda H/D oranının artışı ile birlikte HAF değerleri Model 1'de 0,27 seviyesine, Model 2'de ise 0,16 seviyesine düşmüştür. Kum geri dolguda ise HAF değerleri Model 1'de 0,32 seviyesine, Model 2'de 0,18 seviyesine inmiştir. Kil geri dolgu kullanımında HAF değerleri Model 1 ile 0,4 seviyesine, Model 2 ile 0,25 seviyesine düşmüştür.

P3c'ye ait şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde Model 1'de yatay şekil değiştirme oranları kırmataş geri dolguda %3,9 seviyesinden %1,4 seviyesine, kum geri dolguda %5,7 seviyesinden %1,5 seviyesine ve kil geri dolguda %7,5 seviyesinden %0,2 seviyesine düşmüştür. Yine Model 1 için düşey şekil değiştirme oranları ise kırmataş geri dolguda %-4,5 seviyesinden %-1,4 seviyesine, kum geri dolguda %-6,2 seviyesinden %-1,5 seviyesine ve kil geri dolguda %-8,1 seviyesinden %-0,3 seviyesine düşmüştür.



Şekil 6.10. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P3c’de elde edilen kemerlenme grafikleri  
a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi



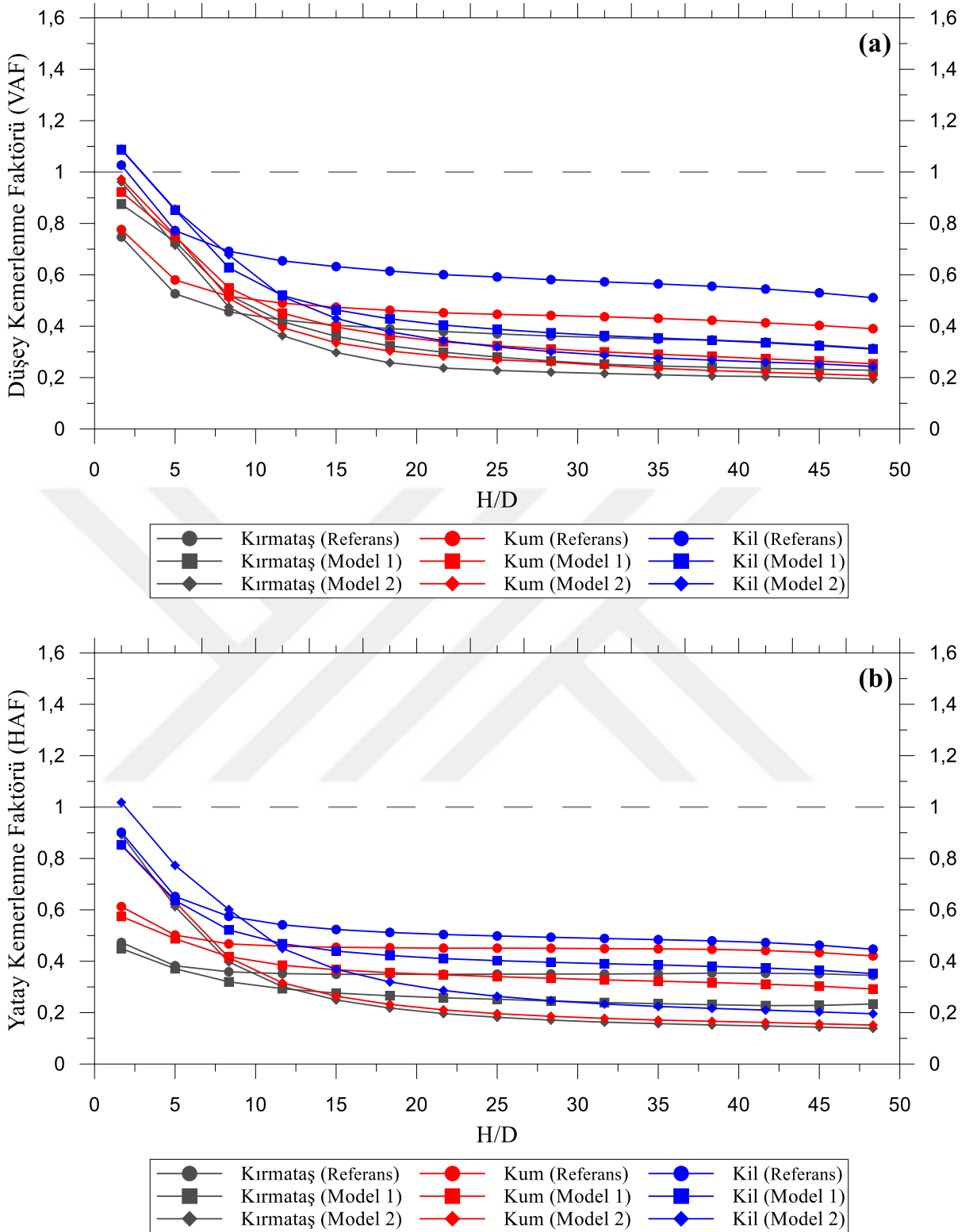
Şekil 6.11. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile Boru P3c’de meydana gelen şekil değişimleri a) Yatay şekil değişirme b) Düşey şekil değişirme

P4 olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.12’de ve şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 6.13’te verilmiştir.

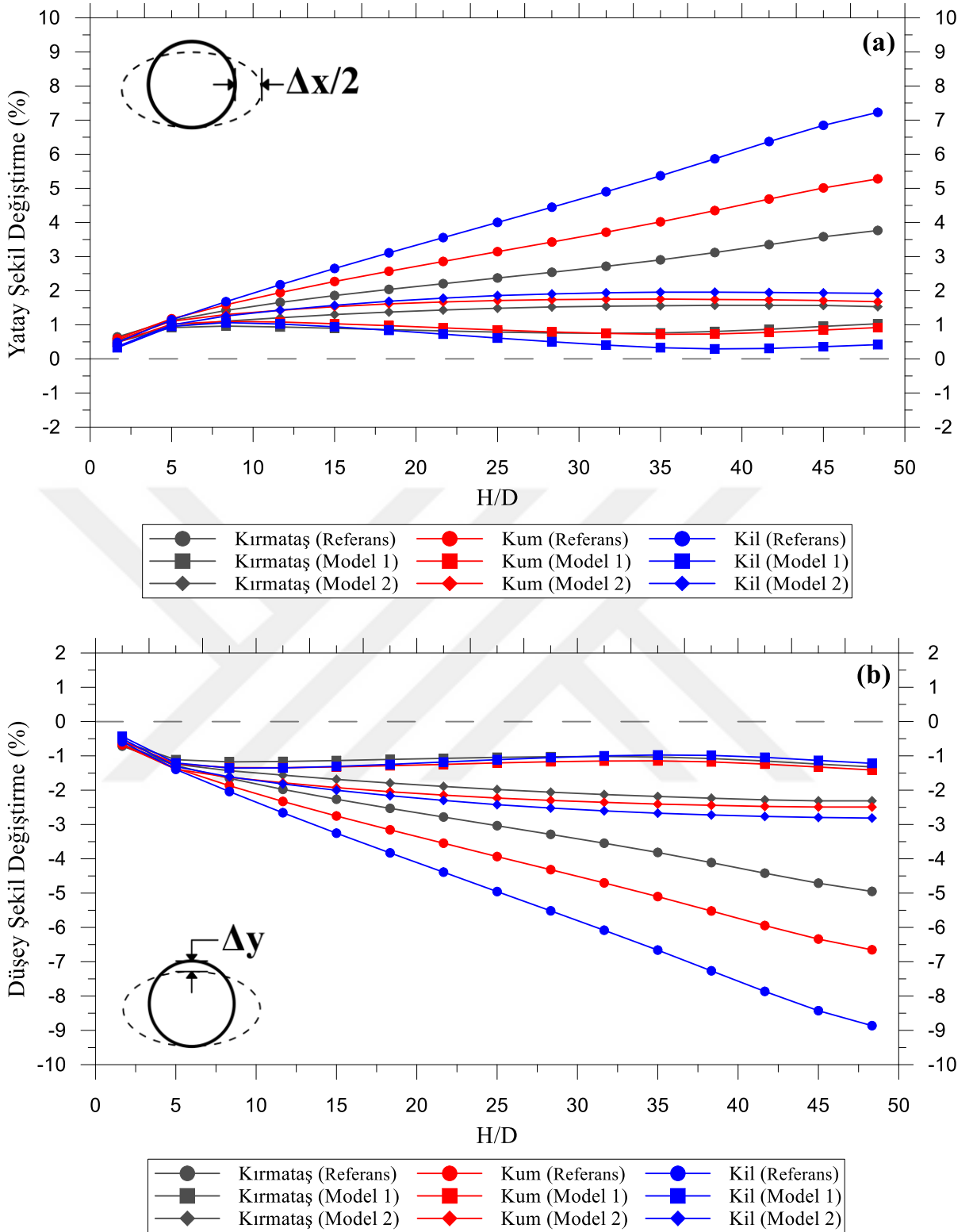
0,6 m çaplı borunun düşey kemerlenme faktörü (VAF) grafiği incelendiğinde EPS kullanımı ile birlikte elde edilen değerlerin yaklaşık olarak aynı seviyelerde olduğu görülmektedir. H/D oranının yaklaşık olarak 48 değerini aldığı son seviyede her iki EPS’li modelin kırmataş ve kum geri dolguda kullanımıyla VAF değerleri 0,20 – 0,25 değerleri arasında elde edilmiştir. Aynı H/D seviyesinde kil geri dolguyla birlikte Model 1’in kullanılmasıyla VAF değeri 0,30 olurken, Model 2’nin kullanılmasıyla VAF değeri 0,24 olarak elde edilmiştir.

Yatay kemerlenme faktörü (HAF) grafiği incelendiğinde elde edilen değerlerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. H/D oranının 48 değerini aldığı seviyede HAF değeri kırmataş geri dolguda Model 1 kullanımıyla 0,23 olurken, Model 2 kullanımıyla 0,14 olmuştur. Aynı H/D oranında kum geri dolguda elde edilen HAF değeri Model 1’de 0,28 iken Model 2’te 0,15’tir. Kil geri dolguda ise Model 1 ile 0,34 değeri, Model 2’de 0,20 değeri elde edilmiştir.

P4’ün şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde Model 1’de yatay şekil değiştirme oranları kırmataş geri dolguda %3,8 seviyesinden %1,04 seviyesine, kum geri dolguda %5,4 seviyesinden %0,94 seviyesine ve kil geri dolguda %7,4 seviyesinden %0,43 seviyesine düşmüştür. Yine Model 1 için düşey şekil değiştirme oranları ise kırmataş geri dolguda %-5 seviyesinden %-1,3 seviyesine, kum geri dolguda %-6,7 seviyesinden %-1,4 seviyesine ve kil geri dolguda %-9 seviyesinden %-1,2 seviyesine düşmüştür.



Şekil 6.12. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P4’de elde edilen kemerlenme grafikleri  
a) Düşey kemerlenme faktörü değişimi b) Yatay kemerlenme faktörü değişimi



Şekil 6.13. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P4’te meydana gelen şekil değişimleri  
a) Yatay şekil değişirme b) Düsey şekil değişirme

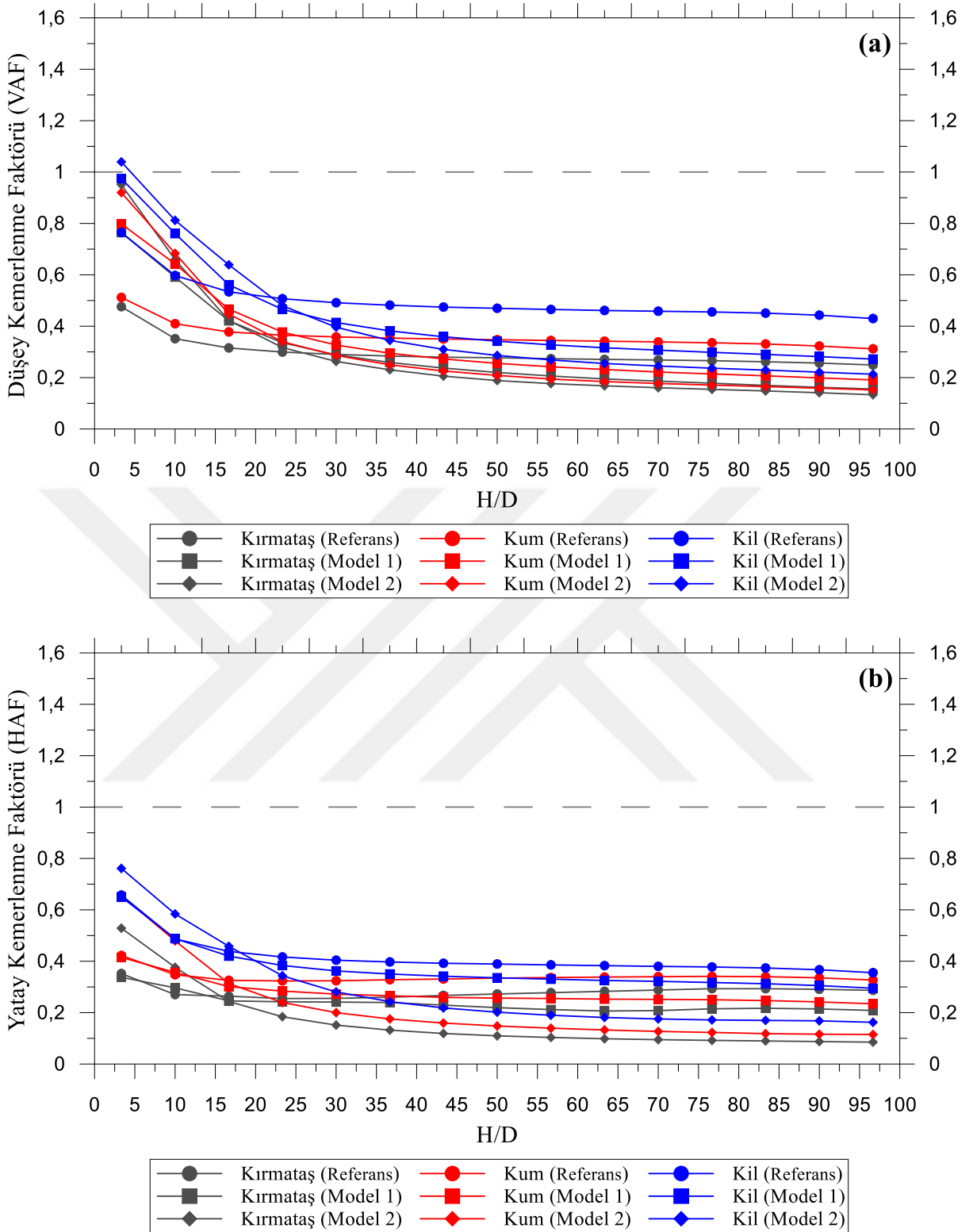


P5 olarak ifade edilen boruya ait kemerlenme faktörü grafikleri Şekil 6.14'te ve şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 6.15'te verilmiştir.

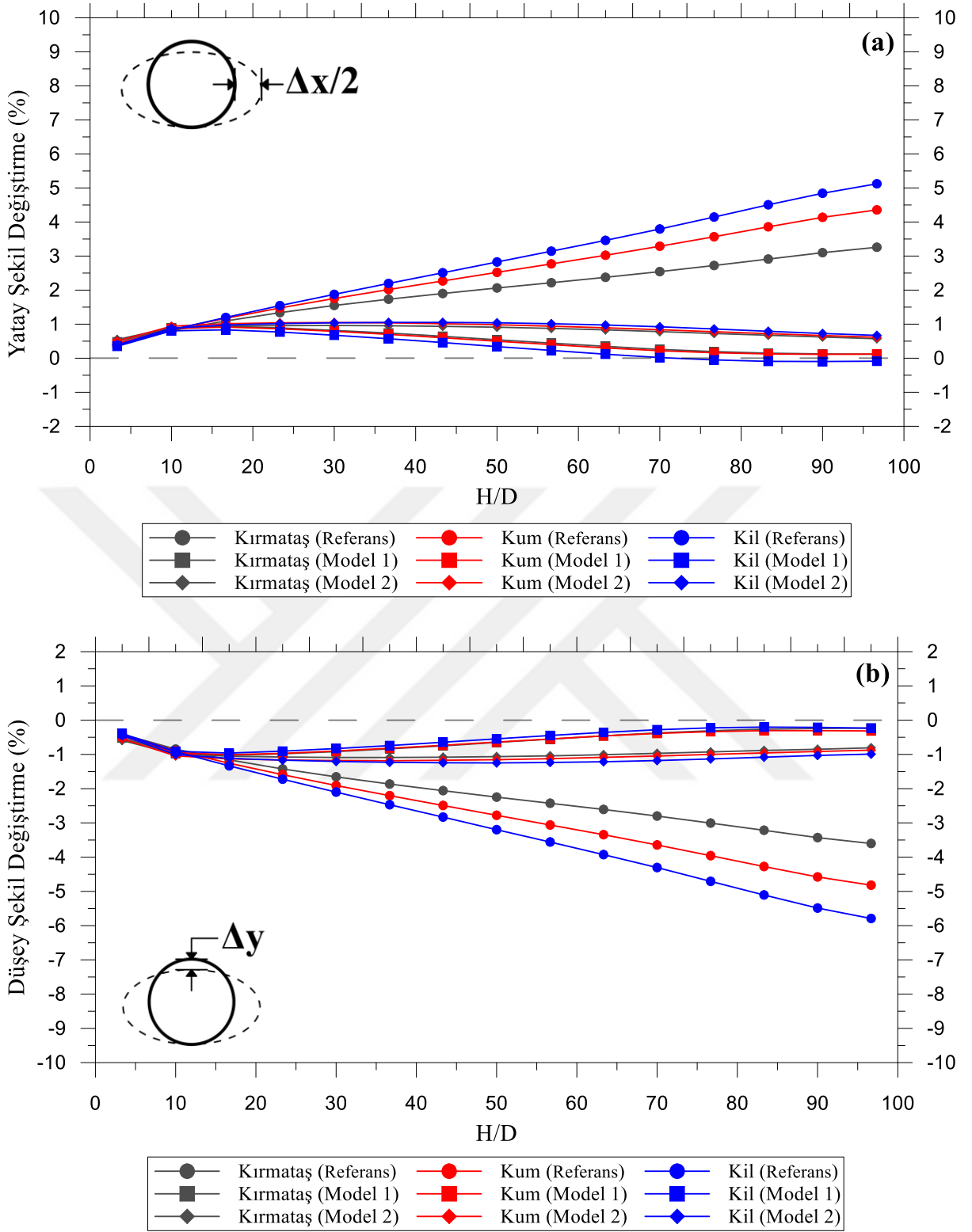
0,3 m çaplı borunun düşey kemerlenme faktörü (VAF) grafiği incelendiğinde kırmataş ve kum geri dolguda elde edilen değerlerin benzer olduğu görülmektedir. H/D oranının 96 değerini aldığı seviyede granüler geri dolguda EPS kullanımıyla VAF değerleri yaklaşık 0,15 değerini almıştır. Kil geri dolguda aynı H/D oranında Model 1 ile 0,26 değeri, Model 2'de 0,20 değeri elde edilmiştir.

Yatay kemerlenme faktörü (HAF) grafiği incelendiğinde bütün geri dolgu malzemeleri için en düşük HAF değerleri Model 2 ile elde edilmiştir. Kırmataş geri dolguda HAF değeri Model 1'de 0,20 iken Model 2'de 0,08 olmuştur. Kum geri dolguda Model 1 kullanımında 0,22 değeri elde edilirken Model 2'de 0,10 değeri elde edilmiştir. Kil geri dolgu kullanımıyla Model 1'de 0,28 değeri, Model 2'de 0,16 değeri elde edilmiştir.

P5'in şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde Model 1 ve Model 2 kullanımı ile şekil değiştirme oranları birbirine yakın oranlarda elde edilmiştir. Ancak yine de Model 1'de şekil değiştirme oranları daha düşük olarak elde edilmiştir. Model 1 kullanımı ile yatay şekil değiştirme oranları kırmataş geri dolguda %3,3 seviyesinden %0,10 seviyesine, kum geri dolguda %4,2 seviyesinden %0,11 seviyesine ve kil geri dolguda %5,2 seviyesinden %-0,1 seviyesine düşmüştür. Yine Model 1 için düşey şekil değiştirme oranları ise kırmataş geri dolguda %-3,65 seviyesinden %-0,22 seviyesine, kum geri dolguda %-4,9 seviyesinden %-0,3 seviyesine ve kil geri dolguda %-5,9 seviyesinden %-0,22 seviyesine düşmüştür.



Şekil 6.14. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P5’te elde edilen grafikler a) Boru tacına etki eden düşey gerilme b) Düşey kemerlenme faktörü değişimi



Şekil 6.15. Farklı geri dolgu malzemesi kullanımı ile P5'te meydana gelen şekil değişimleri  
a) Yatay şekil değişirme b) Düşey şekil değişirme

Bu bölümde verilen kemerlenme grafikleri genel olarak incelenirse düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) eğrileri geri dolgu türü fark etmeksizin birbirine benzemektedir. VAF ve HAF eğrileri yüksek değerlerden başlayıp H/D oranının artışı ile bu değerler azalarak eğri oldukça yatay bir duruma gelmiştir. EPS kullanılmayan durumu ifade eden Referans'da VAF ve HAF yüksek değerler alırken EPS kullanılan Model 1 ve Model 2 ile bu değerlerde azalmalar sağlanmıştır. Kil geri dolgu kullanıldığı durumda diğer geri dolgu türlerine göre her model türü içinde en yüksek VAF ve HAF değerleri elde edilmiştir. Bir diğer durum ise yüksek çaplı borularda VAF ve HAF yüksek değerler alırken boru çapının azalmasıyla birlikte daha düşük değerler almıştır, en düşük değerler ise 0,30 m çaplı P5 olarak ifade edilen boruda elde edilmiştir.

Şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde EPS'siz durumda en yüksek değerler yine kil malzeme kullanımında görülmüştür. EPS kullanımı ile geri dolgu olarak kullanılan malzemelerin hepsinde borunun yaptığı şekil değiştirme değerleri azalmıştır. Büyük çaplı borularda kil geri dolguda EPS kullanımı ile şekil değiştirme değerleri granüler geri dolgu malzemelerinin kullanımı ile elde edilen değerlerin altına inmiştir. Bu duruma kil geri dolguda borunun yanlarına yerleştirilen EPS geofoamın granüler geri dolguda yerleştirilen EPS geofoama göre daha fazla deformasyona uğraması neden olmuştur. Bu şekilde boru tersine deformasyon göstermiştir.

Esnek boruların rijitliği geri dolgu ve dolgu inşası ile oluşan yüklere karşı borunun şeklini korumasında önemlidir. Ayrıca borunun yük altında nasıl bir performans göstereceği konusunda fikir vermektedir. Çizelge 6.1'de verilen boru rijitliklerine bakılacak olursa en düşük rijitlik değerleri 1,5 m ve 0,6 m çaplı borularda elde edildiği görülmektedir. En yüksek boru rijitliği değeri de 0,762 m çaplı boruda 650 kN/m/m değeriyle elde edilmiştir. Bu çalışmada boru rijitlik değişiminin etkisini görmek için 0,762 m çaplı PVC borularda elde edilen şekil değiştirmeler ve gerilmeler incelenmiştir. İncelenen borular P3b ve P3c olarak ifade edilen borulardır. P3c'nin rijitliği, P3b'nin rijitliğinin yaklaşık yarısı kadar olduğu görülmektedir.

Bu borulara ait şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.9 ve Şekil 6.11'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde EPS kullanılmayan durumu ifade eden Referans'da boruda meydana gelen şekil değiştirme oranları düşük rijitlikli boruda daha yüksektir. Bu durum iki boru için EPS'siz durumda elde edilen şekil değiştirme oranlarının verildiği Çizelge 6.3'te görülmektedir. Şekil 6.9 ve Şekil 6.11'deki grafiklerde görüldüğü gibi EPS kullanımı ile bütün geri dolgu malzemelerinde şekil değiştirme oranları azalmaktadır. Model 1 ve Model 2 ile elde

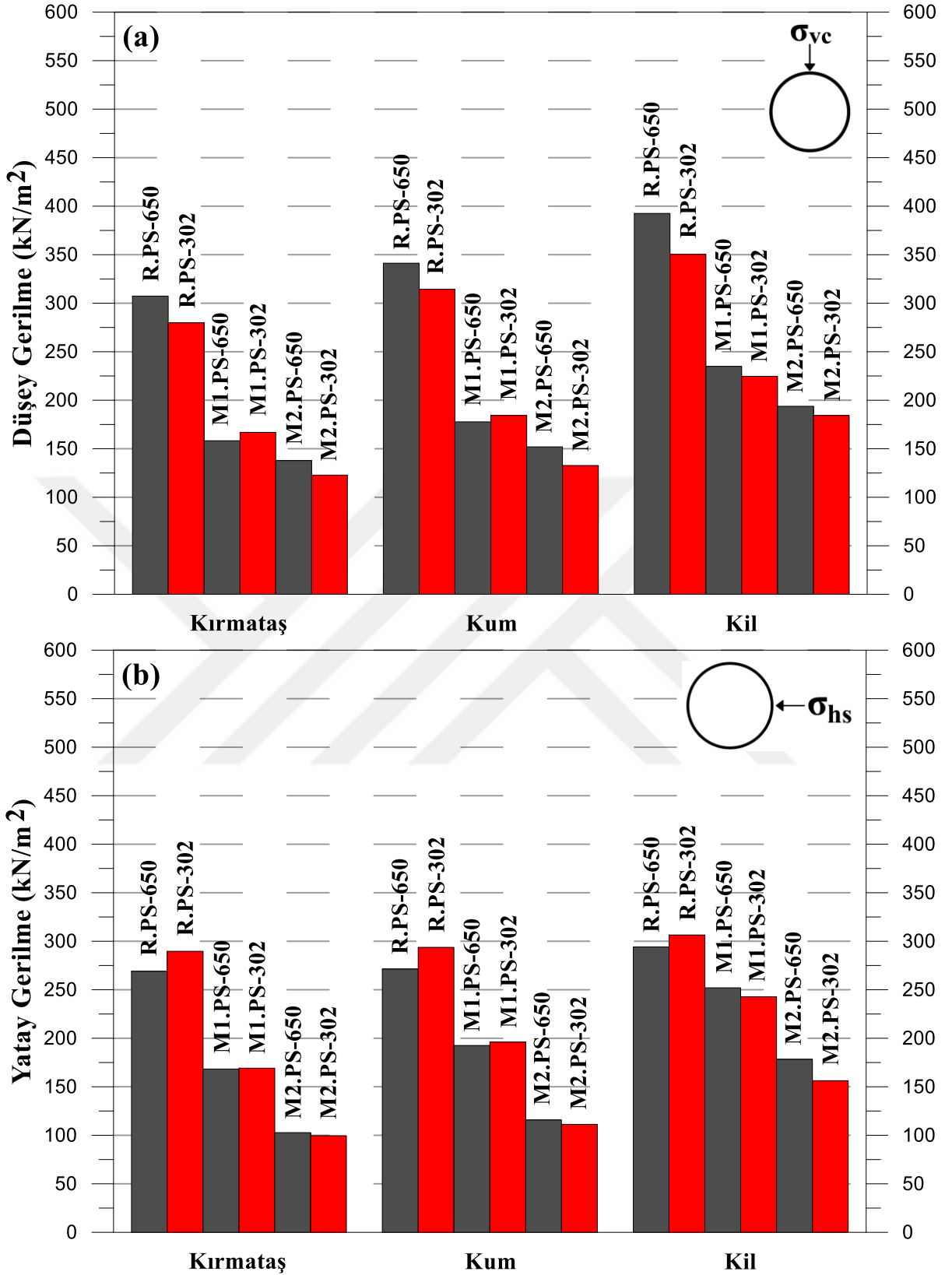
edilen şekil değiştirme oranları kullanılan geri dolgu malzeme türlerine göre kendi içinde yaklaşık olarak aynı seviyelere inmiştir.

Çizelge 6.3. Farklı rijitlikteki D-0,76.PS-650 (P3b) ve D-0,76.PS-302 (P3c) borularında meydana gelen şekil değiştirme oranları

	Kırmataş		Kum		Kil	
	$\Delta x$ (%)	$\Delta y$ (%)	$\Delta x$ (%)	$\Delta y$ (%)	$\Delta x$ (%)	$\Delta y$ (%)
D-0,76.PS-650 (P3b)	3,71	-4,18	5,12	-5,63	6,03	-6,66
D-0,76.PS-302 (P3c)	3,57	-4,47	5,67	-6,24	7,55	-8,13

Boru rijitliklerinin gerilmeler üzerinden incelenmesi için Şekil 6.16'da verilen sütun grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.16'a göre EPS kullanılmayan Referans'da yüksek rijitlikli boruya etki eden düşey gerilmeler düşük rijitlikli boruya etki eden gerilmelere göre kırmataş ve kum geri dolgu yaklaşık 30 kN/m<sup>2</sup> fazlayken bu miktar kil geri dolguda 46 kN/m<sup>2</sup> olmuştur. Şekil 6.16b'deki yatay gerilme grafiği incelendiğinde düşük rijitlikli boruya etki eden gerilmelerin daha fazla olduğu görölmektedir. Fazla gerilme miktarı kırmataş ve kum geri dolguda 20 kN/m<sup>2</sup> iken bu miktar kil geri dolguda 10 kN/m<sup>2</sup>'dir. Hem düşey gerilme hem yatay gerilme grafiklerinde de göröldüğü gibi EPS kullanımı ile boruya etkileyen gerilmeler kullanılan geri dolgu malzeme türlerine göre kendi içinde yaklaşık olarak aynı seviyelere inmiştir.

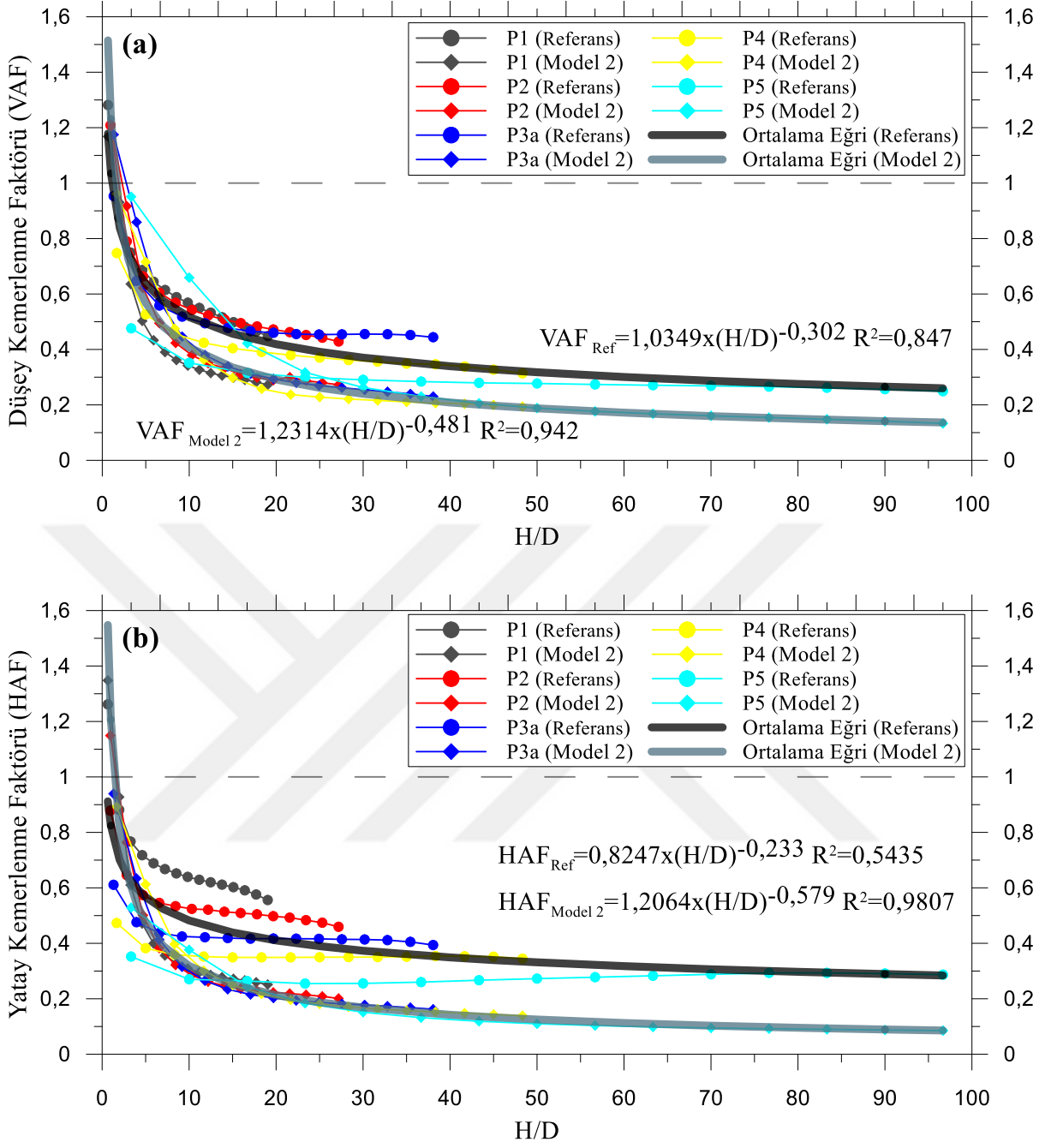
Bu durumda yüksek rijitlikli bir boru yerine daha düşük rijitlikli bir boruyu EPS geofom ile kullanarak iyi bir performans elde edilebilir. Yani düşük rijitlikli boru ile yüksek rijitlikli boru performansı sağlanır. Düşük rijitlikli boruyla birlikte EPS kullanımının bir diğer avantajı da yüksek rijitlikli borunun neden olduğu yüksek maliyeti azaltmasıdır. Akınay (2020)'nin yaptığı çelik boru ve HDPE boru arasındaki maliyet analizi de maliyetin azaldığını göstermiştir. Maliyet analizinde çelik boru yerine HDPE borunun EPS geofom ile birlikte kullanımı sonucunda maliyetlerde %50 azalma sağlanacağı belirlenmiştir.



Şekil 6.16. Farklı rijitlikteki D-0,76.PS-650 (P3b) ve D-0,76.PS-302 (P3c) borularına etki eden gerilmeler a) Boru tacına etkiyen düşey gerilme b) Boru yan duvarına etkiyen yatay gerilme

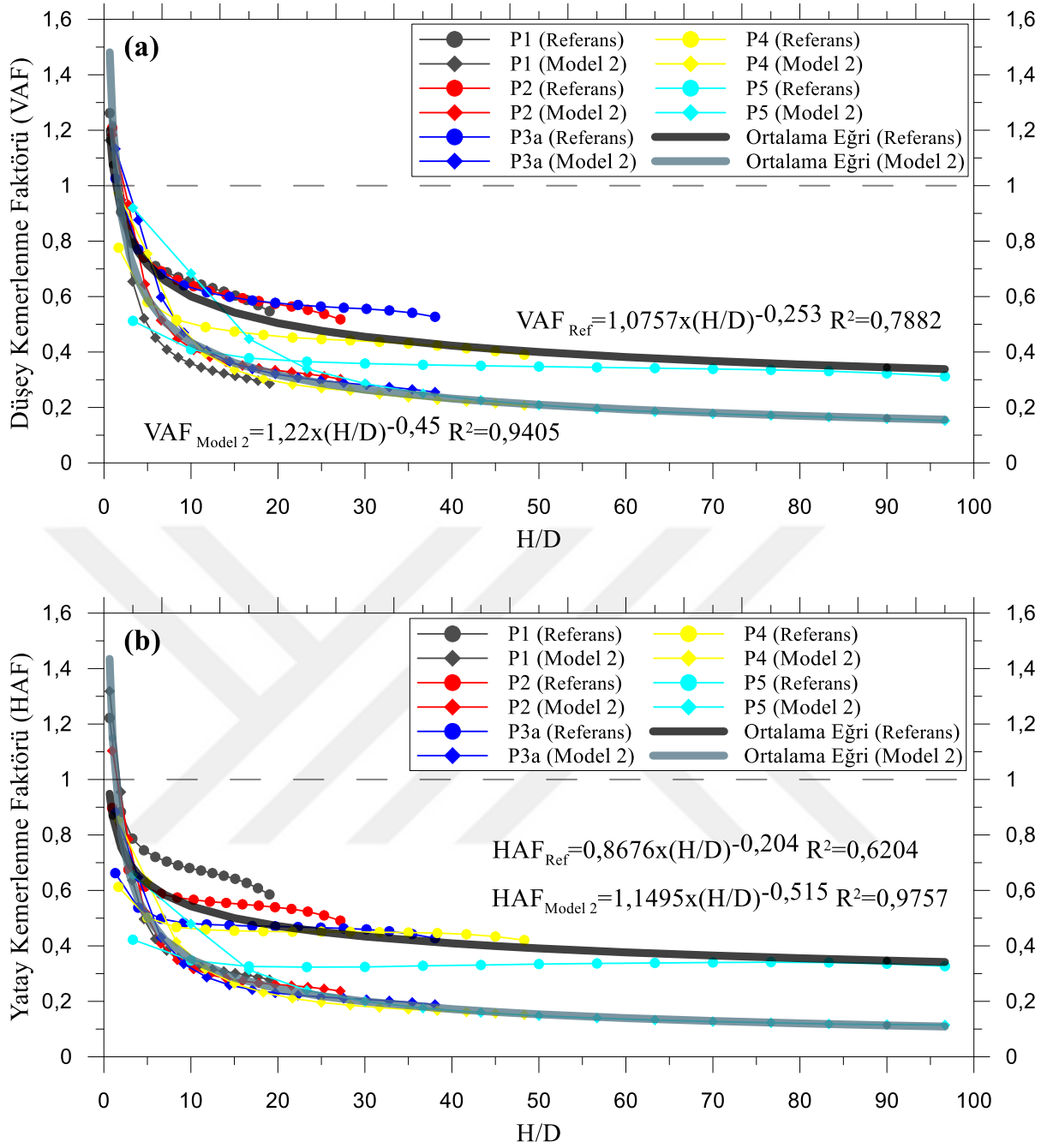
Sayısal analizlerle farklı borular için elde edilen kemerlenme faktörü değerleri Şekil 6.17 – Şekil 6.19 arasında verilen grafiklerde görüldüğü gibi aynı grafikler üzerinde gösterilmiştir. Yani dolgu yüksekliği / boru çapı (H/D) oranının değişimi ile farklı boru çapları için elde edilen değerler aynı grafik üzerinde verilmiştir. Bu grafiklerde Çizelge 6.1’de verilen 5 farklı çaptaki HDPE boru kullanımı ile EPS’siz durum Referans ve boru etrafının EPS ile sarıldığı durum Model 2’de elde edilen değerler kullanılmıştır. Kullanılan her bir geri dolgu türü için elde edilen değerler ayrı ayrı grafiklerde gösterilmiştir.

Elde edilen grafiklere bakılırsa bir boruya ait eğrinin bittiği noktadan diğer boruya ait eğrinin devam ettiği söylenebilir. Bu durumda H/D oranının artışı ile kemerlenme oranlarının değişiminde bir devamlılık olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu durumu daha net görebilmek için 5 boruya ait eğriler üzerinden geçen ortalama eğriler Referans ve Model 2 için geçirilmiştir. Belirtilen bu ortalama eğriye ait formüller belirlenerek H/D oranına bağlı olarak yazılmıştır. Bu formüller yardımı ile kabaca düşey kemerlenme ve yatay kemerlenme değerleri istenilen H/D oranına bağlı olarak belirlenebilir. Diğer yandan H/D oranının artışıyla birlikte kemerlenme değerlerinde düşüş sağlanmıştır. Bu da dolgu yüksekliğinin artışının veya boru çapının azaltılmasının kemerlenme faktörü değerlerinin düşmesini sağladığı söylenebilir.

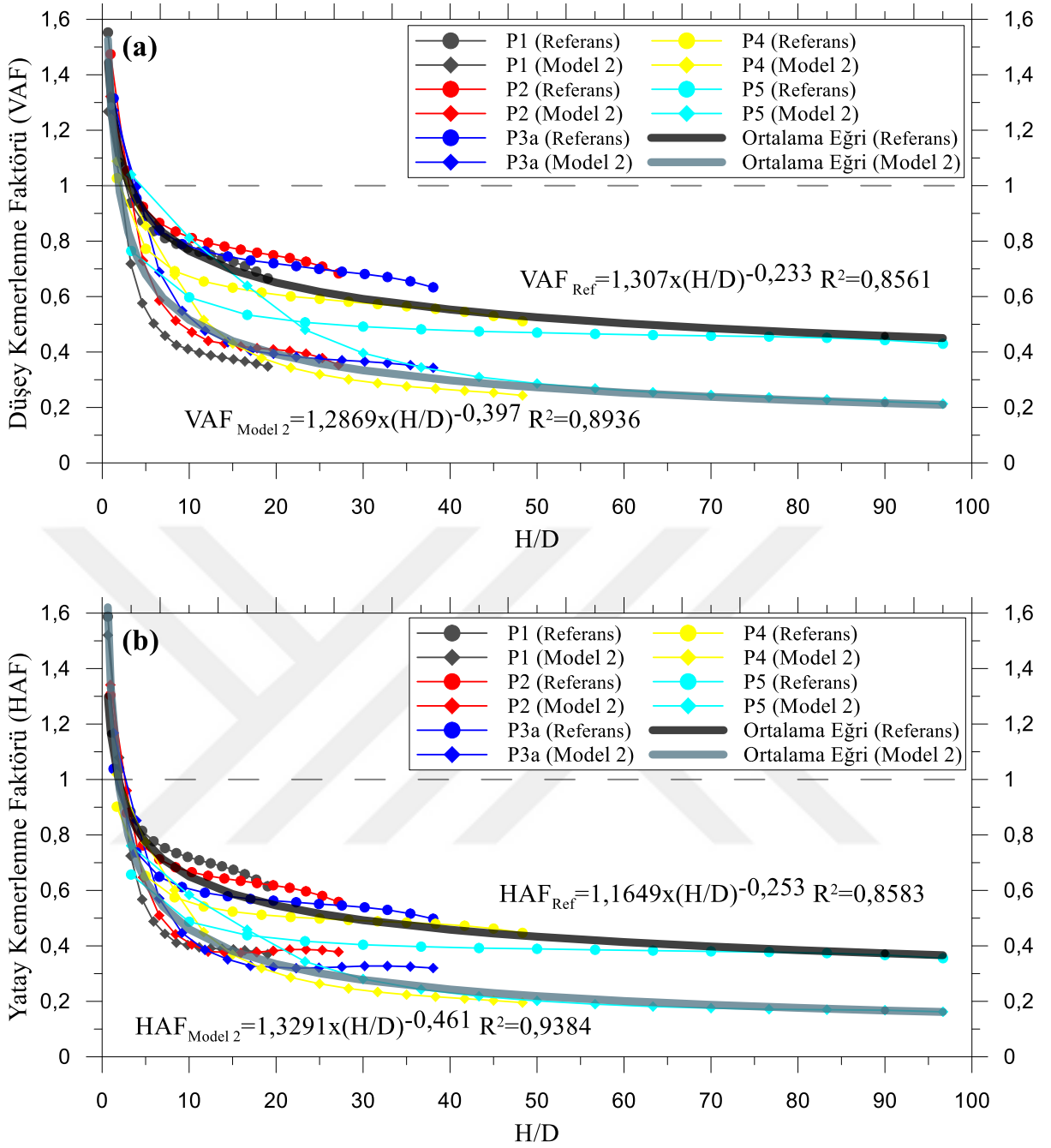


Şekil 6.17. Kırmataş geri dolguda farklı borulara ait kemerlenme değerlerinin birlikte gösterilmesi a) Düşey kemerlenme faktörü değerleri b) Yatay kemerlenme faktörü değerleri





Şekil 6.18. Kum geri dolguda farklı borulara ait kemerlenme değerlerinin birlikte gösterilmesi  
a) Düşey kemerlenme faktörü değerleri b) Yatay kemerlenme faktörü değerleri



Şekil 6.19. Kil geri dolguda farklı borulara ait kemerlenme değerlerinin birlikte gösterilmesi a) Düşey kemerlenme faktörü değerleri b) Yatay kemerlenme faktörü değerleri

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Bölüm 3'te detayları verilen Derin Gömü Projesi kapsamında gerçekleştirilen arazi deneyi Plaxis 2D programında modellenerek kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. EPS geofoam malzemenin boru davranışı üzerindeki etkinliği kalibrasyon yapılmış modeller üzerinden sayısal analizlerle incelenmiştir. Bu incelemelerde boruya etkileyen gerilme verileri ile boruda meydana gelen şekil değiştirme verileri kullanılmıştır. Yapılan ilk çalışmalarda boru üzerine yerleştirilen EPS malzemenin kalınlığı, genişliği ve yoğunluğu incelenmiştir. Ardından arazi deneyinde 6 m ve 12 m olarak belirtilen dolgu yüksekliğinin üzerine çıkılarak 30 m'lik dolgu yükü altında EPS'siz ve EPS'li durumlarda borulara etkileyen gerilmeler ve borularda meydana gelen şekil değiştirmeler kontrol edilmiştir. Bu çalışmanın devamında ise kum ve kırmataş geri dolgu malzemesi çıkarılarak yerine kil malzeme yerleştirilerek borular üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak ise kırmataş, kum ve kil geri dolgu içerisine arazi deneyinde kullanılan borulara göre daha küçük çaplı olan borular yerleştirilerek boru davranışı incelenmiştir. Bu bölümde ise yapılan bu analizlerden elde edilen sonuçlar üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

### 7.1. EPS Malzemenin Kalınlık Değişimi

Çizelge 5.1'de verilen EPS kalınlıkları boru üzerine yerleştirilerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre boru tacına etki eden gerilmelerin azalma oranında EPS kalınlık artışının önemli derecede etkilemediği görülmüştür. Boru yan duvarına etki eden gerilmeler ise EPS kalınlık artışı ile genel olarak azalma eğilimindedir. Şekil 5.12 ile Şekil 5.16 arasında verilen sütun grafiklerde görülen bir diğer durum ise 762 mm çaplı borulara etkileyen gerilmelerdeki azalma oranı kırmataş geri dolgu kullanımı ile kum geri dolgu kullanımına göre daha fazla olmuştur. 1067 mm ve 1524 mm çaplı boruların kullanımında kırmataş geri dolgu kullanımı ile oluşan bu durum görülmemiştir. Geri dolgu türleri kendi içerisinde değerlendirecek olursak elastisitesi daha yüksek olan yani rölatif kompaksiyon oranı daha yüksek olan zeminlerde gerilmelerin azalma oranları daha fazla olmuştur.

EPS geofoam kalınlığının boruda meydana gelen yatay ve düşey şekil değiştirmeler üzerindeki etkisi Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilen grafiklerden görülebilmektedir. Bu grafiklere göre EPS malzemedeki kalınlık artışı ile boruda meydana gelen şekil değiştirmelerde azalma oranları artmıştır.

## 7.2. EPS Malzemenin Genişlik Değişimi

Boru üzerine yerleştirilen EPS malzemenin genişlik değişiminin borular üzerindeki etkinliğini incelemek için sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerde EPS genişliği olarak D, 1,5D ve 2D boyutları belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre EPS genişliği  $w = 2D$  olduğu durumda boruya etki eden gerilmeler,  $w = D$  durumunda elde edilen gerilmelere göre yaklaşık  $10 \text{ kN/m}^2$ 'yi bulan artışlar olmuştur. Aynı durum boruda meydana gelen şekil değiştirmelerde de gözlenmiş ve %0,2'yi bulan artışlar meydana gelmiştir. EPS malzemenin genişlik artışının boru davranışını olumlu yönde etkilemediği görülmüştür.

## 7.3. EPS Malzemenin Yoğunluk Değişimi

Boru üzerine yerleştirilen EPS malzemenin yoğunluk değişimi ile boruya etkileyen gerilmelerde ve boruda meydana gelen şekil değiştirmelerde meydana gelecek değişimler incelenmiştir. Bu doğrultuda Çizelge 4.10'da verilen  $40 \text{ kg/m}^3$ ,  $30 \text{ kg/m}^3$  ve  $20 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklarındaki EPS geofoam malzemeler kullanılmıştır. Analizler sonucunda gerilmelerde ve şekil değiştirmelerde elde edilen sonuçlar Şekil 5.25 – Şekil 5.28 arasında verilen grafiklerde sunulmuştur. Grafikler genel olarak incelendiğinde EPS yoğunluğunun azalması ile borulara etkileyen gerilmelerde ve boruların yaptığı şekil değiştirmelerde azalma oranı artmaktadır.

Gerilme değişimi grafikleri incelendiğinde kırmataş geri dolguya gömülü olan borularda başlangıçtan itibaren borulara etkileyen gerilme değerlerinde azalma sağlanmıştır. Ancak kum geri dolgu içerisinde yer alan borularda başlangıçta gerilme değerlerinde artışlar görülmektedir. Dolgu yükünün artması ile meydana gelen bu artışlarda azalma sağlanmıştır.

Şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde ise kırmataş geri dolgu içerisinde yer alan boruların yaptığı şekil değiştirmelerde önemli değişimlerin oluşmadığı, kum geri dolgu içerisinde gömülü olan borularda ise EPS yoğunluğunun azalması ile boruların yaptığı şekil değiştirme oranının azaldığı görülmüştür.

## 7.4. Kalın Dolgu Yükünün Etkisi

Arazi deneyinde borular üzerine etkileyen 6,1 m ve 12,2 m dolgu yükünün üzerine çıkılarak daha kalın bir dolgu yükü altında boruların davranışını görebilmek için borular üzerine 30 m'lik dolgu eklenmiştir. Kalın dolgu yükünün etkisi Şekil 6.1'de verilen modeller üzerinden incelenmiştir. Bu analizlerde kullanılan kırmataş, kum ve kil geri dolgu malzemeleri ile farklı

geri dolgu malzemelerinin boru davranışı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Analizlerde 1,524 m, 1,067 m, 0,762 m, 0,60 m ve 0,30 m çaplarında yedi farklı boru kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde en yüksek düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) değerleri kil geri dolgu kullanıldığı durumda elde edilmiştir. En düşük değerler ise genellikle kırmataş geri dolgu kullanımı ile elde edilmiştir. Boru etrafının EPS geofom ile sarıldığı Model 2’de H/D oranının artmasıyla VAF ve HAF değerleri her üç geri dolgu türü içinde hemen hemen aynı değerlere inmiştir. Kullanılan modellere göre elde edilen VAF ve HAF değerlerini karşılaştırsak en yüksek değerler Referans modelde elde edilirken en düşük değerler Model 2’de elde edilmiştir. Model 1’de elde edilen değerler ise diğer iki modelde elde edilen değerlerin arasında yer almaktadır.

Şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde EPS kullanılmayan Referans modelde borular en fazla şekil değiştirmeyi kil geri dolguda yapmıştır. Kil geri dolguyu sırasıyla kum ve kırmataş geri dolgu takip etmiştir. Kullanılan her iki EPS’li modelle birlikte şekil değiştirmelerde azalmalar sağlanmıştır.

Genel olarak değerlendirecek olursak kırmataş, kum ve kil malzeme ile belirtilen EPS modellerinin kullanımı VAF, HAF ve şekil değiştirmelerde önemli azalmalar sağlanmaktadır. Bu durum geleneksel geri dolgu olarak kullanılan kum ve kırmataş malzemenin yerine kil malzemenin kullanılabilmesini göstermektedir. Kırmataş ve kum malzemenin bulunmadığı durumda kil malzeme ile birlikte EPS geofom malzeme kullanılarak borunun büyük deformasyonlar göstermeden işlevini gerçekleştirebileceği söylenebilir.

İncelenen bir diğer parametre olan boru rijitliğinde yaklaşık olarak %50 oranında bir azalmanın olmasıyla gerilmelerde ve şekil değiştirmelerde EPS’siz durumda bir miktar artış görülmüştür. Ancak EPS geofom kullanılarak gerilmeler ve şekil değiştirmeler yaklaşık olarak aynı seviyelerde elde edilmiştir. Bu durum daha düşük rijitlikteki boruların EPS ile birlikte kullanılarak daha düşük maliyetli çözümler sunabileceğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Aab e, R. ve Frydenlund, T. E. (2011). *40 years of experience with the use of EPS geofoam blocks in road construction*. Paper presented at the 4th International Conference on the Use of Geofoam Blocks in Construction Applications, Lillestrom, Norway.
- Aab e, R., Bartlett, S. F., Duskov, M., Freydenlund, T. E., Mandal, F. N., Negusse, D.,  zer, A. T., Tsukamoto, H. ve Vaslestad, J. (2019). *Geofoam blocks in civil engineering applications*. Paper presented at the 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, Kyrenia, Northern Cyprus. doi:10.1007/978-3-319-78981-1\_1
- Akınay, E. (2010). *Gömülü esnek boru davranışının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akınay, E. (2017). *Sıkışabilir yatak malzemesi kullanımının gömülü esnek boru davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi* (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akyelken, F. A. (2020). *Genleştirilmiş polistiren malzeme kullanımının gömülü esnek boru davranışına etkilerinin sayısal analizler ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Awol, T. A. (2012). *A parametric study of creep on EPS geofoam embankments* (Master's thesis), Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- AWWA (2008). *Concrete pressure pipe*. Manual of Water Supply Practices – M9 (3rd ed.), American Water Works Association.
- Bartlett, S. F., Lingwall, B. N. ve Vaslestad, J. (2015). Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 450-461. doi: doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.019
- Bartlett, S., Arellano, D., Vaslestad, J., Aab e, R. ve Ahmed, T. (2014). *Bridge foundations supported by EPS geofoam on soft soil*. Paper presented at the 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany.
- Bashir, R. (2000). *Analysis and design of buried pipelines* (Master's thesis), King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia.
- Du, Y. J., Zhou, M., Wang, F., Arulrajah, A. ve Horpilbuluk. S. (2017). Earth pressures on the trenched HDPE pipes in fine-grained soils during construction phase: Full-scale field trial

- and finite element modeling. *Transportation Geotechnics*, 12, 56-69. doi: dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.002
- Elragi, A., Negusse, D. ve Kyanka, G. (2001). *Sample size effects on the behavior of EPS geof foam*. Paper presented at the Soft Ground Technology Conference, Noordwijkerhout, the Netherlands. doi:10.1061/40552(301)22
- Ertuğrul, Ö. L. ve Trandafir, A. C. (2011). Reduction of lateral earth forces acting on rigid nonyielding retaining walls by EPS geof foam inclusions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12), 1711-1718. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000348.
- Handy, R. L. ve Spangler, M. G. (2007). *Geotechnical engineering* (5th ed.). McGrawHill.
- Hazarika, H. (2006). Stress-strain modeling of EPS geof foam for large-strain applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(2), 79-90. doi:10.1016/j.geotexmem.2005.11.003
- Horvath, J. S. (1994). Expanded polystyrene (EPS) geof foam: an introduction to material behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(4), 263-280. doi:10.1016/0266-1144(94)90048-5
- Horvath, J. S. (1997). The compressible inclusion function of eps geof foam. *Geotextiles and Geomembranes*, 15, 77-120. doi:10.1016/S0266-1144(97)00008-3
- Kang, J. (2007). *Soil-structure interaction and imperfect trench installations as applied to deeply buried conduits* (Ph. D. Dissertation), Graduate Faculty of Auburn University, Auburn, Alabama, USA.
- Kang, J. (2019). Finite element analysis for deeply buried concrete pipes in proposed imperfect trench installations with expanded polystyrene (EPS) foams. *Engineering Structures*, 189, 286-295. doi:10.1016/j.engstruct.2019.03.083
- Kılıç, H. ve Akınay, E. (2019). Gömülü HDPE borularda esneme davranışının incelenmesi. *Teknik Dergi*, 30(5), 9373-9398. doi: doi.org/10.18400/tekderg.397254
- Kim, H., Choi, B. ve Kim, J. (2010). Reduction of Earth Pressure on Buried Pipes by EPS Geof foam Inclusions. *Geotechnical Testing Journal*, 33(4), 304-313. doi: doi.org/10.1520/GTJ102315
- Mada, H. (2005). *Numerical modeling of buried pipes with flowable fill as a backfill material* (Master's thesis), West Virginia University, West Virginia, USA.

- Marston, A. (1930). The theory of external loads on closed conduits in the light the latest experiments. Bulletin No:96, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames, Iowa.
- Marston, A. ve Anderson, A. O. (1913). The theory of loads on pipes in ditches and tests of cementand clay drain tile and sewer pipe. Bulletin No:31, Iowa Engineering Experiment Station , Iowa State College, Ames, Iowa.
- Masada, T. ve Sargand, S. (2011). Thermoplastic pipe deep burial study in Ohio: further analysis of field performance data. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2(4), 132-138. doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000086
- McAfee, R. P. ve Valsangkar, A. J. (2005). Performance of an induced trench installation. *Journal of Transportation Research Board, Transportation Research Record*, No: 1936, 230-237.
- Meguid, M. A. (2019). *Earth pressure distribution on rigid pipe söver lain by TDA inclusion*. Paper presented at the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures, Egypt. doi:10.1007/978-3-030-01902-0\_1
- Meguid, M. A. ve Hussein, M. G. (2017). A numerical procedure for the assessment of contact pressures on buried structures overlain by EPS geofoam inclusion. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(1), 1-14. doi: 10.1007/s40891-016-0078-y
- Meguid, M. A., Ahmed, M. R., Hussein, M. G. ve Omeman, Z. (2017b). Earth pressure distribution on a rigid box covered with U-shaped geofoam wrap. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(2), 1-14. doi: 10.1007/s40891-017-0088-4
- Meguid, M. A., Hussein, M. G., Ahmed, M. R., Omeman, Z. ve Whalen, J. (2017a). Investigation of soil-geosynthetic-structure interaction associated with induced trench installation. *Geotextiles and Geomembranes*, 45, 320-330. doi:10.1016/j.geotexmem.2017.04.004
- Moran, A. T. (2001). *Comparison between Field and analytical results on the structural performance of deeply buried 30 – inc hdiameter thermoplastic pipes* (Master's thesis), Ohio University, Ohio, USA.
- Moser, A. P. ve Folkman, S. (2008). *Buried pipe design* (3rd ed.). McGraw Hill. doi:10.1036/007147689X



- Ossa, A. ve Romo, M. P. (2011). Dynamic characterization of EPS geofom. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(1), 40-50. doi:10.1016/j.geotexmem.2010.06.007
- Özer, A. T. ve Akınay, E. (2019). *First geofom roadway embankment application in Turkey*. Paper presented at the 5th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications, Kyrenia, Northern Cyprus. doi:10.1007/978-3-319-78981-1\_5
- Özer, A. T., Danyıldız, E., Akınay, E., Laçın, L., Alioğlu, Ö. K., İnallı, D., Vanlı, S., Dönmez, Ç., Özyayın, İ. K., Çelik, A., İreç, U., Tuğral, M. A., Marangoz, D. ve Marangoz, K. (2017, Mayıs 11-12). *Geofom blokların gömülü boru hatları üzerine inşa edilecek yol dolgularının inşasında kullanılması: bir vaka analizi*. Yedinci Ulusal Geosentetikler Konferansında sunulan bildiri, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Placido, R. ve Portelinha, F. H. M. (2019). Evaluation of geocomposite compressible layers as induced trench method applied to shallow buried pipelines. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(5), 662-670.
- Sağlamer, A. ve Balkaya, M. (2005, Eylül 22-24). *Gömülü boru hatlarının statik ve dinamik davranışı*. Antalya Yöresinin İnşaat Sorunları Konferansında sunulan bildiri, Antalya.
- Sargand, S. M. ve Masada, T. (2007). *Long – term monitoring of pipe under deep cover* (Rapor No: FHWA-OH-2007/15). Ohio Department of Transportation Office of Research and Development and U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Sargand, S. M., Hazen G. A, Masada, T., Schehl, D. J., Moran, A. T.ve Tarawneh, B. (2002). *Field verification of structural performance of thermoplastic pipe under deep backfill conditions* (Rapor No: FHWA/OH – 2002/023). Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration. doi:10.13140/RG.2.1.3195.4401
- Sargand, S. M., Masada, T., Tarawneh, B. ve Gruver, D. (2005). Field performance and analysis of large – diameter high – density polyethylene pipe under deep soil fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 31–51. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:1(39)
- Sladen, J. A. ve Oswell, J. M. (1988). The induced trench method – a critical review and case history. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), 541-549.
- Söylemez, B. (2017). *Laboratory experiments on improvement of buried flexible pipes by using geofom* (Master Thesis). Middle East Technical University, Ankara.

- Tafreshi, S. N. M., Darabi, N. J. ve Dawson, A. R. (2020). Combining EPS geofoam with geocell to reduce buried pipe loads and trench surface rutting. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3), 400-418. doi:10.1016/j.geotexmem.2019.12.011
- Tefera, T. H., Aab e, R., Bruun, H. ve Aunaas, K. (2010). FEM simulation of full scale and laboratory models test of EPS. *NPRA - Norwegian Public Roads Administration*.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley and Sons.
- Terzi, N. U., Yıldırım, S. (2009). Farklı zemin ortamlarına yerleştirilen esnek gömülü boruların düşey yükler altındaki Şekil değişiminin deneysel ve ampirik yöntemlerle incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1), 49-58.
- Terzi, N. U. (2007). *Gömülü borulara etkiyen düşey ve yatay yüklerin boru stabilitesine olan etkilerinin incelenmesi* (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Trandafir, A. C., Bartlett, S. F. ve Lingwall, B. N. (2010). Behavior of EPS geofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 514-524. doi:10.1016/j.geotexmem.2010.01.002
- Vaslestad, J. ve Sayd, M. S. (2019). *Load reduction on buried rigid culverts, instrumented case histories and numerical modelling*. Paper presented at the 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, Kyrenia, Northern Cyprus. doi: doi.org/10.1007/978-3-319-78981-1\_10
- Vaslestad, J., Bartlett, S. F., Aab e, R., Burkart, H., Ahmed, T. ve Arellano, D. (2019). *Bridge foundations supported by EPS geofoam on soft soil*. Paper presented at the 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, Kyrenia, Northern Cyprus. doi:10.1007/978-3-319-78981-1\_23
- Vaslestad, J., Sayd, M. S., Johansen, T. H. ve Wimar, L. (2011). Load reduction and arching on buried rigid culverts using EPS Geofoam. Design method and instrumented field tests. *NPRA - Norwegian Public Roads Administration*.
- Witthoef, A. F. ve Kim, H. (2016). Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using EPS geofoam compressible inclusions. *Geosynthetics International*, 23(4), 287-300. doi: doi.org/10.1680/jgein.15.00054

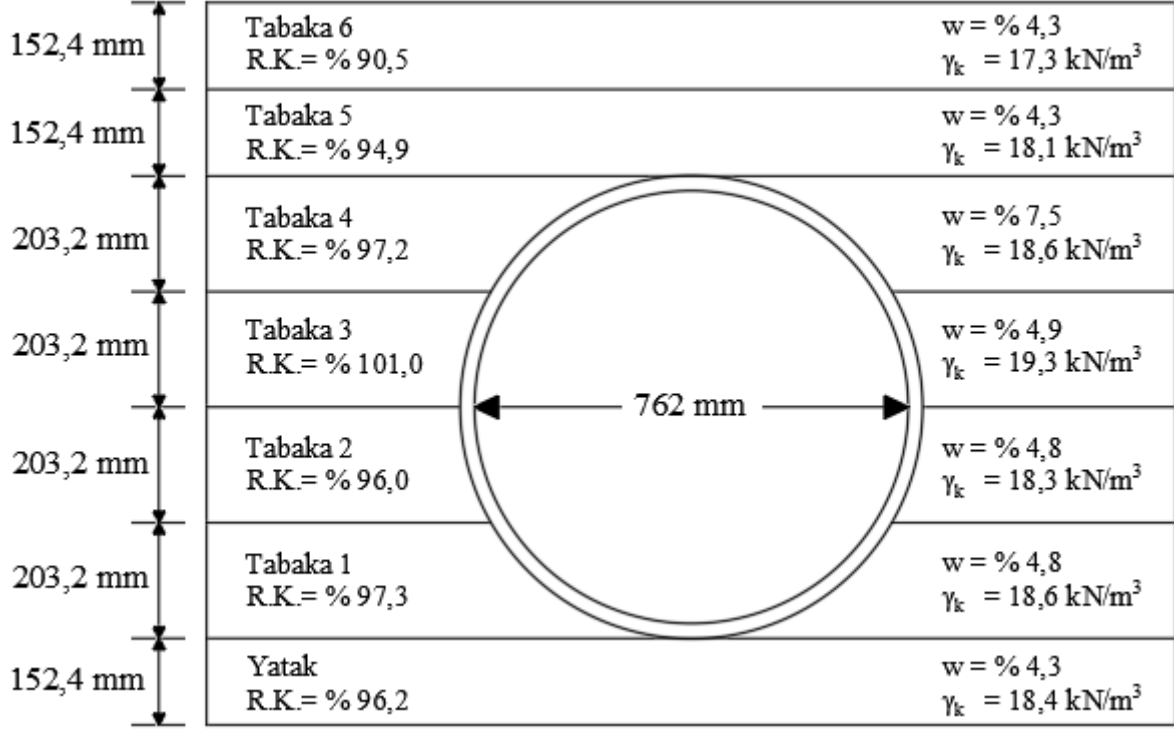
Wong, H. ve Leo, C. J. (2006). A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(5), 299-310. doi:10.1016/j.geotexmem.2006.03.007



## EKLER

### EK 1. Geri Dolgu Profilleri

Boruların gömülü bulunduğu geri dolgu profilleri bu bölüm içerisinde verilmiştir.



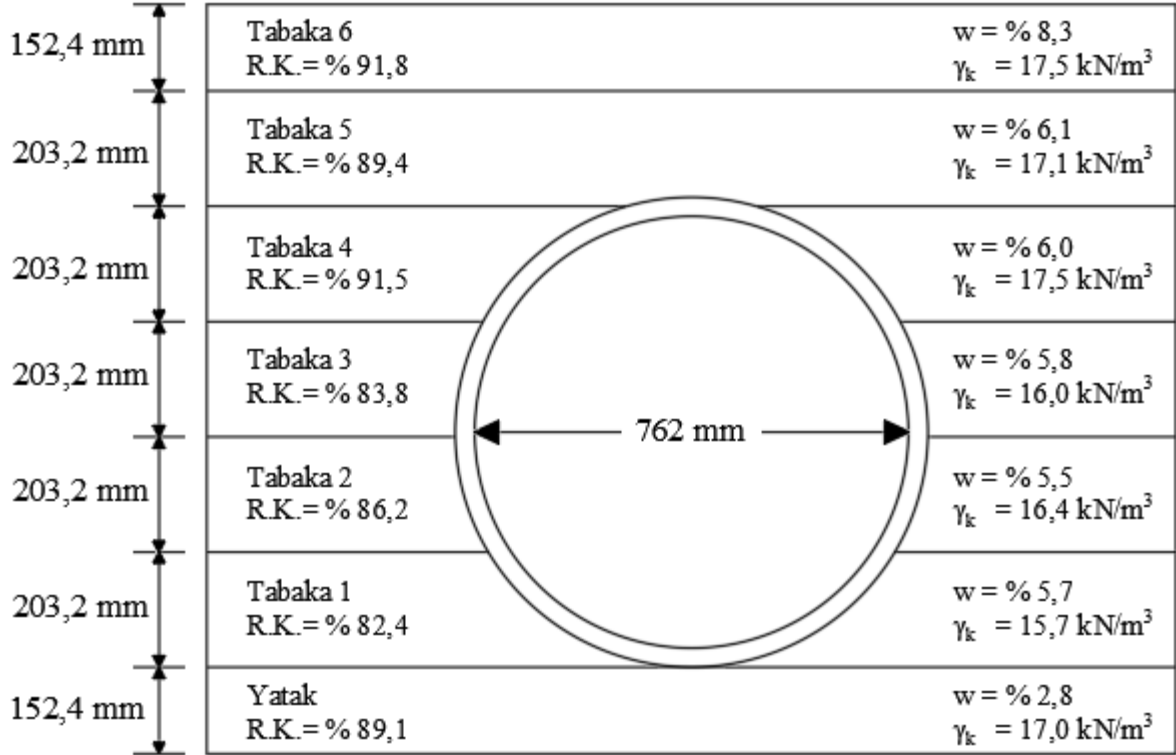
Şekil a. Boru 1 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 109,4	$w = \% 6,6$ $\gamma_k = 24,2 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Tabaka 5 R.K. = % 92,4	$w = \% 6,7$ $\gamma_k = 20,4 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 94,5	$w = \% 6,9$ $\gamma_k = 20,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 110,9	$w = \% 6,6$ $\gamma_k = 24,5 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 98,9	$w = \% 5,9$ $\gamma_k = 21,8 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 105,0	$w = \% 7,7$ $\gamma_k = 23,2 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 96,0	$w = \% 4,7$ $\gamma_k = 21,2 \text{ kN/m}^3$

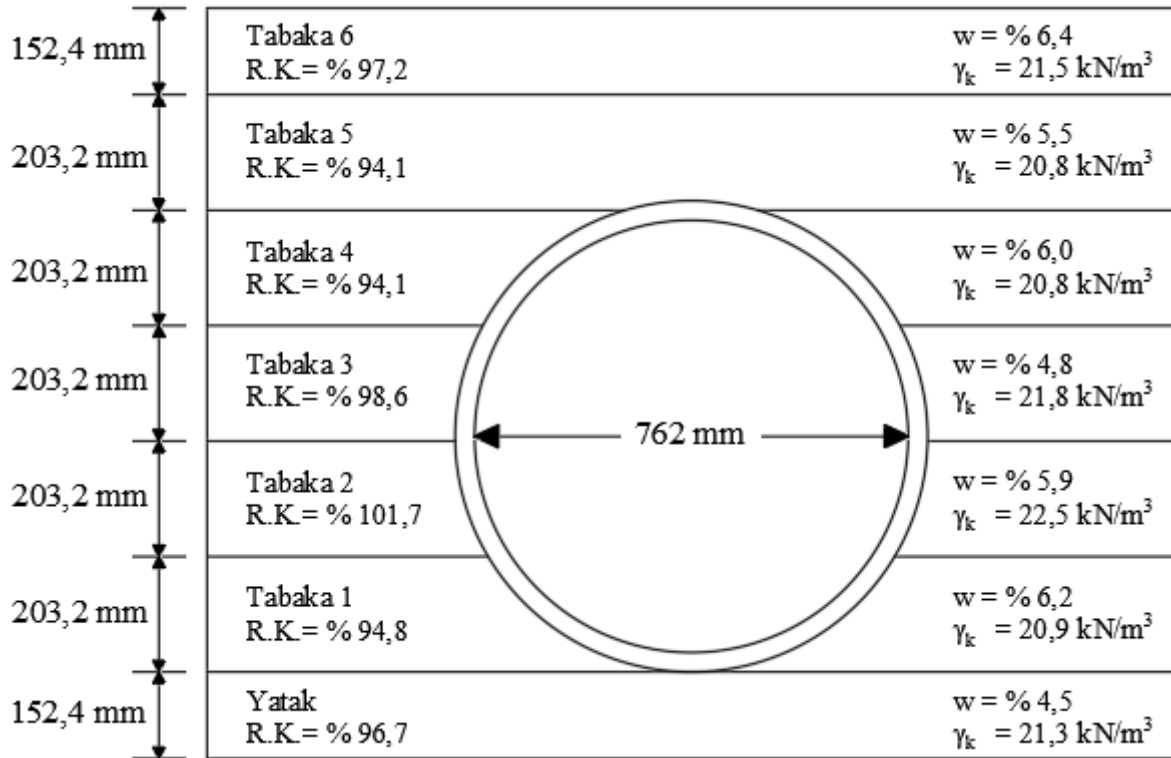
Şekil b. Boru 2 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 93,5	$w = \% 2,0$ $\gamma_k = 20,6 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Tabaka 5 R.K. = % 80,9	$w = \% 2,2$ $\gamma_k = 17,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 81,9	$w = \% 2,4$ $\gamma_k = 18,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 84,7	$w = \% 2,4$ $\gamma_k = 18,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 80,1	$w = \% 2,3$ $\gamma_k = 17,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 95,5	$w = \% 2,6$ $\gamma_k = 21,1 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 86,7	$w = \% 3,0$ $\gamma_k = 19,1 \text{ kN/m}^3$

Şekil c. Boru 3 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



Şekil d. Boru 4 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



Şekil e. Boru 5 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 100,3	$w = \% 6,6$ $\gamma_k = 22,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 97,2	$w = \% 4,9$ $\gamma_k = 21,5 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 99,9	$w = \% 4,9$ $\gamma_k = 22,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 96,3	$w = \% 5,9$ $\gamma_k = 21,3 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 96,9	$w = \% 6,1$ $\gamma_k = 21,4 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 97,6	$w = \% 6,9$ $\gamma_k = 21,5 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 90,6	$w = \% 4,8$ $\gamma_k = 20,0 \text{ kN/m}^3$

Şekil f. Boru 6 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 89,4	$w = \% 8,7$ $\gamma_k = 17,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 95,5	$w = \% 7,8$ $\gamma_k = 18,2 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 94,7	$w = \% 8,5$ $\gamma_k = 18,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 98,7	$w = \% 7,8$ $\gamma_k = 18,8 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 101,7	$w = \% 7,1$ $\gamma_k = 19,4 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 94,1	$w = \% 9,0$ $\gamma_k = 18,0 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 95,0	$w = \% 8,9$ $\gamma_k = 18,2 \text{ kN/m}^3$

Şekil g. Boru 7 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K.= % 89,7	$w = \% 8,7$ $\gamma_k = 17,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K.= % 92,5	$w = \% 8,8$ $\gamma_k = 17,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K.= % 99,8	$w = \% 8,8$ $\gamma_k = 19,0 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K.= % 95,8	$w = \% 9,2$ $\gamma_k = 18,3 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K.= % 101,3	$w = \% 7,7$ $\gamma_k = 19,3 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K.= % 96,3	$w = \% 11,0$ $\gamma_k = 18,4 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K.= % 93,3	$w = \% 8,9$ $\gamma_k = 17,9 \text{ kN/m}^3$

Şekil h. Boru 8 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K.= % 84,1	$w = \% 2,7$ $\gamma_k = 18,6 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K.= % 87,8	$w = \% 2,7$ $\gamma_k = 19,4 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K.= % 84,8	$w = \% 2,5$ $\gamma_k = 18,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K.= % 84,1	$w = \% 4,0$ $\gamma_k = 18,6 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K.= % 89,4	$w = \% 3,2$ $\gamma_k = 19,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K.= % 90,3	$w = \% 2,5$ $\gamma_k = 20,0 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K.= % 87,5	$w = \% 3,0$ $\gamma_k = 19,3 \text{ kN/m}^3$

Şekil 1. Boru 9 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 95,3	$w = \% 2,0$ $\gamma_k = 18,2 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 88,3	$w = \% 6,5$ $\gamma_k = 16,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 83,3	$w = \% 6,3$ $\gamma_k = 15,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 85,5	$w = \% 6,3$ $\gamma_k = 16,3 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 91,9	$w = \% 6,0$ $\gamma_k = 17,5 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 87,9	$w = \% 6,0$ $\gamma_k = 16,8 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 84,5	$w = \% 9,4$ $\gamma_k = 18,0 \text{ kN/m}^3$

Şekil i. Boru 10 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 107,5	$w = \% 2,0$ $\gamma_k = 23,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 94,5	$w = \% 3,3$ $\gamma_k = 20,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 94,6	$w = \% 4,8$ $\gamma_k = 20,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 95,8	$w = \% 4,9$ $\gamma_k = 21,2 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 99,6	$w = \% 5,8$ $\gamma_k = 22,0 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 106,8	$w = \% 1,9$ $\gamma_k = 23,6 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 100,9	$w = \% 7,3$ $\gamma_k = 19,3 \text{ kN/m}^3$

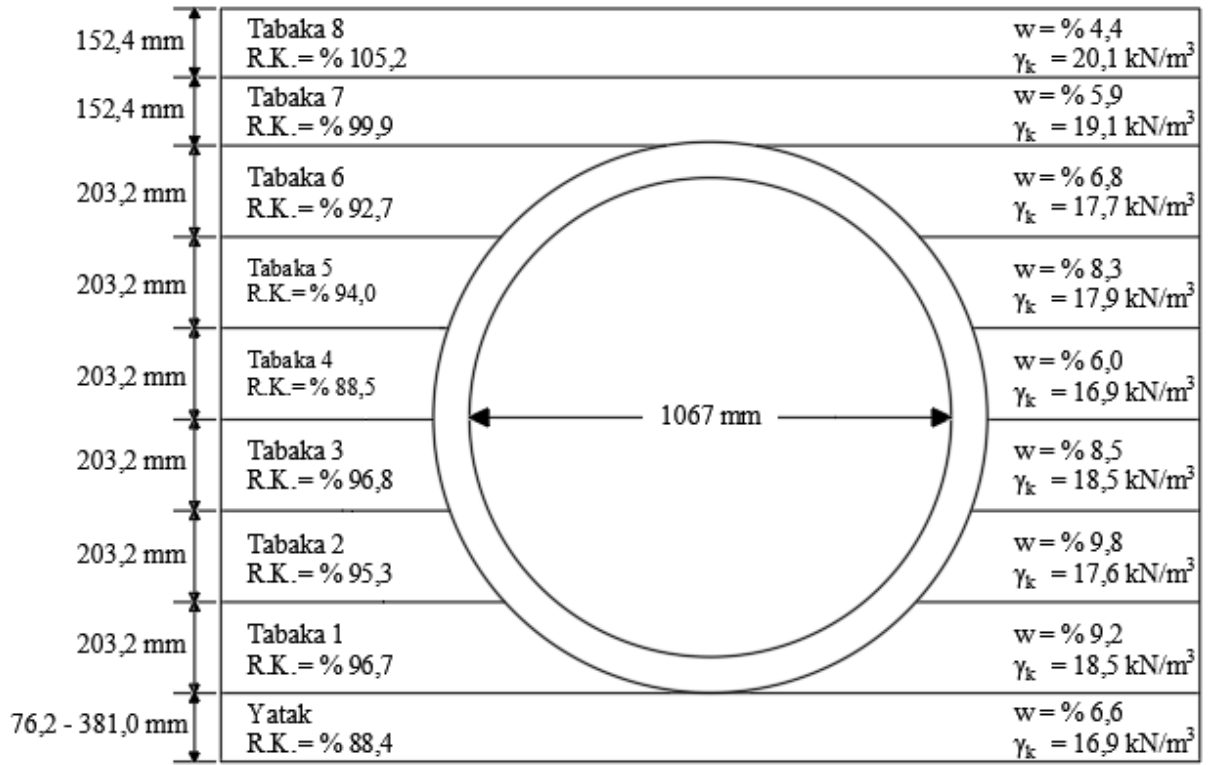
Şekil j. Boru 11 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 6 R.K. = % 108,9	$w = \% 2,1$ $\gamma_k = 24,0 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 96,5	$w = \% 2,6$ $\gamma_k = 21,3 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 95,7	$w = \% 4,4$ $\gamma_k = 21,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 95,7	$w = \% 3,6$ $\gamma_k = 20,6 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 93,5	$w = \% 4,2$ $\gamma_k = 21,4 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 95,4	$w = \% 3,2$ $\gamma_k = 21,1 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Yatak R.K. = % 96,5	$w = \% 4,0$ $\gamma_k = 21,3 \text{ kN/m}^3$

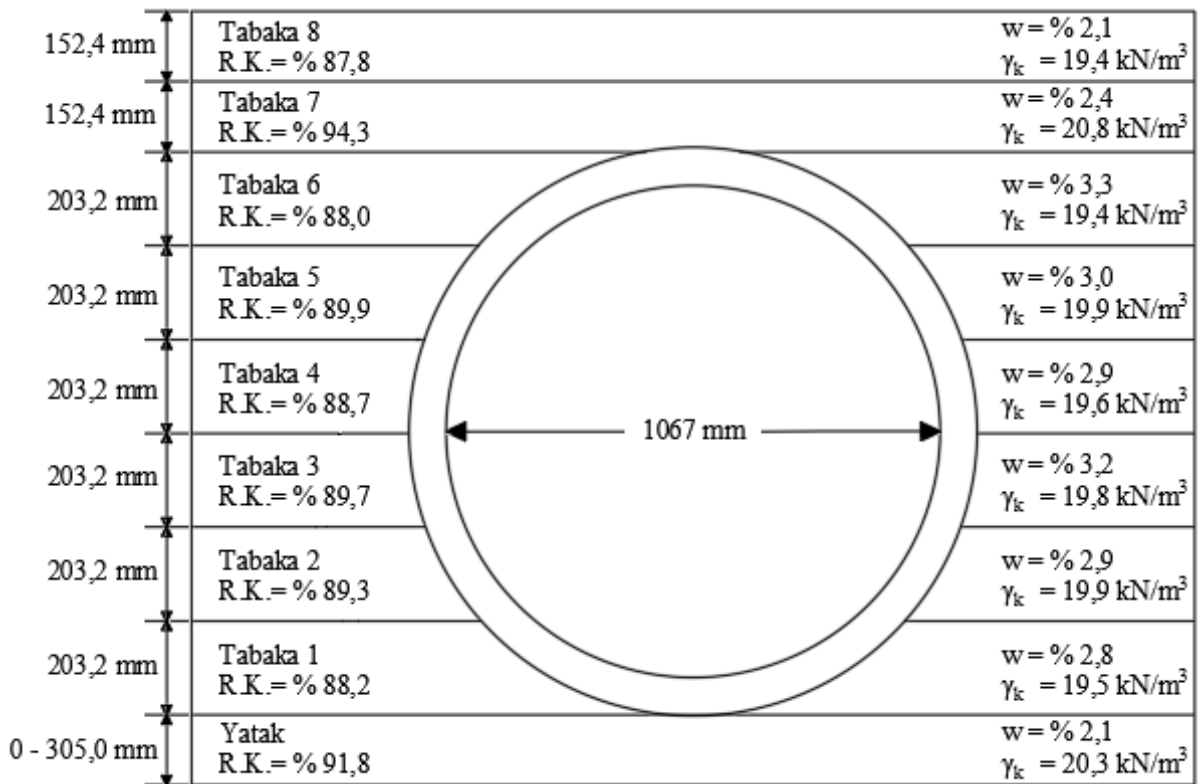
Şekil k. Boru 12 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 8 R.K. = % 97,7	$w = \% 5,1$ $\gamma_k = 18,6 \text{ kN/m}^3$
152,4 mm	Tabaka 7 R.K. = % 97,8	$w = \% 5,0$ $\gamma_k = 18,6 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 6 R.K. = % 88,8	$w = \% 5,6$ $\gamma_k = 17,0 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 94,2	$w = \% 8,5$ $\gamma_k = 18,0 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 89,9	$w = \% 7,2$ $\gamma_k = 17,2 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 87,0	$w = \% 7,6$ $\gamma_k = 16,6 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 91,7	$w = \% 7,2$ $\gamma_k = 17,5 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 95,8	$w = \% 8,4$ $\gamma_k = 18,3 \text{ kN/m}^3$
0 - 305,0 mm	Yatak R.K. = % 81,6	$w = \% 8,7$ $\gamma_k = 15,6 \text{ kN/m}^3$

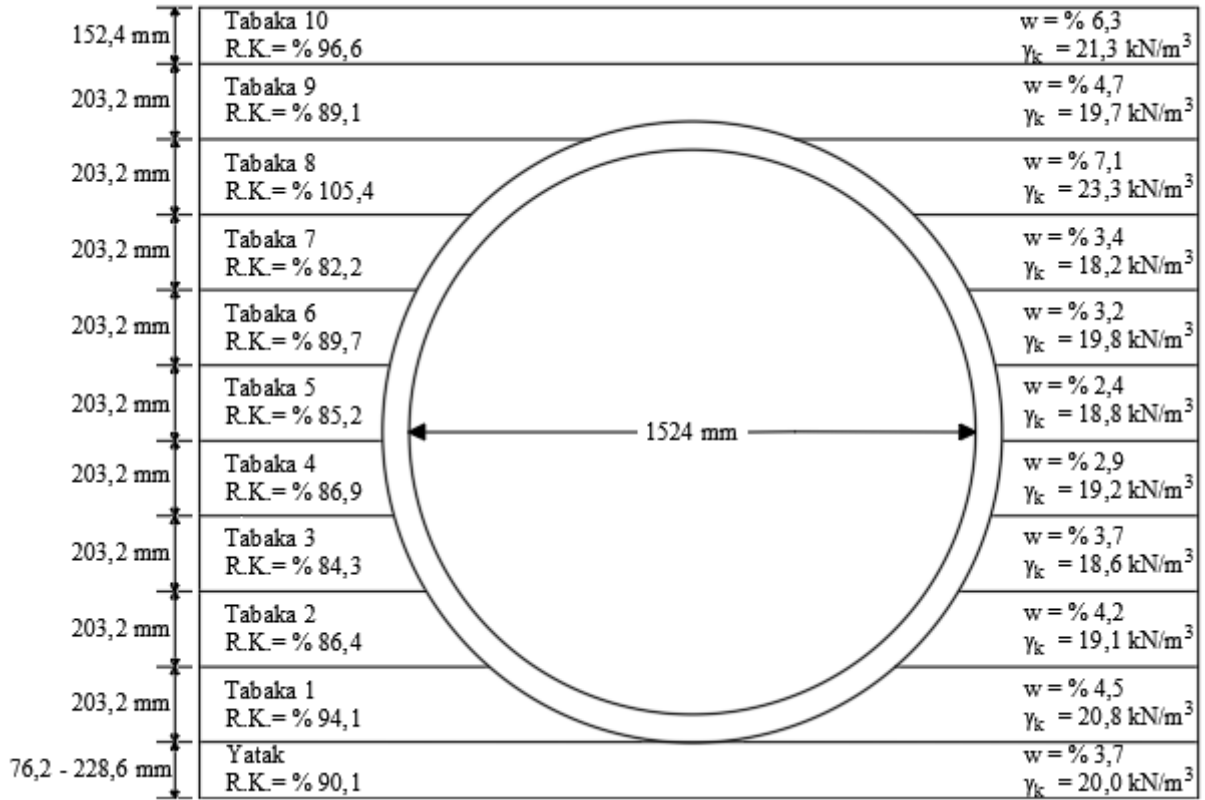
Şekil l. Boru 13 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



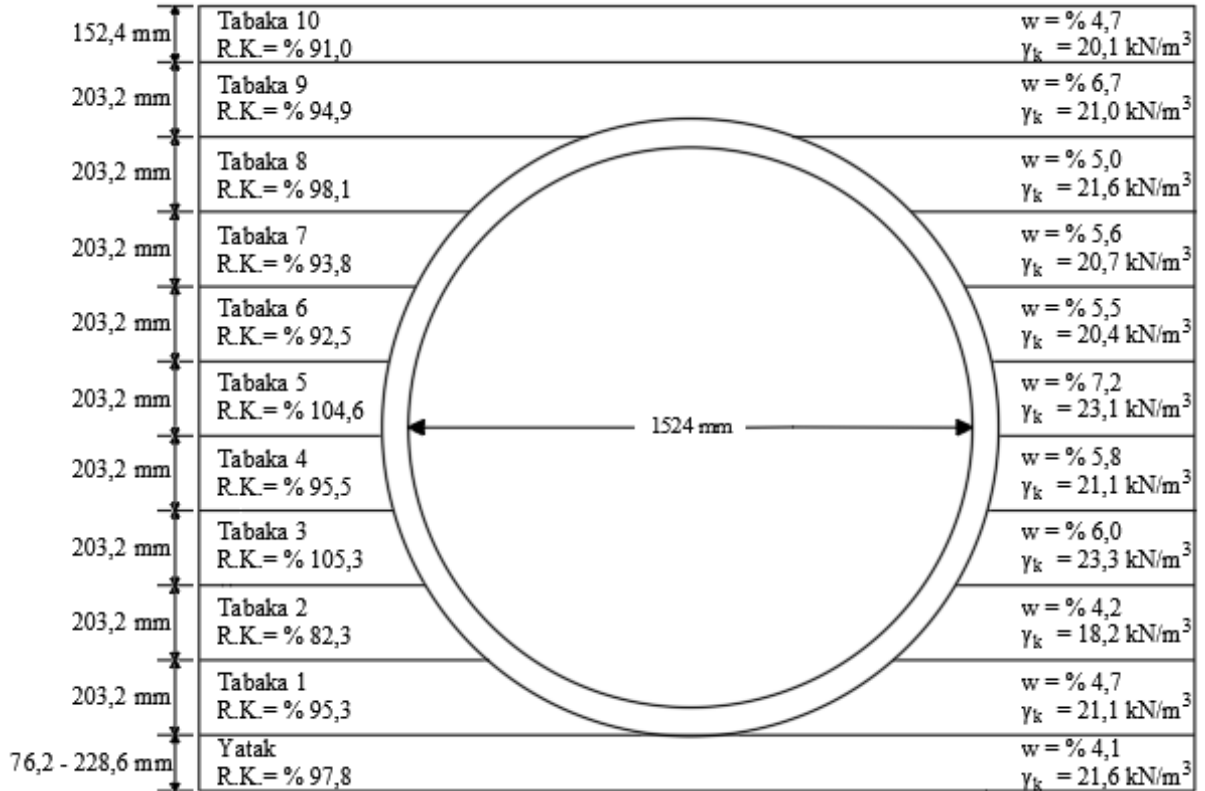
Şekil m. Boru 14 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



Şekil n. Boru 15 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



Şekil o. Boru 16 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)



Şekil ö. Boru 17 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

152,4 mm	Tabaka 10 R.K. = % 105,3	$w = \% 4,4$ $\gamma_k = 20,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 9 R.K. = % 99,9	$w = \% 5,9$ $\gamma_k = 19,1 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 8 R.K. = % 92,8	$w = \% 6,8$ $\gamma_k = 17,7 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 7 R.K. = % 94,0	$w = \% 8,3$ $\gamma_k = 17,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 6 R.K. = % 88,5	$w = \% 6,0$ $\gamma_k = 16,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 5 R.K. = % 94,0	$w = \% 6,0$ $\gamma_k = 17,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 4 R.K. = % 88,5	$w = \% 6,0$ $\gamma_k = 16,9 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 3 R.K. = % 96,8	$w = \% 8,5$ $\gamma_k = 18,5 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 2 R.K. = % 92,3	$w = \% 9,8$ $\gamma_k = 17,6 \text{ kN/m}^3$
203,2 mm	Tabaka 1 R.K. = % 96,7	$w = \% 9,2$ $\gamma_k = 18,5 \text{ kN/m}^3$
76,2 - 228,6 mm	Yatak R.K. = % 88,4	$w = \% 6,6$ $\gamma_k = 16,9 \text{ kN/m}^3$

Şekil p. Boru 18 geri dolgu yerleşim profili (Sargand vd., 2002)

## EK 2. Arazi Deneyi Verileri

Bu bölümde arazi deneylerinde boruların yapmış olduğu şekil değiştirmeler ile borulara etki eden gerilmeler verilmiştir.

Çizelge a. Boru 1 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,91	0,00	0,00		
-0,70	0,09	-0,24		
-0,52			0,00	3,45
-0,30	0,33	-0,44	5,03	2,76
-0,15	0,28	-0,43	4,48	5,52
0,00	0,28	-0,43	7,58	6,62
0,91	0,11	-0,36	17,86	11,17
1,37				19,44
1,71	-0,10	-0,24	33,65	21,93
1,80	-0,13	-0,22		27,99
2,41	-0,17	-0,19	42,95	31,58
3,08			47,30	39,85
3,75			52,12	47,30
4,11	-0,27	-0,16	58,33	54,33
4,66	-0,33	-0,12	58,81	59,29
5,06	-0,39	-0,11	61,71	65,02
6,16	-0,53	-0,03	69,02	82,19

Çizelge b. Boru 2 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,15	-0,28	0,00	5,52
-0,30	0,19	-0,31	4,55	10,48
-0,15	0,12	-0,27	3,65	16,48
0,00	0,07	-0,24	8,14	22,48
0,91	-0,16	-0,14	14,13	49,44
1,91	-0,30	-0,03	31,51	83,29
2,39	-0,30	-0,02	32,20	98,73
3,12	-0,32	0,04	33,65	100,59
3,65			35,71	130,52
4,57	-0,56	0,09	45,44	140,93
5,11	-0,55	0,07	52,54	160,44
5,66	-0,59	0,08	55,64	184,71
6,14	-0,69	0,13	61,36	208,29
6,81	-0,71	0,12	66,95	217,81
7,04	-0,77	0,14	71,64	224,91
8,43	-1,08	0,31	81,84	255,73
9,86	-1,11	0,33	87,84	274,62
11,68	-1,36	0,41	100,25	311,37
12,19	-1,68	0,56	108,80	311,51

Çizelge c. Boru 3 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,15	-0,16	0,00	1,52
-0,30	0,26	-0,24	2,96	4,00
0,00	0,16	-0,16	7,03	8,27
1,28	-0,97	0,73	33,72	21,86
2,06	-1,10	0,82	57,36	38,89
2,62	-1,13	0,83	60,74	42,95
3,15	-1,24	0,86	66,60	52,19
4,76	-1,44	1,00	69,29	65,16
5,90	-1,54	1,05	80,32	83,70

Çizelge d. Boru 4 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,31	-0,24	0,00	
-0,30	0,33	-0,26	1,45	
-0,15	0,16	-0,15	3,52	6,76
0,00	0,10	-0,12	8,69	7,86
1,37			32,96	
2,10	-0,65	0,42	47,02	25,30
3,04			53,09	33,65
3,69			56,81	39,58
4,14	-0,96	0,53	61,91	45,02
5,04	-1,00	0,54	64,67	49,50
6,18	-1,17	0,63	73,77	61,02



Çizelge e. Boru 5 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,20	-0,11	0,00	2,48
-0,30	0,27	-0,19	1,10	2,96
-0,15	0,25	-0,16	3,10	4,48
0,00	0,19	-0,14	8,69	8,07
2,50	0,01	0,06	49,44	35,92
2,74			51,85	37,09
3,08			57,36	42,95
3,66			59,23	47,09
4,55	-0,10	0,04	68,33	54,81
5,03	-0,13	0,12	74,81	61,36
5,57	-0,15	0,12	83,01	69,36
6,21	-0,19	0,16	90,74	79,15
6,91	-0,28	0,22	98,60	85,08
8,53	-0,49	0,38	125,35	108,32
8,88	-0,61	0,46	130,31	113,69
9,88	-0,63	0,49	133,97	120,24
11,73	-0,94	0,65	157,20	145,20
12,19	-1,06	0,72	163,20	153,89

Çizelge f. Boru 6 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,14	-0,06		3,17
-0,30	0,26	-0,16	1,79	4,41
-0,15	0,32	-0,14		
0,00	0,31	-0,17	5,86	6,27
2,14	-0,16	0,64	48,95	26,41
2,78	-0,18	0,66	53,78	29,37
3,25	-0,22	0,67	57,85	35,71
5,90	-0,48	0,81	58,61	59,71

Çizelge g. Boru 7 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,30	-0,70	0	3,03
-0,30	0,42	-0,90	1,52	2,14
-0,15	0,40	-0,99		
0	0,40	-0,99	9,03	4,83
0,91	0,27	-0,95	14,34	5,72
1,62	0,15	-0,93	31,85	12,69
2,21	0,12	-0,92	43,64	17,93
3,01	0,10	-0,90	45,85	21,72
3,64			44,75	23,58
4,07			46,68	26,48
5,02	-0,10	-0,90	48,95	33,16
6,20	-0,38	-0,90	54,61	43,92

Çizelge h. Boru 8 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,45	-0,67	0,00	6,27
-0,30	0,47	-0,68	0,76	5,72
-0,15	0,37	-0,68	3,93	8,14
0,00	0,36	-0,68	8,48	9,51
0,91	0,06	-0,51	15,93	10,96
1,87	-0,22	-0,44	36,47	23,99
2,37	-0,29	-0,44	39,09	27,37
2,91	-0,32	-0,43	39,71	29,10
3,62			42,47	39,16
4,64	-0,75	-0,39	47,37	47,02
4,88			49,50	51,43
5,15	-0,82	-0,31	51,23	54,33
5,52	-0,87	-0,30	54,47	57,85
6,25	-0,98	-0,27	59,43	65,64
6,95	-1,12	-0,22	61,85	69,29
8,58	-1,44	-0,15	74,60	84,74
9,03	-1,63	-0,13	75,70	86,60
9,87	-1,68	-0,11	81,01	92,80
11,90	-2,10	-0,03	94,67	109,28
12,19	-2,18	-0,09	97,35	112,18

Çizelge 1. Boru 9 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51	0,34	0,04	0,00	2,41
-0,30	0,39	0,04	3,45	2,76
-0,15	0,36	0,03	3,93	3,24
0,00	0,31	0,35	7,93	5,38
0,91	-0,37	0,23	14,20	9,58
1,31	-0,80	0,55		20,48
1,56	-1,00	0,73	36,06	21,65
2,20	-1,09	0,75	41,92	29,03
2,74				30,34
2,81	-1,40	0,77		30,47
3,25	-1,22	0,80	41,02	38,20
3,94	-1,32	0,83	41,58	43,09
4,92	-1,47	0,87	46,40	51,64
5,49	-1,61	0,91	49,30	57,09
6,07	-1,68	0,93	51,57	63,85

Çizelge i. Boru 10 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,91	0,01	0,02		0,00
-0,71	-0,16	-0,40		1,10
-0,51	-0,07	-0,46	0,00	
-0,30	0,04	-0,50	1,03	2,69
-0,15	0,04	-0,42	4,69	3,52
0,00	-0,02	-0,37	8,55	4,55
0,91	-1,53	0,96	17,65	6,96
1,37	-1,92	1,28	21,79	7,58
2,18	-2,37	1,60		27,10
3,48			44,61	34,96
4,08	-2,82	1,65	46,13	39,30
4,55	-3,01	1,78	48,13	44,26
4,95	-3,10	1,80	52,88	49,64
6,19	-3,51	1,98	64,53	64,74

Çizelge j. Boru 11 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-1,52	-0,02	-0,01		0,00
-0,91	-0,02	-0,11		0,28
-0,51	-0,17	-0,39		2,48
-0,30	-0,02	-0,46	1,52	3,52
-0,15	-0,03	-0,42	3,10	6,00
0,00	-0,05	-0,40	9,51	8,48
0,91	-0,54	0,00	10,69	16,34
1,53	-0,66	0,05	21,44	20,55
1,80	-0,69	0,09	24,27	23,99
2,28	-0,75	0,10	24,89	27,17
3,07	-0,75	0,11	26,34	31,30
3,56				35,51
4,45			37,51	
5,19	-1,19	0,25	34,82	53,16
5,51	-1,24	0,28	38,27	58,33
6,23	-1,45	0,40	43,02	66,81
6,92	-1,55	0,41	46,33	73,64
7,18	-1,68	0,46	51,23	81,36
8,53	-1,96	0,57	58,95	94,18
9,90	-2,23	0,66	62,60	103,08
11,92	-2,68	0,77	79,84	124,86
12,19	-2,79	0,85	81,29	126,38

Çizelge k. Boru 12 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,91	0,07	0,06		0,00
-0,71	0,23	0,03		3,03
-0,51	0,55	-0,15	0,00	3,52
-0,30	0,73	-0,30	0,76	2,83
-0,15	0,48	-0,31	2,90	3,24
0,00	0,48	-0,29	5,86	5,03
0,91	0,09	-0,09	10,48	6,34
1,30	-0,25	0,09		14,34
1,67	-0,39	0,22		20,27
2,24	-0,47	0,23	40,75	24,34
2,44	-0,49	0,25	41,02	26,61
3,46	-0,55	0,25	41,16	32,89
4,01	-0,59	0,25	43,37	39,02
4,92	-0,64	0,25	48,47	47,23
5,33	-0,90	0,33	49,85	52,61
6,12	-0,95	0,34	53,85	59,09

Çizelge 1. Boru 13 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-1,12	0,33	0,05		
-0,71	0,58	-0,24		0,28
-0,51	0,78	-0,47	0,00	0,21
-0,30	0,78	-0,48	2,28	1,03
-0,15	0,79	-0,47	6,69	2,76
0,00	0,60	-0,51	11,38	4,83
0,91	0,51	-0,62	23,58	12,69
1,37	0,44	-0,67	29,10	16,41
1,53	0,41	-0,62	30,89	
2,12			38,96	23,44
2,44	0,22	-0,55	44,61	
2,95				34,20
3,47			43,23	35,30
4,00	-0,11	-0,49	45,09	41,30
4,48	-0,30	-0,41	46,95	46,88
4,83	-0,38	-0,38	50,47	57,64
6,24	-0,76	-0,24	58,26	76,05



Çizelge m. Boru 14 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-1,52	0,40	-0,97		
-0,91	0,51	-0,13		
-0,51	0,84	-0,47	0,00	1,31
-0,30	0,87	-0,50	0,28	0,97
-0,15	0,87	-0,50	3,59	2,90
0,00	0,70	-0,50	8,20	4,07
1,22	0,45	-0,36	17,79	
1,53				8,34
1,81				12,41
2,18	0,17	-0,23	38,27	15,24
2,96	0,18	-0,23	41,30	17,31
3,59	-0,08	-0,16	45,51	21,93
4,45	-0,18	-0,09	50,40	27,10
5,06	-0,32	-0,07	54,05	31,72
5,48	-0,36	-0,04	57,71	34,20
6,15				39,51
6,75	-0,60	0,04	65,91	44,75
7,15	-0,70	0,06	71,43	50,12
7,64	-0,91	0,14	78,53	58,81
9,06	-1,05	0,14	80,60	
9,85	-1,07	0,14	85,43	63,71
11,93	-1,42	0,18	97,08	79,84
12,19	-1,48	0,19	99,63	81,91

Çizelge n. Boru 15 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-1,12	-0,12	-0,20		
-0,91	0,08	-0,22		1,03
-0,71	0,26	-0,40		2,90
-0,51	0,39	-0,54	0,00	2,62
-0,30	0,38	-0,62	1,45	2,76
-0,15	0,23	-0,60	6,00	3,79
0,00	0,20	-0,59	9,79	5,17
0,91	-0,08	-0,55	20,27	6,21
1,33	-0,21	-0,53		11,03
1,67	-0,28	-0,44		16,96
2,08	-0,37	-0,43	46,26	22,82
2,80	-0,37	-0,43	48,68	
3,44	-0,45	-0,41	48,06	32,61
4,02	-0,55	-0,39	48,47	35,09
4,94	-0,69	-0,34	50,75	39,09
5,39	-0,74	-0,31	53,71	45,51
6,10	-0,86	-0,30	58,95	50,26

Çizelge o. Boru 16 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-1,14				0,00
-0,94	0,46	-0,16		0,97
-0,74	0,52	-0,51		0,83
-0,53	0,95	-0,70	0,00	0,07
-0,30	0,98	-0,71		0,21
-0,15	1,50	-1,32		1,65
0,00	1,80	-1,52	3,10	2,41
1,22			5,45	21,72
1,56	1,22	-1,40		30,06
1,71	1,16	-1,36		30,13
2,07	1,04	-1,30	15,31	39,58
2,44			21,65	47,92
2,95	0,96	-1,26	22,27	
3,43			25,51	54,88
3,98	0,63	-1,18	32,20	59,57
4,49	0,38	-1,10	34,68	68,05
4,75	0,32	-1,09		73,91
6,14	-0,18	-0,93	61,43	99,91

Çizelge ö. Boru 17 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-0,51				
-0,30	0,33	-0,42		
-0,15	0,35	-0,42	1,31	
0,00	0,33	-0,41	7,31	
0,91				2,48
1,31	-0,93	-0,09		10,69
1,64	-1,10	-0,03		17,93
2,06	-1,30	0,03		19,37
2,44	-1,34	0,04	34,06	25,86
3,02	-1,54	0,08	37,23	29,99
4,31	-1,93	0,19	46,13	43,71
4,84	-2,25	0,26	49,64	45,99
5,47	-2,40	0,30	55,78	51,85
6,09	-2,66	0,38	57,85	58,40
6,70	-2,86	0,43	64,81	68,88
7,54			70,33	77,84
8,55			77,63	91,42
8,88	-3,75	0,61		96,80
9,78	-3,88	0,63	82,87	107,77
12,05	-4,59	0,83	90,32	133,07
12,19	-4,76	0,85	94,32	139,96

Çizelge p. Boru 18 deney sonucunda elde edilen veriler (Sargand ve Masada, 2007)

<b>Dolgu Yüksekliği (m)</b>	<b><math>\Delta y/D</math> (%)</b>	<b><math>\Delta x/D</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_{vc}</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_{hs}</math> (kPa)</b>
-1,14	0,75	-0,47	0,00	
-0,74	0,72	-0,78	0,00	0,07
-0,53	0,89	-0,90	0,00	
-0,30	1,02	-0,93	0,41	
-0,15	1,03	-0,92	3,24	0,83
0,00	1,00	-0,92	7,79	2,48
0,91	0,69	-0,87	9,10	
1,21	0,62	-0,88		4,07
1,54	0,61	-0,87	28,27	11,10
2,10	0,49	-0,83	29,44	11,65
2,72	0,49	-0,83		12,55
3,31	0,41	-0,83	31,30	18,89
4,07	0,33	-0,83	33,51	22,96
4,94	0,25	-0,82	36,61	28,82
5,47	0,23	-0,83	39,85	33,85
6,02	0,17	-0,83	39,64	34,47