

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GENLEŞTİRİLMİŞ POLİSTİREN MALZEME KULLANIMININ
GÖMÜLÜ ESNEK BORU DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN SAYISAL
ANALİZLER İLE İNCELENMESİ

FURKAN AHMET AKYELKEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı

Danışman

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Aralık, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GENLEŞTİRİLMİŞ POLİSTİREN MALZEME KULLANIMININ GÖMÜLÜ
ESNEK BORU DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN SAYISAL ANALİZLER İLE
İNCELENMESİ**

Furkan Ahmet AKYELKEN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.11.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Muhit BERİLGİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Abdullah Tolga ÖZER, Üye
Gebze Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Havvanur KILIÇ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Genleştirilmiş Polistiren Malzeme Kullanımın Gömülü Esnek Boru Davranışına Etkilerinin Sayısal Analizler ile İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Furkan Ahmet AKYELKEN

İmza



Bu Yüksek Lisans Tezi Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu tarafından 219M061 numaralı proje numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.



Biricik eşime;

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde de değerli bilgilerini daima benimle paylaşan, kendisine danıştığım da kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Havvanur KILIÇ'a teşekkürü bir borç biliyorum ve şükranlarımı sunuyorum. Bunun yanı sıra yalnızca akademik olarak değil, aynı zamanda hayata dair birçok konuda içtenlikle düşünce ve deneyimlerini benimle paylaşarak değerli Prof. Kutay ÖZAYDIN, Prof. Sönmez YILIDIRIM ve diğer çok değerli hocalarımızın oluşturduğu ekol doğrultusunda geleceğimin şekillenmesinde rol oynadığı için minnettar olduğumu belirtmek istiyorum.

Üniversite hayatımın başlangıcından itibaren bilginin peşinde koşan tüm öğrencilere olduğu gibi daima elinden gelenin fazlasını sunmaya çalışan ve geleceğe dair umutla bakmam için beni her koşulda motive eden Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK'a içtenlikle teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm dünyanın ve ülkemizin içinde olduğu bu zorlu süreçte her türlü olumsuzluğa karşı dik durmamı sağlayan, her koşulda tereddütsüz şekilde destek olan ve bana daima benim kendime inandığımdan daha fazla inanan biricik eşim Buket AKYELKEN'e tüm kalbimle sonsuz teşekkürler ediyorum. Son olarak bu çalışmayı Mustafa Kemal ATATÜRK'ün ışığı altında dünyayı her canlı için daha yaşanılabilir bir yer yapmayı kendine hedef belirlemiş gençlere adanmak istiyorum.

Furkan Ahmet AKYELKEN

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xx
ŞEKİL LİSTESİ	xx
TABLO LİSTESİ	xx
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Gömülü Borular Hakkında Teknik Bilgiler	5
1.1.2 Boru tipleri ve Gömülme Durumları	7
1.1.3 Kemerlenme Davranışı	10
1.1.4 EPS Geofom Malzeme Davranışı	12
1.1.5 Gömülü Boru – EPS Geofom İlişkisinin Deneysel Çalışmalar ve Sayısal Analizler ile İncelenmesi	16
1.2 Tezin Amacı	33
1.3 Hipotez	33
2 YAPI ZEMİN İLİŞKİSİNİN MODELLENMESİ	34
2.1 Deney Hakkında Bilgiler	34
2.1.1 Deney Süresince Gerilme, Oturma ve Esneme Değerlerinin Elde Edilmesi	40
2.2 Plaxis 2D ile Laboratuvar Deneyinin Modellemesi	44
2.2.1 Deneyde Kullanılan Malzeme Parametreleri	46
2.3 Kalibre Edilmiş Verilerin Deney Verileri ile Karşılaştırılması	53
2.3.1 Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması	54
2.3.2 Oturma Değerlerinin Karşılaştırılması	62
2.3.3 Esneme değerlerinin karşılaştırılması	66

3 LABORATUVAR DENEYİ ÜZERİNDEN YAPILAN SAYISAL ANALİZLER	71
3.1 Sayısal Analizler ve Plaxis 2D Kullanımı	71
3.2 Parametre değişimlerinin incelenmesi	71
3.2.1 EPS Malzemenin Yoğunluğunun ve Geometrisinin Değişimi	71
3.2.2 Boru Çapı Değişimi	83
3.2.3 Boru rijitliğinin değişimi	93
4 ARAZİ DENEYİ VE KALİBRASYON	103
4.1 Arazi deneyi hakkında bilgiler	103
4.2 Arazi deneyinden elde edilen sonuçlar	106
4.3 Plaxis 2D ile Arazi Deneyinin Modellenmesi	108
4.3.1 Deneyde ve Sayısal Modelde Kullanılan Malzeme Parametreleri	110
4.4 Kalibre Edilmiş Verilerin Karşılaştırılması	113
5 ARAZİ DENEYİ ÜZERİNDEN YAPILAN SAYISAL ANALİZLER	117
5.1 İncelenen Parametreler ve Değerlendirme Yöntemleri	117
5.1.1 Yatay ve düşey kemerlenme faktörü	118
5.2 Parametre Değişimlerinin İncelenmesi	119
5.2.1 EPS Malzemenin Yoğunluğunun ve Geometrisinin Değişimi	120
5.2.2 EPS Malzemenin Yüksekliğinin ve Genişliğinin Değişimi	130
5.2.3 Kırmataş Malzemenin Elastisite Modülü Değişimi	134
5.2.4 Hendek Zemininin Özelliklerinin Değişimi	138
5.2.5 Boru rijitliğinin değişimi	141
5.2.6 Maliyet Analizi	144
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	146
6.1 EPS Geofom malzemenin özelliklerinin değişimi	146
6.2 Hendek geri dolgu zemini özelliklerinin değişimi	147
6.3 HDPE korige borunun özelliklerinin değişimi	148
KAYNAKÇA	149
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	152

SİMGE LİSTESİ

W	Ağırlık
A	Alan
R_{inter}	Arayüzey azaltma faktörü
A_p	Birim uzunluktaki kesit alanı
q	Birim alana gelen yük
d_c	Boruda meydana gelen esneme değeri
W_{boru}	Boru duvarının birim uzunlukta ağırlığı
I_{boru}	Boru duvarının birim uzunlukta eylemsizlik momenti
A_{boru}	Boru duvarının birim uzunlukta kesit alanı
B_c	Borunun dıştan dışa yatay açıklığı
σ_B	Boru tabanındaki gerilme
N_i	Boru tabanındaki toplam zemin gerilmesi
δ_B	Boru tabanındaki oturma
S_f	Boru tabanında meydana gelen oturma
σ_C	Boru tacındaki gerilme
N_c	Boru tacındaki toplam zemin gerilmesi
N_{sp}	Boru yatay eksenine gelen toplam zemin gerilmesi
σ_H	Boru yan çeperindeki gerilme
r	Boru yarıçapı
D	Çap
\emptyset	Çap değeri
C_c	Derecelenme katsayısı
H	Dolgu yüksekliği
W_E	Düşeydeki toplam zemin yükü
s_d	Dolgu sebebi ile meydana gelen oturma
Δy	Düşey esneme
D_{10}	Efektif dane çapı
E	Elastisite modülü
e_{max}	En büyük boşluk oranı
e_{min}	En küçük boşluk oranı
W_{EPS}	EPS malzemesinin ağırlığı

D_{EPS}	EPS malzemesinin çap değeri
V_{EPS}	EPS malzemesinin hacmi
A_{EPS}	EPS malzemesinin kesit alanı
ρ_{EPS}	EPS malzemesinin yoğunluğu
H_{EPS}	EPS malzemesinin yksekligi
I	Eylemsizlik momentini
D_L	Gecikme faktörü
w	Genişlik
ψ	Genleşme açısı
m	Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet
E_{HDPE}	HDPE boruya ait elastisite modülü
ν_{HDPE}	HDPE boruya ait Poisson oranı
B_d	Hendek genişliği
S_v	Janbu sürtünme sayısı
ϕ	Kayma dayanımı açısı
N_a	Kemerlenme faktörü
c	Kohezyon
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
D_{50}	Ortalama dane apı
S	Oturma plakası gösterimi
G_s	özgül ağırlık
C_u	Uniformluk katsayısı
P_L	Prizma yükü
ν	Poisson oranı
D	Potansiyometrik yer değiştirme sensörü gösterimi
K_a	Rankine Katsayısı
E_{50}^{ref}	Referans ortalama sekant modülü
E_{oed}^{ref}	Referans tanjant ödometre modülü
E_{ur}^{ref}	Referans yk boşaltma-geri yükleme modülü
S_g	Sıkıştırılmış zemin yüzey oturma
F_s	Sürtünme kuvveti
m_s	Tek boyutlu zemin elastisite modülü
P	Toprak basıncı hcreti gösterimi

P_L	Yanal yük
r_{sd}	Yapay hendek yöntemi için oturma oranı
W_H	Yataydaki, toplam zemin yükü
Δx	Yatay esneme
K_B	Yatak katsayısı
ρ	Yoğunluk
H_s	Yumuşak bölge yüksekliği
L_n	Yük katsayıları
δ_w	Zemin içerisindeki batı bölgesine ait oturma
δ_E	Zemin içerisindeki doğu bölgesine ait oturma



KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CD	Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European Standards
EPS	Expanded Polystyrene
FLAC	Fast Lagrangian Analysis of Continua
HAF	Horizontal Arching Factor
HDPE	High Density Polyethylene
ISO	International Organization for Standardization
ITI	Imperfect Trench Installation
PE	Polyethylene
PVC	Poly Vinyl Chloride
SN	Ring Stiffness (Pipe Diameter)
SR	Ring Stiffness (Pipe Radius)
SP	Kötü Derecelendirilmiş Temiz Kum
TS	Türk Standartları
USCS	Unified Soil Classification System
VAF	Vertical Arching Factor
2D	Two Dimensional

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Zemin yükü altında rijit borulara ait Marston hendek kesiti.....	2
Şekil 1.2	Boru geometrisini hakkında teknik terimler (Mada, 2005).....	6
Şekil 1.3	Boru duvar kesitleri: (a) Düzgün yüzey (b) Kıvrımlı yüzey (Mada, 2005)	6
Şekil 1.4	Gömülme durumlarına göre boru türleri (a) Hendek borusu (b) Dolgu borusu (c) Yapay hendek Borusu (Spangler, 1982).....	8
Şekil 1.5	Yapay hendek metodunun mekanizması (Kang, 2007).....	9
Şekil 1.6	Boru-zemin etkileşimi içerisinde yük transferi (a) Rijit hendek borusu (b) Esnek hendek borusu (c) esnek borunu yapay hendek yöntemi ile uygulanması (Kang, 2019)	11
Şekil 1.7	Løkkeberg köprüsünün EPS Geofom ile yapılan projesi	13
Şekil 1.8	Løkkeberg köprüsünün EPS Geofom ile inşası (Norveç, 1989).....	14
Şekil 1.9	Düşey zemin basınçları ve EPS sıkışması (Vaslestad, 2019)	15
Şekil 1.10	Yerleştirilmiş EPS Geofom blokları ve oturma plakaları.....	16
Şekil 1.11	ASSHTO Standartlarına göre dolgu inşasına ait geometrik koşullar (AASHTO, 2004a).....	17
Şekil 1.12	Farklı dolgu malzemelerinin kemerlenmeler üzerindeki etkileri: (a) Düşey kemerlenme faktörünün (VAF) H/D oranına göre değişimi (b) Yatay Kemerlenme faktörünün (HAF) H/D oranına göre değişimi (Kang ve Yoo, 2007).....	18
Şekil 1.13	Yapay hendek metodu ve yumuşak bölgenin geometrileri: (a) genel gösterim, (b) önerilen yumuşak bölge geometrisi ve (c) Spangler ve Vaslestad ve diğerleri tarafından denenen yumuşak bölge geometrisi (Kang ve Yoo, 2007).....	19
Şekil 1.14	Kim vd. (2010) tarafından yılında yapılan deney.....	21
Şekil 1.15	Deney #1, Deney #2 ve Deney #3'te EPS Geofom panelin yerleştiği konumlar (Akınay vd., 2016)	21
Şekil 1.16	Yapay hendek yöntemi; rijit boru üzerinde hendek koşulunun yapay olarak oluşturulması (Akınay vd., 2016)	22
Şekil 1.17	Modellenen deneyin şematik olarak gösterimi (Meguid ve Hussein, 2017)	23

Şekil 1.18	Menfez üst duvarına etkiyen normalize temas basıncının uygulanan yük ve EPS yoğunluğu ile karşılaştırılması (Meguid ve Hussein, 2017)	24
Şekil 1.19	Deneysel verilerin ve nümerik analizlerin zemin oturması ve uygulanan sürşarj yükü değerleri üzerinden borusuz deney için karşılaştırılması (Kılıç ve Akınay, 2017).....	25
Şekil 1.20	Deneysel verilerin ve analizlerdeki zemin oturması ve uygulanan sürşarj yükü değerleri üzerinden borusuz deney için karşılaştırılması (Kılıç ve Akınay, 2017).....	25
Şekil 1.21	Yapay hendek metodu: (a) Gömülü yapı üzerinde EPS Geofom malzeme kullanımı, (b) “U şeklinde” EPS Geofom malzeme kullanımı (Meguid vd. 2017)	26
Şekil 1.22	EPS15 Geofom malzeme ile yapılan deneyde gömülü yapı üzerinde ve yan duvarında elde edilen düşey ve yatay gerilmelerin değişimi.....	27
Şekil 1.23	Gömülü rijit yapı ile birlikte kullanılan EPS Geofom blokların geometrik koşullarının şematik olarak gösterilmesi: (a) EPS genişliği değişimi, (b) EPS yüksekliği değişimi, (c) EPS'nin yapı üzerindeki konumları (Meguid, 2017)	28
Şekil 1.24	Deney düzeneğine ait gösterimler: (a) Şematik olarak deney düzeneği, (b) Deney düzeneğinin bir fotoğrafı (Beju ve Mandal, 2017).....	29
Şekil 1.25	Üç boyutlu sonlu eleman modelinin izometrik görünümü (Kang,2009)	30
Şekil 1.26	Kılıç ve Akınay'ın çalışmasında kullanılan deney geometrileri. Boru çapları milimetre, diğer ölçüler metre cinsinden verilmiştir. (Kılıç ve Akınay, 2019)	31
Şekil 1.27	Boruda meydana gelen esnemelerin uygulanan yük ile ilişkisi: (a) Düşey esneme değerleri, (b) Yatay esneme değerleri (Kılıç ve Akınay, 2019)	31
Şekil 1.28	Boru tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerinin uygulanan yük ile ilişkisi (Kılıç ve Akınay, 2019)	32
Şekil 2.1	Deney düzeneğinin cm ile ölçülendirilmiş şematiği ve Referans deney için enstrumantasyon planı: Doğu-Batı doğrultusu (Akınay, 2017)....	35

Şekil 2.2	Deney düzeneğinin cm ile ölçülendirilmiş şematığı ve Referans deney için enstrumantasyon planı: Kuzey-Güney doğrultusu (Akınay, 2017)	36
Şekil 2.3	Ø300 mm iç HDPE esnek boru ve EPS Geofom malzemenin yerleşim durumları (Akınay, 2017).....	37
Şekil 2.4	Deney zemini dane çapı dağılım eğrisi (Akınay, 2017).....	38
Şekil 2.5	$\rho_{EPS} = 10 \text{ kg/m}^3$ yoğunlukta EPS numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinde elde edilen aksel şekil değiştirme - aksel gerilme eğrisi (Akınay, 2017)	40
Şekil 2.6	Zemin enstrumantasyonunda kullanılan ölçüm aygıtlarının Doğu-Batı doğrultusu (Akınay, 2017)	41
Şekil 2.7	Zemin enstrumantasyonunda kullanılan ölçüm aygıtlarının Kuzey-Güney doğrultusu (Akınay, 2017)	41
Şekil 2.8	Zemine yerleştirilmiş olan Proktor kalıpları ve toprak basıncı hücreleri (Akınay, 2017)	42
Şekil 2.9	Zemine yerleştirilmiş olan Proktor kalıpları ve oturma plakaları (Akınay, 2017)	42
Şekil 2.10	Zemin katmanları için belirlenen kuru birim hacim ağırlıkları ve karşılık gelen bağıl sıklıklar (a) Borusuz Deney (b) Referans Deney (c) Deney #1a ve (d) Deney #1b (Akınay, 2017)	43
Şekil 2.11	Deney borusunun enkesitine yerleştirilen potansiyometrik yer değiştirme sensörlerinin boru içinden görünümü (Akınay, 2017)	44
Şekil 2.12	Plaxis 2D sayısal analizlerinde kullanılan Ø300 mm'lik HDPE boru ve EPS malzemenin sırası ile için model geometrileri: (a)Referans, (b)Konfigürasyon #1 c)Konfigürasyon #2 konfigürasyonları	45
Şekil 2.13	Sayısal analiz için oluşturulmuş model geometrisi (tüm ölçüler cm birimindedir)(Akınay, 2017).....	46
Şekil 2.14	Farklı yoğunluk değerlerindeki EPS Geofom malzemeler için gerilme - şekil değiştirme grafiği (Tefera, 2010).....	51
Şekil 2.15	EPS'nin boru üzerinde bulunduğu, 10 kg/m^3 yoğunluklu EPS'ye sahip, Ø400 mm çapında ve rijitliği 32 kN/m^2 olan bir kodlama örneği	54
Şekil 2.16	EPS geometrisine göre boru tacındaki düşey gerilmelerin karşılaştırılması (EPS10).....	56

Şekil 2.17	EPS geometrisine göre boru tacındaki düşey gerilmelerin karşılaştırılması (EPS15).....	57
Şekil 2.18	EPS geometrisine göre boru yanlarındaki yatay zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS10).....	58
Şekil 2.19	EPS geometrisine göre boru yanlarındaki yatay zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS15).....	59
Şekil 2.20	EPS geometrilerine göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS10).....	60
Şekil 2.21	EPS geometrilerine göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS15).....	61
Şekil 2.22	Plaxis 2D programı ile modellenmiş Ø300 mm çapa sahip SR32 rijitliğindeki bir borunun farklı EPS geometrileri ile 200 kPa yük altındaki düşey gerilme dağılımları.....	62
Şekil 2.23	EPS geometrilerine göre boru tabanındaki oturmaların karşılaştırılması (EPS10).....	63
Şekil 2.24	EPS geometrilerine göre boru tabanındaki oturmaların karşılaştırılması (EPS15).....	64
Şekil 2.25	EPS geometrilerine göre boru merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin oturmalarının karşılaştırılması (EPS10).....	65
Şekil 2.26	EPS geometrilerine göre boru merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin oturmalarının karşılaştırılması (EPS15).....	66
Şekil 2.27	EPS geometrilerine göre borudaki düşey esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS10).....	67
Şekil 2.28	EPS geometrilerine göre borudaki düşey esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS15).....	68
Şekil 2.29	EPS geometrilerine göre borudaki yatay esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS10).....	69
Şekil 2.30	EPS geometrilerine göre borudaki yatay esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS15).....	70
Şekil 3.1	EPS Geofom malzemenin farklı geometriler ile kullanıldığı konfigürasyonların üç boyutlu görselleri.....	72
Şekil 3.2	Kullanılan bar grafiklerine dair açıklama.....	73

Şekil 3.3	SR32 rijitliğinde ve 300 mm çapındaki boruya etkiyen yanal ve düşey zemin gerilmelerinin EPS10 için karşılaştırılması.....	74
Şekil 3.4	SR32 rijitliğinde ve 300 mm çapındaki boruya etkiyen yanal ve düşey zemin gerilmelerinin Konfigürasyon #1 geometrisi için farklı EPS10 ve EPS15 için karşılaştırılması	75
Şekil 3.5	SR32 rijitliğinde ve 300 mm çapındaki boruya etkiyen yanal ve düşey zemin gerilmelerinin Konfigürasyon #2 geometrisi için EPS10 ve EPS15 için karşılaştırılması	76
Şekil 3.6	200 kPa yükleme adımında farklı konfigürasyonlar ve EPS10 ve EPS15 için yatay ve düşey zemin gerilmelerin çembersel grafiği.....	78
Şekil 3.7	EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre boru tabanındaki zemin oturması değerlerinin karşılaştırılması	80
Şekil 3.8	EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre boru merkezinden 35 cm uzaklıktaki oturma değerlerinin karşılaştırılması	80
Şekil 3.9	Farklı EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre borudaki düşey esneme değerleri	82
Şekil 3.10	Farklı EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre borudaki yatay esneme değerleri	82
Şekil 3.11	Farklı çaplara göre rijitliği 32 kN/m ² olan boruda 200 kPa gerilme altındaki düşey gerilmelerin değişimi	84
Şekil 3.12	Farklı çaplara göre rijitliği 32 kN/m ² olan boruda 200 kPa gerilme altındaki yatay gerilmelerin değişimi	84
Şekil 3.13	SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde boru tacına etkiyen düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 3.14	SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde boru tabanına etkiyen düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması	86
Şekil 3.15	SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde boru yan duvarına etkiyen yatay zemin gerilmelerinin karşılaştırılması	87
Şekil 3.16	SR32 rijitliği ve EPS10 kullanıldığında hesaplanan etkiyen yatay ve düşey zemin gerilmelerin çembersel grafiği.....	88
Şekil 3.17	Farklı konfigürasyonlar ve çaplar için boru tabanında meydana gelen oturma değerleri	89

Şekil 3.18	SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 için farklı konfigürasyonlar ve çaplar için zemin içerisinde meydana gelen oturma değerleri.....	90
Şekil 3.19	SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde düşey esneme değerlerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 3.20	SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde yatay esneme değerlerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 3.21	Farklı boru rijitliklerine göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri	93
Şekil 3.22	Farklı boru rijitliklerine göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmeleri	94
Şekil 3.23	Farklı boru rijitliklerine göre boru yan duvarındaki yatay zemin gerilmeleri	95
Şekil 3.24	Farklı boru çapları, EPS konfigürasyonları ve rijitlik değişimlerinin boru tabanına etkileyen düşey zemin gerilmeleri için karşılaştırılması	96
Şekil 3.25	Farklı boru çapları, EPS konfigürasyonları ve rijitlik değişimlerinin boru tacına etkileyen düşey zemin gerilmeleri için karşılaştırılması.....	97
Şekil 3.26	Farklı boru rijitlikleri için boru tabanındaki düşey oturma değerleri	98
Şekil 3.27	Farklı boru rijitlikleri için zemin içerisindeki düşey oturma değerleri	99
Şekil 3.28	Farklı boru rijitlikleri için düşey esneme değerleri	101
Şekil 3.29	Farklı boru rijitlikleri için yatay esneme değerleri.....	101
Şekil 4.1	Arazide boru yükleme deneyi genel görünümü.....	103
Şekil 4.2	Deney elemanları: (a) Hidrolik kriko (b) Yükleme plakası	104
Şekil 4.3	Deneyde kullanılan ölçüm aletleri ve bağlantı detayları	104
Şekil 4.4	Oturma ölçümlerine ait görünüm.....	104
Şekil 4.5	Boru içerisinde alınan görüntüler (a) deney başlamadan önce alınan görüntü (b) Boru 515 kN yük altında olduğu anda alınan görüntü ...	106
Şekil 4.6	Boru yükleme deneyinde gerilme-oturma ölçümleri	107
Şekil 4.7	Borunun deney sonrasında elde edilmiş görüntüsü	107
Şekil 4.8	Arazi deneyi sırasında boruda düşeyde meydana gelen değişimler..	108
Şekil 4.9	Arazi boru yükleme deneyinin sayısal analizleri için kullanılan model	109

Şekil 4.10	Parametrik çalışma için kullanılan sayısal analiz modeli	109
Şekil 4.11	Boru altında, boru üstünde ve yükleme plakasında meydana gelen oturumların karşılaştırılması	113
Şekil 4.12	Boru çapında meydana gelen değişimlerin karşılaştırılması	114
Şekil 4.13	Sayısal analizler ile elde edilen oturma değerlerinin 400 kPa ve 515 kPa yük altında karşılaştırılması	115
Şekil 4.14	Sayısal analizler ile elde edilen esneme değerlerinin 400 kPa ve 515 kPa yük altında karşılaştırılması	116
Şekil 5.1	Farklı geometriler için EPS konfigürasyonları	117
Şekil 5.2	EPS malzemenin yoğunluğunun artması durumu	117
Şekil 5.3	EPS malzeme kalınlığı değişimi	117
Şekil 5.4	EPS malzemenin genişliğinin değişimi	118
Şekil 5.5	Kemerlenme faktörünün değişimini gösteren örnek grafik üzerinden açıklamalar	119
Şekil 5.6	EPS malzeme yoğunluğunun boru tacındaki düşey gerilmelere etkisi	121
Şekil 5.7	EPS malzeme yoğunluğunun boru tabanındaki düşey gerilmelere etkisi	121
Şekil 5.8	EPS malzeme yoğunluğunun boru yanındaki yatay gerilmelere etkisi	122
Şekil 5.9	Plaxis 2D programı ile modellenmiş Ø300 mm çapa sahip SR32 rijitliğindeki bir borunun farklı EPS geometrileri ile 400 kPa yük altındaki düşey gerilme dağılımları:.....	123
Şekil 5.10	Konfigürasyon #1'de farklı EPS yoğunlukları için VAF değişimleri...124	
Şekil 5.11	Konfigürasyon #1'de farklı EPS yoğunlukları için HAF değişimleri ..124	
Şekil 5.12	EPS konfigürasyonlarına göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri	126
Şekil 5.13	EPS konfigürasyonlarına göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmeleri	127
Şekil 5.14	EPS konfigürasyonlarına göre boru çeperine gelen yanal zemin gerilmeleri	128
Şekil 5.15	EPS konfigürasyonlarına göre VAF değişimleri	129
Şekil 5.16	EPS konfigürasyonlarına göre HAF değişimleri.....	129

Şekil 5.17	EPS malzemenin genişliğine göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri	130
Şekil 5.18	EPS malzemenin yüksekliğine göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri	131
Şekil 5.19	EPS malzemenin genişliğine göre VAF değişimleri	132
Şekil 5.20	EPS malzemenin genişliğine göre HAF değişimleri	132
Şekil 5.21	EPS malzemenin yüksekliğine göre VAF değişimleri	133
Şekil 5.22	EPS malzemenin yüksekliğine göre HAF değişimleri	133
Şekil 5.23	Kırmataş malzemenin elastisite modülü değerlerine göre VAF değerleri	136
Şekil 5.24	Kırmataş malzemenin elastisite modülü değerlerine göre HAF değerleri	136
Şekil 5.25	Kırmataş elastisite modülündeki değişime göre düşey esneme değerleri	137
Şekil 5.26	Kırmataş elastisite modülündeki değişime göre yatay esneme değerleri	138
Şekil 5.27	EPS Konfigürasyonları ve farklı hendek geri dolgusu için VAF değerleri	140
Şekil 5.28	EPS Konfigürasyonları ve farklı hendek geri dolgusu için HAF değerleri	141
Şekil 5.29	Boru rijitliğinin azalması ile VAF değişimi	142
Şekil 5.30	Boru rijitliğinin azalması ile HAF değişimi	143
Şekil 5.31	Boru rijitliğinin azalması ile düşey esneme değerleri	144
Şekil 5.32	Boru rijitliğinin azalması ile yatay esneme değerleri	144

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Zemin türleri için ortalama zemin reaksiyon modülü degerleri (Howard, 2006).....	5
Tablo 1.2	Korige HDPE borunun kısa ve uzun vadeli malzeme parametreleri (Kang, 2009).....	20
Tablo 2.1	Deney zemini indeks özellikleri (Akınay, 2017)	38
Tablo 2.2	Deneylerde kullanılan EPS malzeme özellikleri (Akınay, 2017)	39
Tablo 2.3	Kum zemin parametreleri (Akınay, 2017).....	47
Tablo 2.4	Boru duvarı için girilen “Doğrusal Elastik Model” parametreleri (Akınay, 2017).....	48
Tablo 2.5	Boru tiplerinin çember rijitliklerinin 24 saatlik deney sonuçlarına göre değerleri.....	48
Tablo 2.6	Sayısal Analizlerde Kullanılan SR32 ve SR4 Borular için Parametreler	49
Tablo 2.7	Tank duvarı için Doğrusal Elastik Model parametreleri (Akınay, 2017)	50
Tablo 2.8	EPS tiplerine göre pekleşen zemin modeli parametreleri (Tefera, 2010)	52
Tablo 2.9	Analizlerde kullanılan EPS malzemenin farklı yükler altındaki elastisite modülü değerleri.....	52
Tablo 4.1	Arazi deneyi yükleme adımları.....	105
Tablo 4.2	Deney zeminlerine ait parametreler	110
Tablo 4.3	Sayısal analizlerde kullanılan zemin parametreleri	111
Tablo 4.4	Boru duvarı için girilen “Elastik Model” parametreleri (Akınay, 2017)	112
Tablo 5.1	Dolgu yüksekliğinin 10 metre (200 kPa) ve 20 metre (400 kPa) olduğu durumda meydana gelen oturma ve esneme değerlerinin kemerlenme faktörleri ile ilişkisi	125
Tablo 5.2	Kırmataş malzemenin farklı elastisite değerleri için kullanılan parametreler	134
Tablo 5.3	Farklı hendek malzemesi için kullanılan parametreler	139
Tablo 6.1	Kilometre başına Ø700 mm çapa sahip borular için maliyet hesabı.	145

GENLEŞTİRİLMİŞ POLİSTİREN MALZEME KULLANIMININ GÖMÜLÜ ESNEK BORU DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN SAYISAL ANALİZLER İLE İNCELENMESİ

Furkan Ahmet AKYELKEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Geleneksel yöntem ile döşenmiş olan bir gömülü esnek boru, zemin yükü etkisi ile düşey doğrultuda aşağı yönde esner. Boru tacının yer değiştirmesinin yanlarda yer alan zeminlerin yer değiştirmesinden daha büyük olması nedeni ile boru tacı üzerinde yer alan zemin kütlesi içerisinde farklı oturmalar meydana gelir. Farklı oturmalar zemin kütlesi içerisinde “pozitif zemin kemerlenmesi” olarak adlandırılan mekanizmanın gelişmesine neden olur ve bunun sonucunda boru tacına geostatik gerilmeden daha küçük bir düşey gerilme etkir. Dolayısı ile gömülü esnek boru etrafına farklı oturmaların büyüklüğünü artıracak sıkışabilir malzemelerin yerleştirilmesi ile kemerlenme düzeyi arttırılabilir. Kemerlenme düzeyinin artması boruya etkiyen zemin gerilmelerinin azalmasını ve düşük rijitlikte boru kullanılmasına olanak sağlayabilir.

Bu çalışmada, gömülü esnek borunun üzerinde ve çepeçevre etrafında EPS Geofom malzeme kullanılması durumlarında boru üzerine etkiyen gerilmelerin ve esnemelerinin değişimi sayısal analizler ile incelenmiştir. Bu analizlerde EPS Geofom malzemenin yoğunluğu, geometrileri, boru çapı, boru rijitliği ve kullanılan zeminin cinsi ile elastisitesi değiştirilerek boru üzerine etkiyen gerilmeler ve boru

esnemeleri değerlendirilmiştir. EPS Geofom malzemenin yoğunluğu azaldıkça boru üzerine etkiyen gerilmelerin azaldığı belirlenmiş ve borunun çepeçevre EPS ile sarılması durumunda boru üzerine etkiyen gerilmelerde yaklaşık olarak %60-70 oranında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EPS Geofom blok, HDPE borular, Plaxis 2D, kemerlenme etkisi, nümerik analiz



INVESTIGATION OF EFFECTS OF EXPANDED POLYSTYRENE MATERIAL USE ON BURIED FLEXIBLE PIPE BEHAVIOR BY NUMERICAL ANALYSIS

Furkan Ahmet AKYELKEN

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Havvanur KILIÇ

A buried flexible pipe, which is furnished with a conventional method, is inferior in the vertical direction with the effect of the ground load. Since the displacement of the pipe crown is larger than the displacement of the floors at the sides, different settlements occur in the soil located on the pipe crown. Different settlements cause the so-called “positive arching” term within the soil and as a result as a result, a buried thermoplastic pipe crown has a smaller vertical stress than the geostatic stress. Consequently, the level of arching can be increased by placing compressible materials around the buried flexible pipe to increase the size of the different settlements. The increasing of the arching factor can allow the reduction of the ground stresses on the pipe and the use of pipes with lower rigidity.

In this study, in cases where EPS Geofom material is used top of the buried flexible pipe and all around the circumference, the changes of the stresses and pipe stretching on the pipe were investigated under plane shape conditions by numerical analysis. In the analyzes with Plaxis 2D software, Linear Elastic Model was used for

HDPE pipe behavior, and the Soil Model was used for soil behavior. During the analysis the density of the EPS Geofom material, pipe diameter and pipe stiffness were changed so that the stresses and pipe stretching on the pipe were evaluated. As the density of EPS Geofom material decreases, it is determined that the stresses on the pipe are decreased and if the pipe is wrapped with all-round EPS, it is determined that the stresses on the pipe decrease by approximately 60-70%.

Key words: EPS Geofom block, HDPE pipes, Plaxis 2D, soil arching, numerical analysis



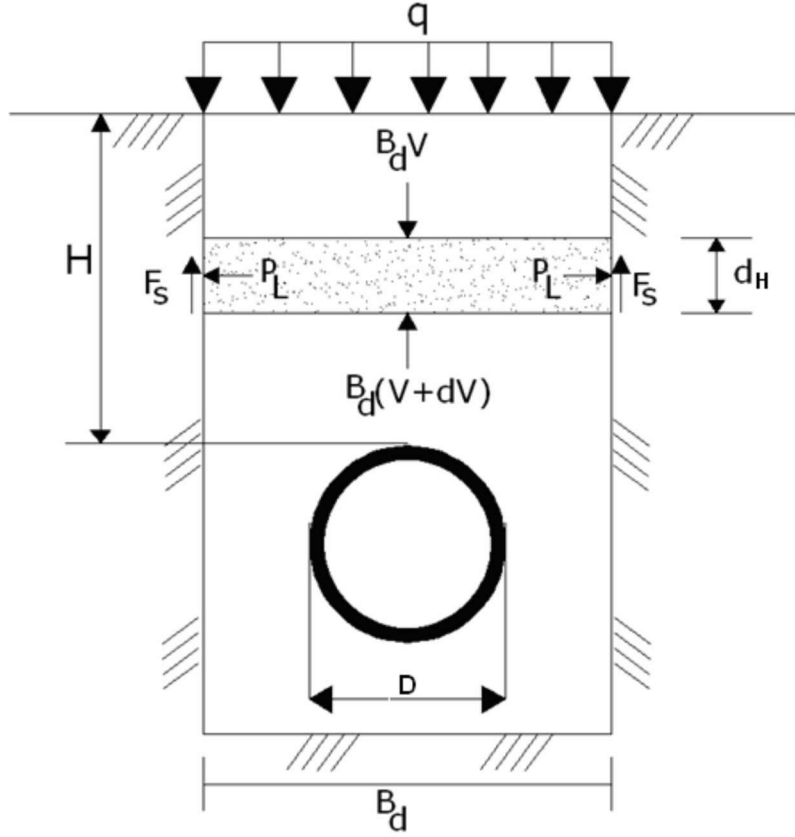
Toplumların tarih boyunca şehirleşmesine paralel olarak çeşitli hammaddelere erişimi ve oluşan atıkların uzaklaştırılması günden güne önem kazanmıştır. Bu kapsamda doğan ihtiyaç, tarih boyunca çeşitli boru hatları ile giderilmiştir. Mühendislik bilimleri ilerledikçe bu boru hatları yüzeyden yer altına alınmış, böylece hem yanıcı akışkan maddelerin güvenliği hem de kirlenmeye ve buharlaşmaya elverişli olan akışkanların korunması bakımından daha uygun çözümlere ulaşılmıştır. Gömülü boru hatları günümüzde içme suyu, doğal gaz, petrol gibi hammaddelerin öncelikle şehirlere, daha sonra şehir içerisindeki merkezlere ulaştırılmasında ve aynı şekilde yağmur suyu, kanalizasyon gibi atık maddelerin şehir merkezlerinden uzaklaştırılmasında büyük rol oynamaktadır. Boru hatlarının üzerine etkiyen yükler altında servis ömürleri boyunca sorunsuzca hizmet edebilmesi inşaat mühendisliği açısından çok önemli bir konudur. Bu boru hatlarının hasar görmesi hem içerisindeki akışkanın sızması ile oluşacak tehlikeler bakımından hem de yüksek maliyetli onarım masrafları yüzünden en önemli ve dikkat edilmesi gereken konuların başında gelmektedir.

Tarihsel gelişim içerisinde boru hatlarının yer altına alınmasında genellikle rijit borular tercih edilmiştir. Fakat günümüzde hem teknolojinin hem de mühendislikteki gelişmelere paralel olarak, rijit boruların yerini düşük maliyetli, taşınması ile bakım ve onarımı daha kolay olan esnek borular almıştır. Rijit boruların aksine esnek borular içerisinde bulunduğu zemin ile bir bütün gibi davranırlar ve bu yüzden boru ile zemin arasındaki yapı - zemin ilişkisinin kemerlenme kavramı ile beraber düşünülmesi gerekmektedir. Yapılan arazi ve laboratuvar deneylerine dayanılarak, esnek boruların yük altında bir miktar esnemesi sonucu gelişen kemerlenme ile üzerlerine etkiyen gerilmelerin bir kısmını etrafında bulunan yan dolgu zemine aktardığı belirlenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Gömülü borular üzerinde ilk bilimsel çalışmalar Marston A., tarafından 1900'lerin başında ABD'de Iowa Üniversitesi'nde yapılmıştır. Marston (1913) yapılan çalışmalardan yola çıkarak rijit borular için bir diferansiyel denklem geliştirmiştir. 1930 yılında ise yaptığı

deneysel çalışmalarının sonucunda gömülü rijit bir boruya etkiyen kesme kuvvetleri Marston hendek kesitine göre Şekil 1.1'de incelenmiştir.



Şekil 1.1 Zemin yükü altında rijit borulara ait Marston hendek kesiti

Şekil 1.1'de gösterilen kesit üzerindeki düşey kuvvetlerin dengesi göz önünde bulundurulduğunda V yükü, H derinliği ve d_H kalınlığındaki tabaka için;

$$B_d(V + dV) + 2F_s = B_d V \quad (1.1)$$

elde edilir. Denklem 1.1'de bulunan katsayıların eşitlikleri sırasıyla denklem 1.2, 1.3, 1.4 ve 1.5'te;

$$F_s = P_L \mu' d_H \quad (1.2)$$

$$P_L = K_a V \quad (1.3)$$

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (1.4)$$

$$\mu' = \tan \phi \quad (1.5)$$

olarak ele alınmıştır. Bu denklemlerde bulunan P_L = Uygulanan yanal yükü, B_d = Hendek genişliğini, μ' = Sürtünme katsayısını, F_s = Sürtünme kuvvetini ve K_a = Rankine Katsayısı'nı ifade etmektedir. Teoride belirtilen Denklem 1.1' diferansiyel çözüme gidildiğinde;

$$V = q \cdot e^{-2Ka'u' \frac{H}{B_d}} \quad (1.6)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte (1.6) bulunan q değeri yayılı yükü ifade etmektedir.

Iowa Üniversitesi'nde Marston tarafından yapılan çalışmaların ardından öğrencisi olan Spangler, rijit borular için üretilen ve esnek borular için yetersiz kalan ve denklem (1.6) ile ifade edilen bu teoriyi 1941 yılında geliştirmiştir. Esnek boruların hendek ortamındaki davranışını anlamak için çalışmalar yapan Spangler esnek boruların yatayda yaptığı deformasyonun (Δx) zemin özelliklerine ve boru rijitliğine bağlı olduğunu öne sürmüştür.

$$\Delta x = \frac{\text{Boru Üzerindeki Yük}}{\text{Boru Özellikleri} + Z_e \cdot \text{Özellikleri}} \quad (1.7)$$

“Iowa Eşitliği” olarak tanımlanan bu eşitlik (1.7) günümüzde yapılan akademik çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu eşitlik daha sonra Watkins tarafından 1958 yılında “Geliştirilmiş Iowa Eşitliği”ne dönüştürülmüştür. Farklı zemin cinsleri dikkate alındığında boruya etkileyen pasif itkinin hesaplanması zorluğundan dolayı eşitlikte revizyonlar yapılmış ve Zemin Reaksiyon Modülü “E” değeri eşitliğe dahil edilmiştir.

Bu noktada Spangler (1941) and Watkins'in (1958) ortaya koyduğu deformasyon denkleminde (1.9) deformasyonun boru parametrelerinden bağımsız olarak hesaplandığı görülmüştür.

$$\Delta y / D (\%) = \left(\frac{K_B q D_L}{E_p I / r^3 + 0.061} \right) \times 100 \quad (1.8)$$

Denklem (1.8)'de bahsi geçen parametreler şu şekildedir; Δy = Düşey esneme, K_B = Yatak katsayısı, q = Uygulanan yayılı yük, D_L = Gecikme faktörü, E' = Zemin elastisite modülü ve I = Boru duvar kesitinin eylemsizlik momenti. Bunun yanı sıra McGrath (1998) tarafından esneme değeri denklem (1.9) eşitliğinde, Spangler ve Watkins'in oluşturduğu denklemlerden farklı olarak M_s = Tek boyutlu zemin elastisite modülü, A_p = Birim uzunlukta boru duvarının alanı parametleri bulunmaktadır.

$$\Delta y / D (\%) = \left(\frac{q}{E_p A_p / r + 0.57 M_s} + \frac{K_B q D_L}{E_p I / r^3 + 0.061 M_s} \right) \times 100 \quad (1.9)$$

Denklemlerde kullanılan zemin reaksiyon modülünün temel zemin tabakaları için değerlerini Howard 1977 yılında belirlemiştir. Nielsen (1967), Allgood (1972) ve Chambers (1980) gibi araştırmacılar bu modül yerine bir boyutlu sıkışma modülünü kullanmayı savunmuşlardır. Esnek borularda şekil değiştirme değerlerini hesaplamak

için kullanılan ilk eşitlik olan Geliştirilmiş Iowa Eşitliği'nin günümüzde halen kullanmak mümkündür. Bunun başlıca sebepleri denklemin karmaşık ve zor olmamasıdır. Aynı zamanda burada meydana gelen şekil değişimleri zamana ve yatak koşullarına bağlıdır.

Bu eşitlik esnek düz boruların yanı sıra kıvrımlı borular için de kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra eşitlik ile hesaplanan yer değiştirmeler yalnızca yatay ekseninde var olan yer değiştirmelerdir ve çembersel şekil değiştirmeleri içermemektedir. Kullanılan zemin reaksiyon modülü zeminin eşdeğer özellikler taşımaması durumunda yanlış sonuçlara yol açabilmektedir. Ayrıca boru ile geri dolgu etkileşimi ve doğal zeminin rijitliğinin etkisi göz ardı edilmektedir.

Bu noktada Howard (1977) yılına kadar üzerinde çalıştığı arazi deneylerinden yola çıkarak farklı relatif kompaksiyon derecelerindeki zeminler için ortalama bir reaksiyon modülü tahmini için bir tablo geliştirmiştir. Bu tabloyu 2006 yılında tekrar gözden geçirip güncel haline getirmiştir (Tablo 1.1).

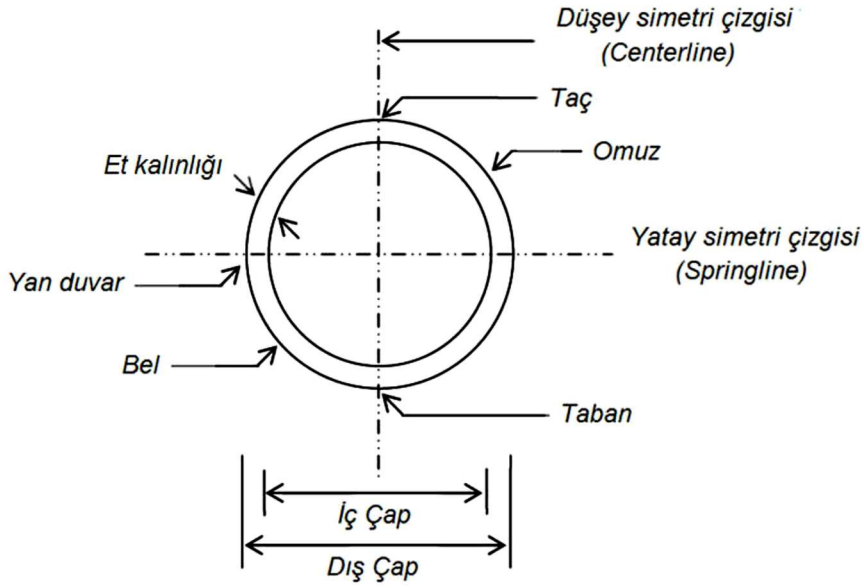
Tablo 1.1 Zemin türleri için ortalama zemin reaksiyon modülü degerleri (Howard, 2006)

Zemin Sınıfı	Zemin Türü	Relatif Kompaksiyon Yüzdesine Göre E' Değeri (kPa)			
		Gevşek	< %85	%85 - %95	> %95
V	İnce daneli zeminler ($W_L > 50$) (CH, MH, OH, OL, Pt)	Kullanılması önerilmemektedir. ($E'=0$)			
IV	İnce daneli zeminler ($W_L < 50$) (CL, ML + %25'den daha az kaba daneli malzeme içeriği)	345	1380	2760	10345
III	İnce daneli zeminler ($W_L < 50$) (CL, ML + %30'den daha fazla kaba daneli malzeme içeriği) Kaba daneli zeminler (GM, GC, SM, SC + %13'den daha fazla ince dane içeriği)	1035	2760	6900	17240
II	Kaba daneli zeminler (GW, GP, SW, SP + %12'den daha az ince dane içeriği)	1380	4825	13800	27600
I	Kırma taş (9.5 mm'lik elekten geçen malzeme %25'ten az + %12'den az ince dane oranı)	Kompaksiyon uygulanmamış		Kompaksiyon uygulanmış	
		7000		42000	

1.1.1 Gömülü Borular Hakkında Teknik Bilgiler

Şekil 1.2'de görüldüğü üzere boruyu düşeyde iki eşit parçaya bölen çizgi düşey simetri çizgisi (centerline), yatayda iki eşit parçaya bölen çizgi ise yatay simetri çizgisidir (springline). Düşey simetri çizgisinin üst kısımda boruyu kestiği noktaya taç (crown), alt kısımda boruyu kestiği noktaya ise taban (invert) denilmektedir. Yatay simetri çizgisi ise boruyu yatayda iki noktada keser ve bu noktalara yan duvarlar denilmektedir. Taç ile yan duvar arasında kalan bölgeye omuz (shoulder), taban ile yan duvar arasında kalan bölgeye ise bel (haunch) denilmektedir. Bu geometrik terimlerin yanı sıra E = Boru malzemesine ait elastisite modülü, ν = Boru malzemesinin Poisson oranı, I = Boru

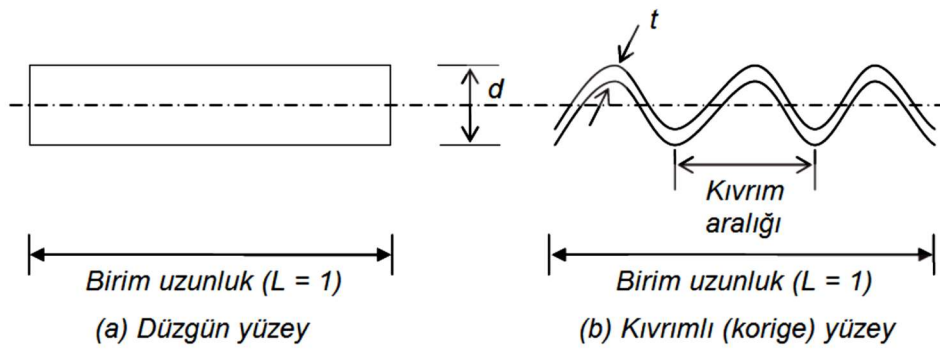
duvarının birim uzunluğuna ait eylemsizlik momenti ve $A =$ Boru duvarının birim uzunluktaki kesit alanı olarak mühendislik terimleri de kullanılmaktadır.



Şekil 1.2 Boru geometrisini hakkında teknik terimler (Mada, 2005)

Borular ile ilgili mühendislik hesaplarında kullanılan diğer parametreler ise Çember rijitliği $= EI/r^3$ ve Eğilme Rijitliği $= EI/r^2$ olarak tanımlanmaktadır. Burada elastisite modülü ile eylemsizliğin çarpımının borunun yarıçapına oranları farklı kuvvetlerce ele alınmıştır.

Esnek borularda kesit alanı düz veya kıvrımlı (corrugated / korige) olabilmektedir. Kıvrımlı boruları düz borulardan ayıran başlıca özellik çember rijitliğinin yüksek değerlere ulaşabilmesidir. Bunun sebebi kıvrımlar sayesinde et kalınlığının arttırılmasıdır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Boru duvar kesitleri: (a) Düzgün yüzey (b) Kıvrımlı yüzey (Mada, 2005)

1.1.2 Boru tipleri ve Gömülme Durumları

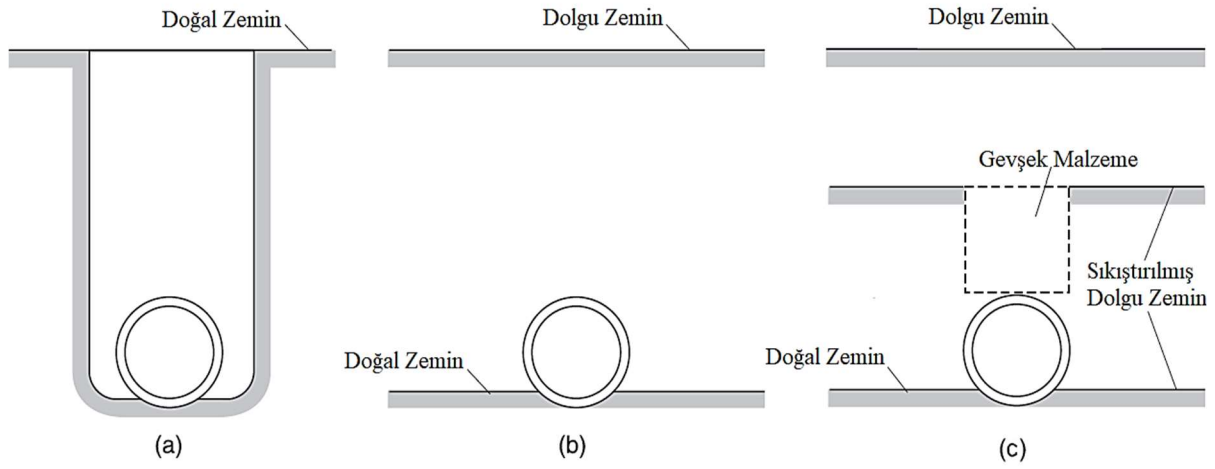
Gömülü borular enine esnemeye göre esneyebilen ve rijit borular olarak ikiye ayrılmaktadır. Boru üzerinde bir hasar meydana gelmeden enkesitinin %2'si kadar esneyebilenlere esnek, %2 mertebesine ulaşmadan hasar gören ve formunu koruyamayanlar ise rijit boru olarak tanımlanmaktadır. Esnek davranış gösteren polimer esaslı (HDPE, PVC, PE vb.) ve çelik borular esnediklerinde üzerlerindeki yükün bir kısmını yanlardaki dolgu zemine aktarabilirken, betonarme ve beton borular üzerine gelen tüm yükleri kendileri taşır (Moser, 2008). Borular aynı zamanda gömülme koşullarına göre hendek ve dolgu borusu olarak da ikiye ayrılmaktadır. Hendek borusu duvarlarının kendini tutabildiği dar bir hendek içerisine yerleştirilen ve geri dolgu ile üzeri örtülen boru çeşidi olarak tanımlanır (Şekil 1.4a). Dolgu borusu ise doğal bir zemin yüzeyi üzerine yerleştirilen ve üzeri dolgu zemin ile örtülen boru olarak tanımlanır (Şekil 1.4b). Bu boru gömülme tiplerinin yanı sıra Sağlamer ve Balkaya (2005) tarafından "eksik hendek yöntemi", Akınay (2017) tarafından ise "yapay hendek yöntemi" olarak adlandırılan (Imperfect Trench Installation - ITI) özel bir boru gömülme tipi mevcuttur (Şekil 1.4c). Bu boru tipi doğal zemin yüzeyi üzerine pozitif projeksiyonlu (doğal zemin yüzeyi seviyesinde yapılan sığ bir yatağa yerleştirilip ve daha sonra üzeri dolgu ile kaplanması durumu) olarak yerleştirilen rijit bir borunun üzerinde hendek ile gevşek bir bölge oluşturulması amacı ile gerçekleştirilir. Gerçekte bu yöntemin Türkçe terminolojiye giren bir adı yoktur, zira bu yöntemin Türkiye'de kayıtlara geçmiş bir uygulaması ve bununla birlikte uygulamaya yönelik bir şartname de yoktur (Akınay, 2017).

Bu yöntemde pozitif projeksiyonlu olarak yerleştirilen bir borunun her iki yanına dolgu malzemesi yerleştirilir ve iyice sıkıştırılır. Bu aşamadan sonra sıkışabilir malzemenin türüne göre iki yol izlenebilir:

1. Sıkışabilir malzeme olarak hızar tozu, saman, kuru yaprak, odun yongası vb. organik malzeme veya lastik kırığı kullanılması durumunda dolgu yapımı boru taç düzeyinin bir miktar üzerine kadar devam ettirilir. Daha sonra borunun üzerinde boru tacına kadar ve boru çapı genişliğinde bir hendek kazılır ve bu hendek sıkışabilir malzeme ile doldurulur.

2. Sıkışabilir malzeme olarak balyalanmış saman, balyalanmış kamış vb. organik malzeme veya genişleştirilmiş polistiren blok kullanılması durumunda ise önce sıkışabilir

malzeme borunun üzerine yerleştirilir ve sonrasında sıkışabilir malzemenin yanlarına dolgu yapılır.

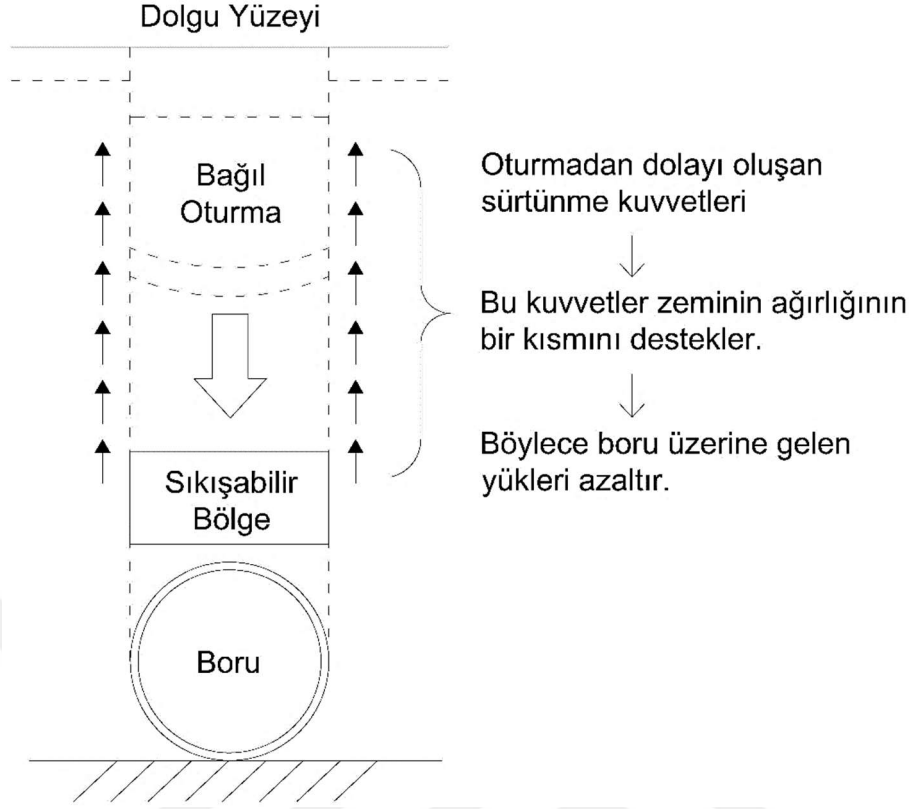


Şekil 1.4 Gömülme durumlarına göre boru türleri (a) Hendek borusu (b) Dolgu borusu (c) Yapay hendek Borusu (Spangler, 1982)

Sıkışabilir bölgenin oluşturulmasının ardından ise nihai dolgu üst düzeyine kadar dolgu inşa edilir. Dolgu yapımı sırasında sıkışabilir malzeme, yarlarda yer alan dolgu malzemesine oranla, daha fazla sıkışır. Bu görece oturma rijit borunun hemen üzerinde yükselen zemin prizması sınırlarında yukarı yönlü kayma kuvvetlerinin oluşmasını sağlar. Böylelikle de dolgu yapısı içerisinde hendek koşulu yapay olarak oluşmuş olur ve rijit boru üzerine daha az yük etkir.

1.1.2.1 Yapay Hendek Metodu

Yapay hendek metodu ile açılan bir hendek içerisinde inşa edilen boru hatlarına dolgu borularında olduğu gibi zemin yükleri etki eder. Geleneksel yapay hendek metoduna bakıldığında Şekil 1.4c'de gösterildiği üzere sıkıştırılmış dolgu zemin doğal zemin ve dolgu zemin arasında olacak şekilde bir tabaka boyunca serildiği görülmektedir. Ardından bu tabakanın üzerine dolgu yerleştirilir ve son olarak yerleştirilen dolgu zemin boru genişliğince kazılarak sıkışabilir gevşek malzeme ile bir hendek inşa edilir. Bu sistemin mekanik çalışma prensipleri Şekil 1.5'te Kang (2007) tarafından açıklanmıştır. Bu sistemde sıkışabilir bölge üzerinde meydana gelecek olan oturmalar zemin içerisindeki sürtünme kuvvetlerince desteklenerek zeminin kendini tutmasını sağlayabilmektedir. Bu sayede boru üzerine gelen düşey gerilmelerin azaldığı söylenebilir.



Şekil 1.5 Yapay hendek metodunun mekanizması (Kang, 2007)

Yapay hendek metodu ilk olarak Marston tarafından ortaya 1922 yılında ortaya atılmış, ardından Spangler (1950) bu yöntemi önemli ölçüde geliştirmiştir. Son olarak Marston ve Spangler basitleştirilmiş bir serbest prizma kütesinin denge koşullarına dayanan diferansiyel denklemlerin çözümü ile yapay hendek metodu ile inşa edilen borular üzerindeki yükleri tahmin etmek için aşağıdaki denklemi (1.10) önermişlerdir:

$$W = C_n \gamma B_c^2 \quad (1.10)$$

Bu denklemde; C_n = yük katsayıları, γ = birim hacim ağırlık ve B_c = Borunun dıştan dışa yatay açıklığı olarak ele alınmıştır. Aynı zamanda boru üzerindeki oturmaları hesaplamak için ise;

$$r_{sd} = \frac{s_g - (s_d + s_f + d_c)}{s_d} \quad (1.11)$$

denklemini geliştirmişlerdir. Bu eşitlikte (1.11); r_{sd} = Yapay hendek metodu için oturma oranı, s_g = sıkıştırılmış zeminin yüzey oturması, s_d = belirli bir kalınlığa sahip dolgu sebebiyle meydana gelen oturma, s_f = boru temelinde meydana gelen oturma ve d_c = boruda meydana gelen esneme olarak tanımlanır.

Spangler ve Marston tarafından yapılan çalışmaların ardından Vaslestad vd. (1993) bu hendek yöntemlerinde boru hatlarına uygulanan zemin yüklerini belirlemek için kemerlenme faktörünü kullanarak bir denklem önerilmiştir (1.12). Bu denklemde yer alan değerler ise denklem (1.13) ile (1.14) detaylandırılmıştır. Kemerlenme etkisini tanımlamak için ise Janbu'nun 1957 yılında kazıklardaki sürtünmeyi belirlemek için kullandığı sürtünme sayısı kullanılmıştır.

$$\sigma_v = N_A \gamma H \quad (1.12)$$

$$N_A = \frac{1 - e^{-2S_v \frac{H}{B}}}{2S_v \frac{H}{B}} \quad (1.13)$$

$$S_v = |\gamma| \tan \rho K_a \quad (1.14)$$

Belirtilen denklemlerdeki değerler H = Dolgu yüksekliği N_A = Kemerlenme faktörü, S_v = Janbu sürtünme sayısı, B = Hendek genişliği, tan ρ = Mobilize zemin sürtünmesi ve K_a = Rankine katsayısını ifade etmektedir.

Marston ve Spangler'den sonra üzerine fazla çalışılmamış olan yapay hendek metodu, Tyler (2003) tarafından tekrar ele alınmıştır. Tyler (2003) tarafından yapılan çalışmada boru şekli, dolgu malzemesinin yüksekliği, genişliği, yeri ve zemin rijitliği gibi durumları incelenmiştir. Fakat bu araştırmada sıkışabilir malzeme hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu kapsamda Yoo vd. (2005) çalışmasında, Katona (1976) tarafından önerilen gevşek malzeme olarak kullanılabilir düşük yoğunluklu polistiren malzeme kullanılmış ve boru etrafında kullanılabilir geometrik koşullar belirleyerek sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmiştir.

1.1.3 Kemerlenme Davranışı

Kemerlenme davranışı ile ilgili en açıklayıcı araştırma Karl von Terzaghi (1943) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmada bahsedildiği üzere sağlam bir zeminin belirli bir kısmı çökme eğiliminde bulunursa çöken kısmın üzerinde bulunan zemin kütlesi de bu kısım ile beraber hareket etmeye başlayacaktır. Bu hareketin sonucu olarak sabit kısım ile kayan kısım arasında bir kayma direnci oluşacak ve sabit kalan kısım hareket eden kısmı tutmaya çalışacaktır. Bu sebepten ötürü aşağı doğru hareket eden kısım üzerine gelen yüklerin bir kısmı sabit kalan kısmın üzerine aktarılacaktır.

Sonlu eleman analizleri ile EPS Geofaom malzeme kullanılarak yapılan çalışmalara örnek olarak Kang'ın (2007) yaptığı çalışma gösterilebilir. Bu çalışmada Kang, EPS Geofaom malzeme kullanarak kıvrımlı duvara sahip (Corrugated) PVC ve beton borulardaki yapı zemin etkileşimlerini incelemiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre EPS Geofaom malzeme kullanarak kemerlenme etkisi ile kıvrımlı duvarlı PVC borularda, etkiyen zemin yüklerinin %80 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir.

1.1.4 EPS Geofaom Malzeme Davranışı

Polistiren, etilen ve benzenin polimerizasyonu yoluyla yapılır. Etilen doğal gaz veya petrol ürünlerinden gelir ve benzen ise bir kok fırınının yan ürünüdür. Genişletilmiş Polistiren (EPS) ise elde edilen bu polistiren parçacıklarının otomatik bir kalıp makinesinde eritilmesi genişletilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu malzeme aşağıdaki özelliklere sahiptir:

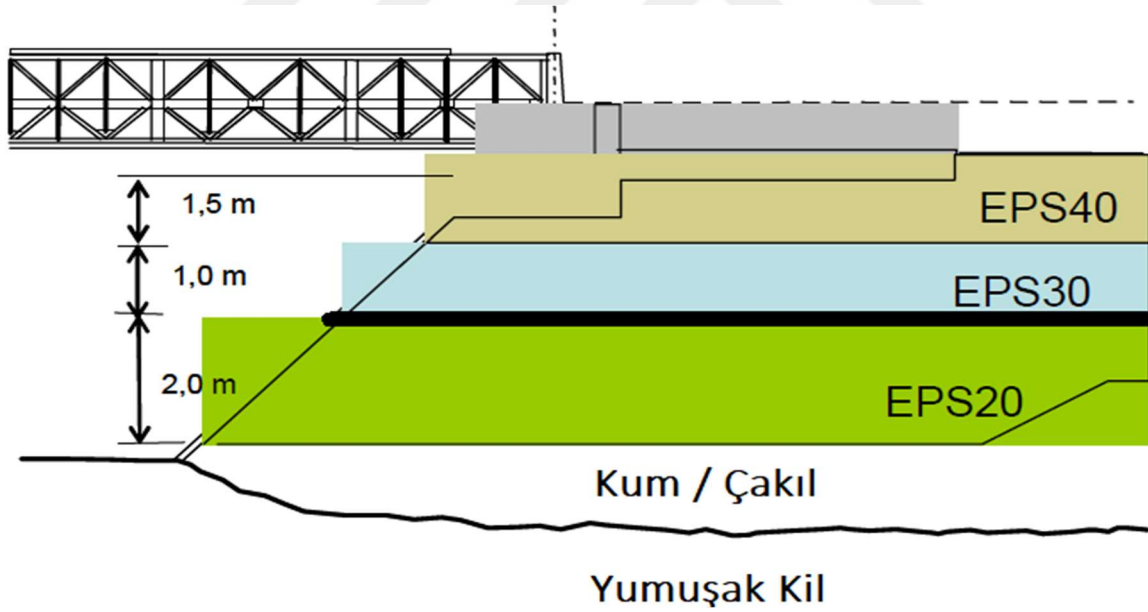
- Hafiflik: Yoğunluğu zeminlerin yaklaşık 1/100'üne denk gelir.
- Verimlilik: Kısa inşaat süresi, arazi kullanımından tasarruf, hacimsel olarak düşük kazma miktarı, düşük bakım maliyeti ve düşük toplam inşaat maliyeti gibi avantajları vardır. İnşası basit ve hızlıdır. Büyük makinelere ihtiyaç duymaz ve sadece insan gücü ile inşa edilebilir.
- Süreklilik: Düşük Poisson oranı, mekanik ve fiziksel özellikleri ile kullanıldığı bölgeye etki eden yanal zemin basınçlarını azaltabilir. Bu sayede iyi bir dolgu malzemesi olarak kullanılma imkânı yaratır.
- Su geçirmezlik: Kapalı hücreli (closed cell) gözenekli olması ve hidrofobik yapısı gereği su geçirmezlik özelliği taşımaktadır.

EPS malzemenin birim ağırlığı, uçucu kül, talaş, ağaç kabuğu ve atık lastik gibi diğer hafif dolgu malzemelerine göre çok daha düşüktür (Elragi, 2000). EPS malzeme 1950 yılında icat edilmiş (BASF, 1997) olup ve o günden beri Norveç, İsviçre, Amerika, Japonya ve Almanya gibi dünyanın birçok yerinde halen kullanılmaya devam edilmektedir.

Genellikle ısı yalıtımı için kullanılan "Genleştirilmiş Polistiren (EPS) Geofaom" inşaat mühendisliği alanında ilk kez 1972 yılında "hafif dolgu malzemesi" olarak Norveç'te bulunan bir yol dolgusundaki oturmaların önüne geçebilmek için kullanılmıştır. Böylece Norveç Karayolu Araştırmaları Laboratuvarı, EPS Geofaom malzemenin kullanım yelpazesini genişletmek için gerekli ilk adımı atmıştır. Bunun ardından Oslo'da 1985

yılında gerçekleşen “Birinci Uluslararası Geofoam Konferansı” kapsamında farklı ülkelerden gelen katılımcıların EPS Geofoam deneyimleri paylaşılmıştır. Konferansı takip eden 2 yıl içinde ise Japonya’da 2000’i aşkın projede 1.5 milyon metreküp Geofoam kullanılmıştır. Bahsedilen EPS Geofoam malzeme bu süre boyunca beton borular ile birlikte de kullanılmıştır.

EPS Geofoam ile yapılan ilk projelerden bir diğeri olan Løkkeberg köprüsü ise Norveç'te 1989 yılında gerçekleşmiştir (Vaslestad, 2019). Bu duruma örnek teşkil etmesi açısından paylaşılan ve Norveç'te inşa edilen Løkkeberg köprüsü, EPS Geofoam malzemenin inşaat mühendisliğinde kullanımının literatürde ilk örneklerinden biri olarak gösterilmektedir. Bu projede üç farklı yoğunlukta EPS Geofoam kullanılmıştır. Projeye ait çizimler Şekil 1.7 ile, projenin inşa sürecinden bir kesit ise Şekil 1.8 ile gösterilmiştir. Bu projede inşa edilen köprünün EPS üzerine oturan ayaklarında 12 yıllık hizmet süresi sonunda ölçülen oturma değerleri yaklaşık 6 cm olarak gözlemlenmiştir, bu değer aynı zamanda kullanılan EPS tabakasının kalınlığının %1.3'üne tekabül etmektedir. Bu deformasyon değeri araştırmayı yürüten mühendisler tarafından tatmin edici olarak değerlendirilmiştir.



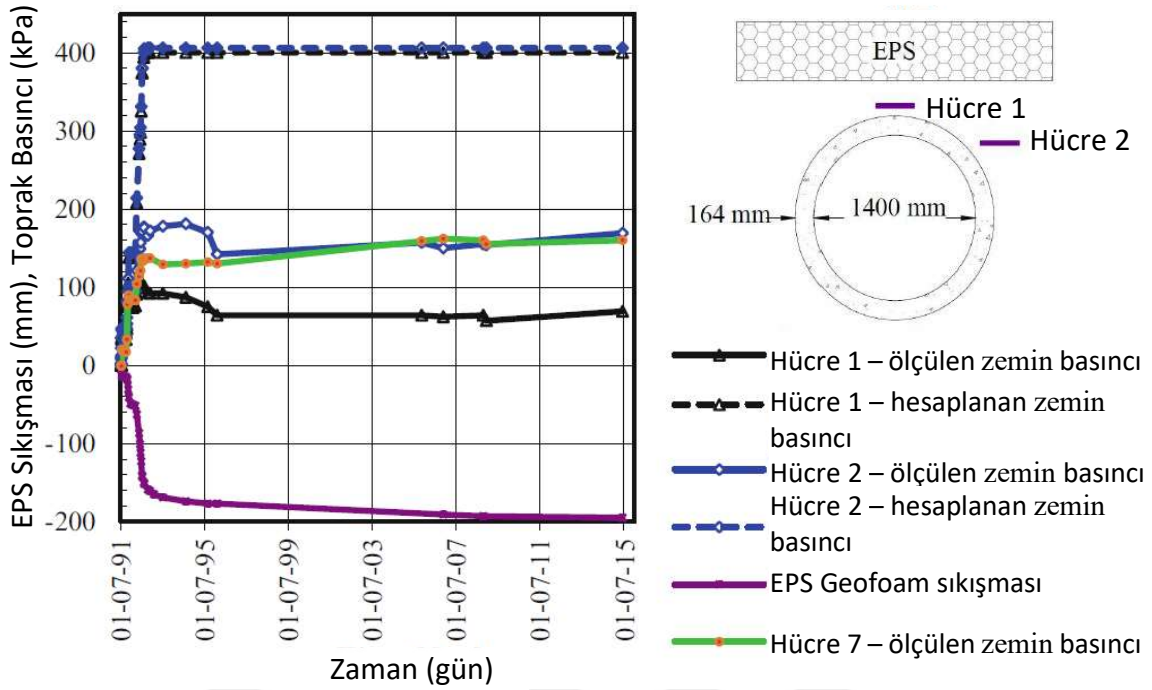
Şekil 1.7 Løkkeberg köprüsünün EPS Geofoam ile yapılan projesi



Şekil 1.8 Løkkeberg köprüsünün EPS Geof foam ile inşası (Norveç, 1989)

EPS Geof foam malzemenin üzerinde daha önce yapılan serbest basınç, üç eksenli basınç ve kesme kutusu gibi deney sonuçlarına göre (Hazarika, 2006), malzemenin zamanla pekleşen bir zemin gibi davrandığı belirtilmiştir. Böylece sayısal analizlerde malzeme davranışı modellenirken, örnek bir EPS Geof foam malzeme üzerinde yapılan deney sonuçlarından faydalanılabilmektedir. Elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinden yararlanılarak, gerilme seviyesine bağlı olarak rijitlik belirlenerek sayısal analizlerde kullanılabilmektedir. Bu davranış biçimi malzemenin yük altında vereceği olası tepkilere çok yakın ve gerçekçi bir yaklaşım olarak nitelendirilebilir.

Vaslestad (2011) ise 1988-2011 yılları arasında Norveç'te kullanılan yapay hendek yöntemini araştırmış ve üzerlerine dolgu inşa edilen beton boruları 20 yılı aşkın süre gözlemlemiştir. Bu yöntem ile sıkışabilir malzeme olarak kullanılan, yoğunluğu 20 kg/m^3 olan genleştirilmiş polistiren (EPS) bloklar boru üzerinde pozitif zemin kemerlenmesi oluşturmuştur. Borulara etkiyecek zemin gerilmelerinin ölçülmesi için toprak basıncı hücreleri ve EPS bloklardaki oturmaların ölçülmesi için oturma plakaları kullanılmıştır. 20 yıllık bu periyot süresince elde edilen zemin basınçları ve EPS Geof foam malzemenin üzerinde meydana gelen deformasyon Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Düşey zemin basınçları ve EPS sıkışması (Vaslestad, 2019)

Bunun yanı sıra beton borular ile kullanılan EPS Geofoam malzemede sıkışma granüler zeminde %28-38 arasında, kohezyonlu zeminde ise %50'nin üzerinde ölçülmüştür. Son olarak dolgu inşasının tamamlanmasından sonra geçen süre boyunca boru tacına etkiyen düşey gerilmede artış meydana gelmediği ve EPS Geofoam malzeme üzerinde oluşan şekil değiştirmelerin büyük kısmının dolgu inşası sırasında meydana geldiği rapor edilmiştir.

Bir diğer EPS Geofoam uygulaması ise 2009 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Kentucky Eyaleti'nde betonarme kutu menfezlerde uygulanmıştır (Sun vd., 2009). Bu uygulama da yapay hendek metodu ile gerçekleştirilmiş olup (Şekil 1.10), zemin gerilmeleri ve EPS malzemede meydana gelen oturmalar değerlendirilmiştir. 60 cm kalınlığında ve 21.6 kg/m^3 yoğunluğunda genişletilmiş polistiren (EPS) sıkışabilir malzeme ile pozitif kemerlenme etkisi ortaya çıkarılmıştır. Sun vd. (2009) yaptığı çalışmada olduğu gibi zemin gerilmelerinin ölçülmesi için toprak basıncı hücreleri ve EPS bloklardaki oturmaların ölçülmesi için oturma plakaları kullanılmıştır. İki farklı kesitte incelenen bu uygulamada birinci kesitte menfez genişliği kadar, ikinci kesitte ise menfez genişliğinin 1.5 katı kadar EPS blok kullanılmıştır.



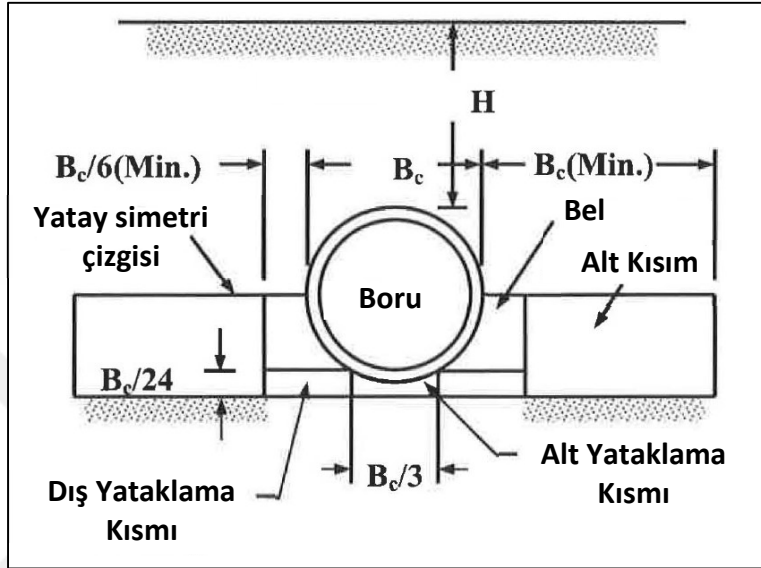
Şekil 1.10 Yerleştirilmiş EPS Geofaom blokları ve oturma plakaları (Sun vd., 2009)

Bu çalışmadan sonra Sun vd. (2011) EPS Geofaom malzemenin yapay hendek metodu ile kullanıldığı durumdaki uzun süreli davranışını incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucunda EPS Geofaom malzemenin menfez genişliğinde olduğu durumda menfez üzerine etkiyen düşey gerilmelerde %9, menfez genişliğinin 1.5 katı olduğu durumda ise %11 kadar azaldığı belirlenmiştir. Alınan ölçümlere göre ise EPS bloklardaki oturmaların %60'a yaklaştığı ve ilerleyen zamanla birlikte oturma hızında çok büyük azalmalar olduğu gözlemlenmiştir.

1.1.5 Gömülü Boru – EPS Geofaom İlişkisinin Deneysel Çalışmalar ve Sayısal Analizler ile İncelenmesi

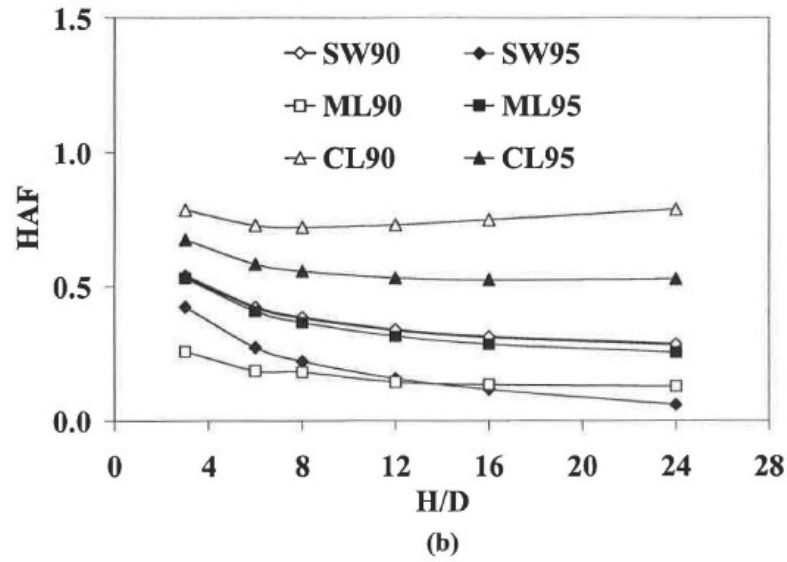
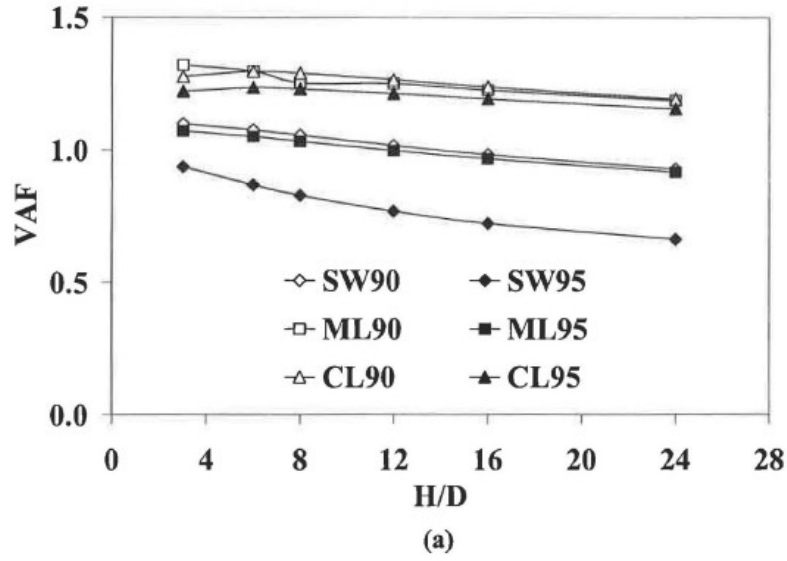
Junsuk Kang ve Chai H. Yoo (2007) sonlu elemanlar yöntemleri ile yapay hendek metodundaki sıkışabilir malzeme için optimum bir bölge geometrisi belirlemeyi hedeflemiştir. Bu geometri elde edilirken önce “ABAQUS” ve “MSCINASTRAN” yazılımları, ardından “CANDE-89 (Menfez Analizi ve Dizayn Programı)” ve “SPIDA (Zemin-Beton Boru Etkileşim Tasarımı ve Analizi Programı)” yazılımları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemleri ile yapılan analizlerle değerlendirmiştir. Araştırmanın sonucunda yapay hendek metodundaki sıkışabilir malzeme bölgesi için hem korige PVC hem de çelik borular için kullanılabilir geometriler ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında yapay

hendek metodu detaylıca incelenip daha önce Şekil 1.11 ile belirtilen yapay hendek metodu mekanizması kullanılmıştır. Bu çalışmadan önce Brown (1957) ve Kim ve Yoo (2002) tarafından yapay hendek yöntemi üzerinde benzer çalışmalar yapılmış fakat bu çalışmalarda borunun yan duvarlarına etkiyen kesme kuvvetleri dikkate alınmamıştır. Bu nedenle ilerleyen çalışmalarda kesme kuvvetleri incelenmiş ve bu kuvvetleri engelleyecek geometriler araştırılmıştır.



Şekil 1.11 ASHTO Standartlarına göre dolgu inşasına ait geometrik koşullar (AASHTO, 2004a)

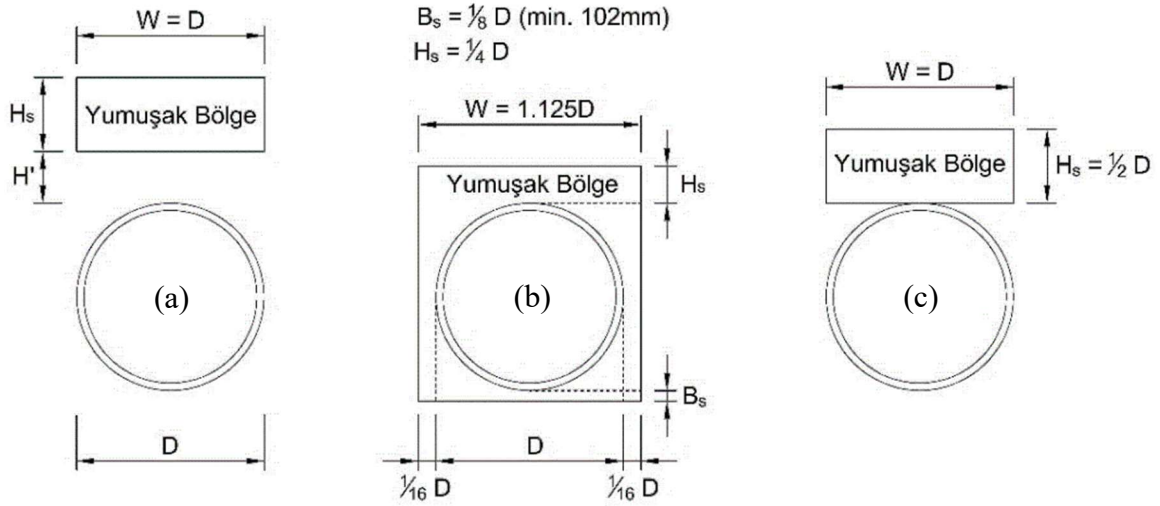
Çalışmada ele alınan bir diğer önemli unsur ise farklı dolgu malzemelerine göre hendekte meydana gelen yatay kemerlenme faktörü (HAF) ve düşey kemerlenme faktörü (VAF) değerlerinin hesaplanmasıdır. Dolgu parametrelerinin değişiminin yanı sıra, bu değerlerde meydana gelen değişimlerin boru üzerinde bulunan dolgu yüksekliği (H) ve boru çapına (D) oranına göre değişimi de incelenmiştir. Bu değişimler Şekil 1.12’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde ele alınan zemin çeşitleri sıra ile %90 ve %95 oranında kompaksiyon uygulanmış SW90 ve SW95, %90 ve %95 oranında kompaksiyon uygulanmış ML90 ve ML95 ve %90 ve %95 oranında kompaksiyon uygulanmış CL90 ve CL95 olarak belirlenmiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere boru üzerindeki dolgu yükünün artması ile düşey kemerlenme faktörünün her bir dolgu türü için sürekli azaldığı, yatay kemerlenme faktörünün ise kumlarda azalırken killerde artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 1.12 Farklı dolgu malzemelerinin kemerlenmeler üzerindeki etkileri: (a) Düşey kemerlenme faktörünün (VAF) H/D oranına göre değişimi (b) Yatay Kemerlenme faktörünün (HAF) H/D oranına göre değişimi (Kang ve Yoo, 2007)

Elde edilen analiz verileri doğrultusunda yapay hendek metodu için korige PVC boruların geometrisi üç parametre ile tanımlanmıştır; genişlik (w), yükseklik (H_s), ve borunun tepesinden yumuşak bölgenin altına kadar olan mesafe (H') (Şekil 1.13a). Şekil 1.13a Spangler (1950) ve Vaslestad (1993) tarafından önerildiği gibi yapay hendek metodu için şematik gösterimdir. Vaslestad vd. (1993) ayrıca Şekil 1.13c'de gösterilen bir geometriyi de incelemişlerdir. Bu tezde kullanılan başlıca model olan Şekil 1.13c'de gösterilen yapay hendek metodu geometrisi, Kang (2007) kapsamında yapılan sayısal analizlerde, borunun yanı boyunca beklenmedik şekilde büyük kesme gerilmelerine yol açtığı tespit edilmiştir.

Kang tarafından yapılan parametrik araştırmalarda, Şekil 1.13b'de gösterilen yumuşak bölge geometrisinin zemin basıncını azaltmada en etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 1.13c'deki yumuşak bölgenin, Şekil 1.13a'da gösterilenden daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1.13 Yapay hendek metodu ve yumuşak bölgenin geometrileri: (a) genel gösterim, (b) nerilen yumuşak bölge geometrisi ve (c) Spangler ve Vaslestad ve diğerleri tarafından denenilen yumuşak bölge geometrisi (Kang ve Yoo, 2007)

Kang ve Chai H. Yoo (2007) yaptıkları çalışmada yumuşak malzemenin boru tabanına kadar genişletilerek kullanıldığı durumda zemin yükünde %85'e varan azalmalar meydana geldiğini ortaya koymuştur. Fakat yapılan çalışmanın literatüre en önemli katkısı, PVC esnek boruların kullanılarak yapay hendek metodu ile inşa edilen boru hatları için yumuşak bölge geometrisinin optimizasyonunun yapılması olmuştur.

Kang'ın (2009) vd. yaptığı bir diğer çalışmada ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gömülü oluklu (korige) yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boruların kısa ve uzun vadeli zemin-yapı etkileŐimleri değerlendirmiştir. Korige HDPE boruların kemerlenme faktörleri, esnemeler ve maksimum boru duvarı gerilmeleri için yapı-zemin etkileŐimleri kapsamında yapılan sayısal analizlerden denklemler üretilmiŐtir. Çalışma sonucunda zemin yüklerinin zamana bağlı malzeme özelliklerinden ve arayüzey koŐullarından önemli ölçüde etkilendiği fakat esnemelerin ve deformasyonların bu faktörlerden fazla etkilenmediği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında Kang tarafından kullanılan korige HDPE borunun kısa ve uzun vadeli malzeme parametreleri Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

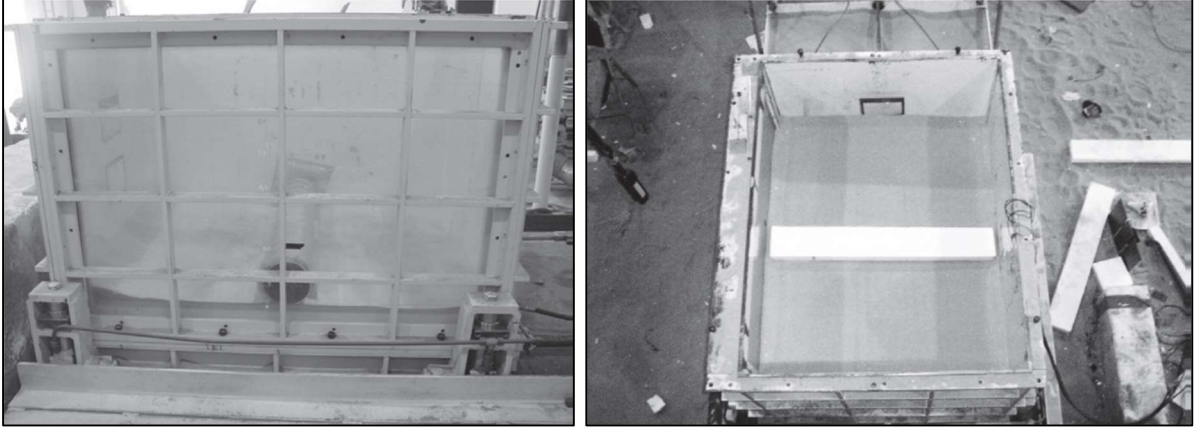
Tablo 1.2 Korige HDPE borunun kısa ve uzun vadeli malzeme parametreleri (Kang, 2009)

Boru Tipi	Anlık		50-Yıllık		100-Yıllık	
	E _{ini} (MPa)	v _{ini}	E ₅₀ (MPa)	v ₅₀	E ₁₀₀ (MPa)	v ₁₀₀
Korige PE Boru (AASHTO M 294)	900	0.35	179	0.45	174	0.46

Bu çalışma ile korige HDPE borular üzerine etkiyen zemin yüklerinin zamana bağlı malzeme özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiği ortaya konulmuştur. Kısa vadeli malzeme özelliklerinden biri olan düşey kemerlenme faktörünün değerlerinin uzun vadeli durumda %54 kadar azaldığı görülmüştür. Bu durumda azalan elastisite modülü ile zemin yüklerinin de azaldığı ve olumsuz gibi görünen bu değer azalışının boru davranışı olumsuz yönden çok fazla etkilemediği anlaşılmıştır.

Zamanla azalan elastisite modülü etkisi ile artan kemerlenme sayesinde zemin basınçların da azalma hesaplanırken, esnemelerin bu elastisite azalmasından çok fazla etkilenmediği görülmüştür. Ayrıca bu çalışma kapsamında belirlenen sonuçların tamamen sayısal analizlere dayanması nedeni ile, bu sonuçların iyi tasarlanmış bir deney programı ile incelenmesi birçok araştırmacı tarafından önerilmektedir.

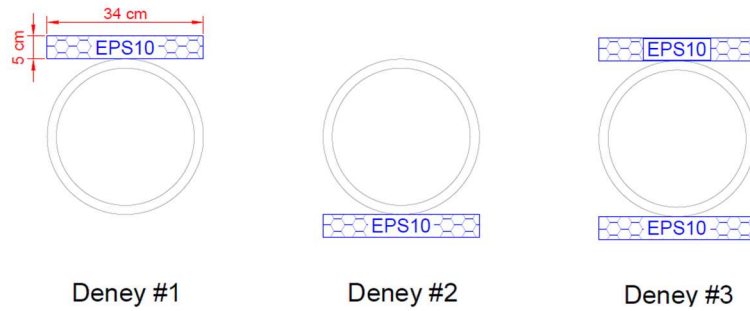
A.F. Witthoef ve H. Kim (2015) tarafından yapılan çalışmada ise gömülü bir çelik boru üzerine yerleştirilmiş genişleşmiş polistiren (EPS) Geofam panellerin etkisi araştırılmış ve bu kapsamda sayısal analiz çalışması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler Kim vd. (2010) tarafından yapılmış bir laboratuvar deneyine ait olmakla birlikte deneyde EPS Geofam malzemenin boru üzerinde farklı genişliklerde ve tekli/ikili katmanlar şeklinde kullanılmıştır (Şekil 1.14). Çalışmada oluşturulan sayısal analizler kalibre edildikten sonra bu kalibre edilmiş model kullanılarak deneysel çalışmada kullanılmayan – EPS panellerin farklı genişlikte ve kalınlıkta olması gibi – farklı durumlar incelenmiştir.



Şekil 1.14 Kim vd. (2010) tarafından yılında yapılan deney

Çalışmada kullanılan EPS Geofom malzemenin yoğunluğu 15 kg/m^3 olup kullanılan deney tankının boyutları $100 \times 140 \times 90 \text{ cm}$ 'dir. Elde edilen sonuçlar ise boru rijitliğinin ve boru şeklinin (yuvarlak veya farklı eğriliklerde) dolgu yükünden aktarılan gerilmeleri doğrudan etkileyeceği yönünde olmuştur.

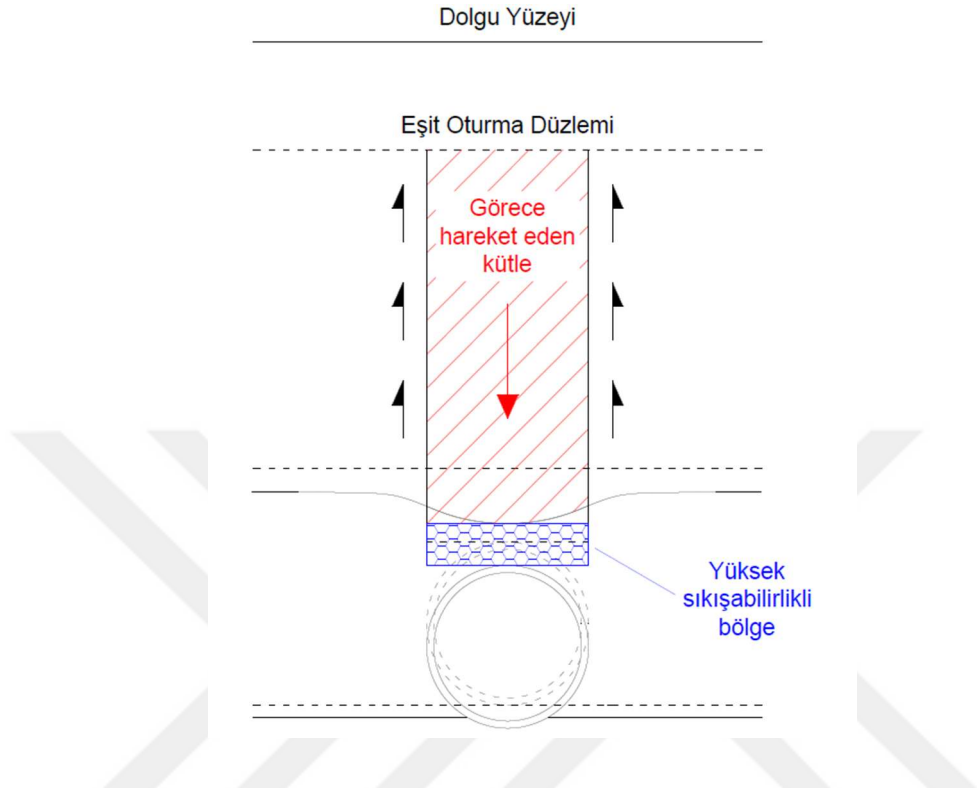
Akınay vd. (2016) yaptıkları çalışmada yapay hendek uygulamasının 1:1 ölçekli deneyler aracılığı ile boru üzerine etkiyen yanal ve düşey zemin gerilmelerinin üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan bu çalışmada yoğunluğu 10 kg/m^3 olan tek çeşit EPS Geofom malzemenin ayrı ayrı olarak borunun üzerinde bulunması, borunun tabanında bulunması ve aynı anda hem üzerinde hem de altında bulunması durumları incelenmiştir. Bahsi geçen bu durumlar Şekil 1.15'te gösterilmiştir.



Şekil 1.15 Deney #1, Deney #2 ve Deney #3'te EPS Geofom panelin yerleştiği konumlar (Akınay vd., 2016)

Yapılan bu deneylerde oluşturulan yapay hendek yöntemi için ilgili şematik gösterim Şekil 1.16'da bahsedilen çalışmadan alınarak paylaşılmıştır. Bu görselde esnek boru ve EPS Geofom malzeme sayesinde görece hareket eden kütle ve kütlelerin etrafındaki sürtünme yüzeyleri belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmada ise Türkiye'de yapay

hendek yönteminin uygulandığı bir boru inşasının mevcut olmadığı bilgisine ulaşılmıştır. Çalışmada kullanılan deney düzeneği bu çalışma kapsamında “Bölüm 2 – Yapı Zemin İlişkisinin Modellenmesi” kısmında detaylıca açıklanmıştır.



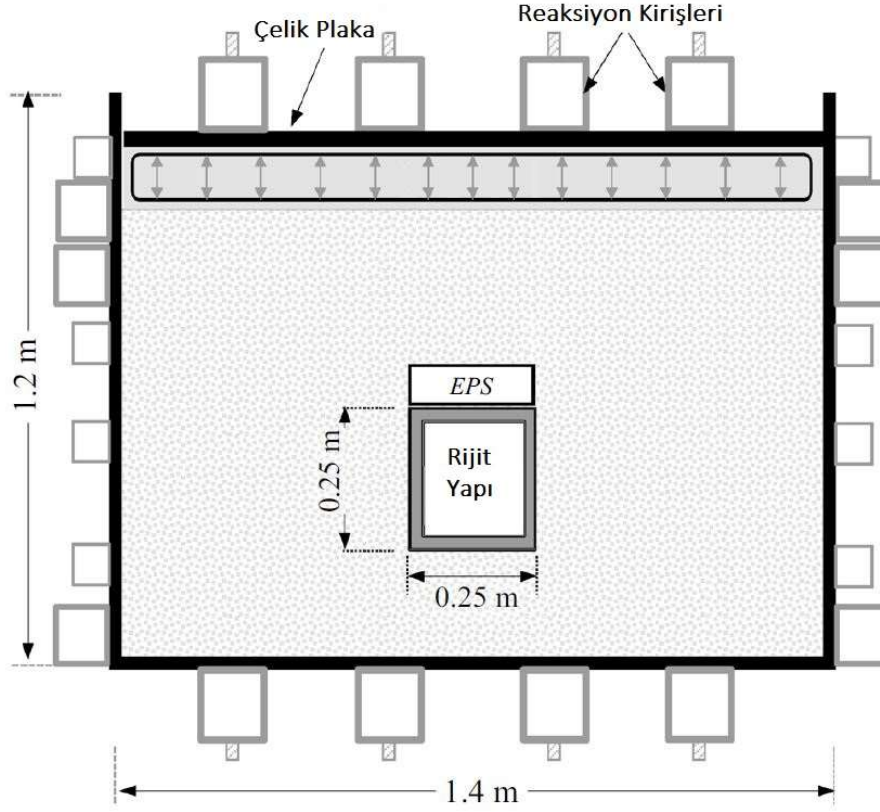
Şekil 1.16 Yapay hendek yöntemi; rijit boru üzerinde hendek koşulunun yapay olarak oluşturulması (Akınay vd., 2016)

Çalışma sonucunda ise boru tacına etkiyen düşey gerilmelerin %76'ya varan oranlarda ve boru tabanına etkiyen düşey gerilmelerin %55'e varan oranlarda azaldığı, boru yan duvarına etkiyen yanal zemin gerilmelerinin ise %56 ile %72 arasında azalma gösterdiği belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada Deney #1 ve Deney #2 durumlarında boru esnemelerinde önemli ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Bu durumlarda yaklaşık 5-6 metre kalınlığında dolgu yükü altında boru esnemelerinin sıfıra yakın olduğu görülmüştür. Deney #3 durumunda ise borunun düşey ekseninde çok fazla uzadığı ve yatay ekseninde çok fazla kısaldığı, bu sebepten ötürü EPS Geofom malzemenin HDPE borunun aynı anda hem üzerinde hem de altında olması durumunda yararlı bir uygulama olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bir başka çalışmada ise M. A. Meguid ve M. G. Hussein (2017), EPS yoğunluğunun rijit bir kare biçimli gömülü yapı üzerinde etkilerini araştırmışlardır. Laboratuvar ortamında oluşturdukları deney düzeneğinde 25 cm x 25 cm'lik bir rijit gömülü menfez yapısını

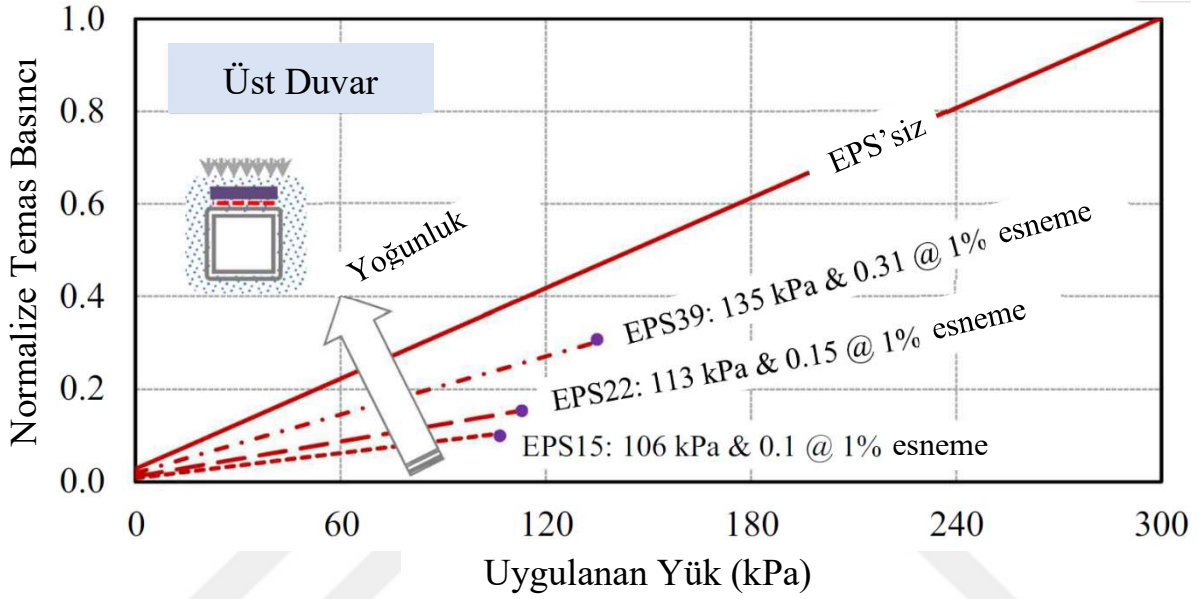
birim hacim ağırlığı yaklaşık 16 kN/m^3 ve içsel sürtünme açısı 47° olan kum-çakıl dolgu malzemesi içerisinde yerleştirmişlerdir. Bu düzenek içerisinde önce EPS Geofom malzeme olmadan referans analizler gerçekleştirilip ardından EPS yoğunluğunun 15 kg/m^3 (EPS15), 22 kg/m^3 (EPS22) ve 39 kg/m^3 (EPS39) olduğu durumlar için deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 1.17’de gösterilmiştir.



Şekil 1.17 Modellenen deneyin şematik olarak gösterimi (Meguid ve Hussein, 2017)

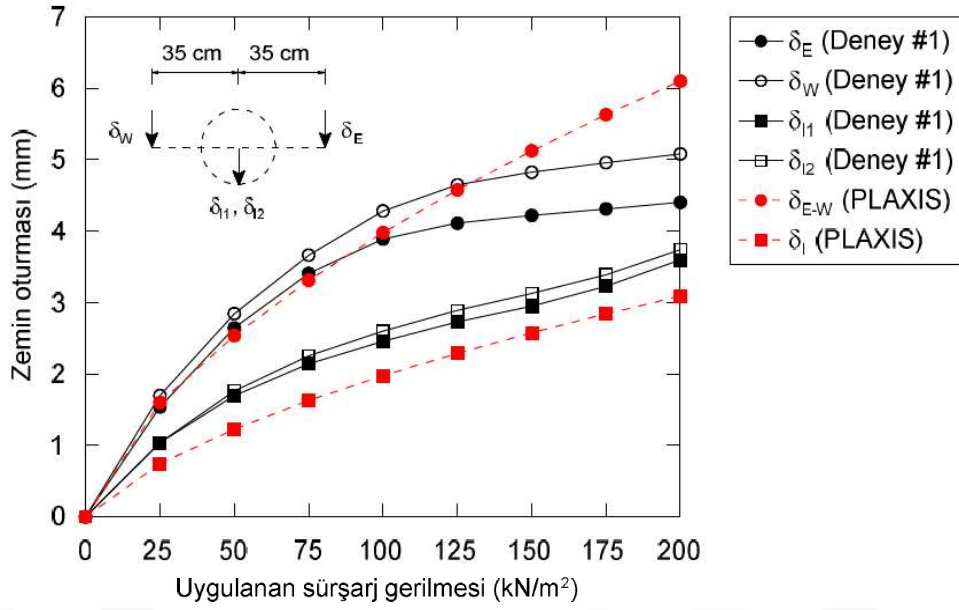
Deneylerin tamamlanmasının ardından deney düzeneği sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak “ABAQUS/Standard, version 6.13” yazılımı ile analiz edilmiştir. Model deney sonuçları dikkate alınarak oluşturulan sayısal modelde, EPS yoğunluğu değişiminin rijit menfez yapısının alt, üst ve yan duvarlarına etkileyen zemin yüklerine etkileri araştırılmıştır. Bu analizlerden biri olan menfez üst duvarına etkileyen temas basıncının normalize değerlerinin uygulanan gerilme ve EPS yoğunluğu ile karşılaştırılması Şekil 1.18’de gösterilmiştir. Meguid ve Hussein (2017) tarafından yapılan bu araştırmanın sonucunda, EPS Geofom malzeme yoğunluğunu değişiminin rijit menfez yapıların üzerine etkileyen gerilmeleri önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda yapılan sayısal analiz sonuçlarına göre yoğunluğu 14.4 kg/m^3 olan EPS15 isimli malzeme kullanımının menfezin üst duvarına etkileyen temas basıncını %70’e kadar azalttığı tespit

edilmiştir. Ayrıca gömülü rijit menfez yapısı üzerinde yoğunluğu 22 kg/m³ ve 39 kg/m³ olan EPS Geofom malzemeler kullanıldığında ise gerilme azalmasının sırası ile %60 ve %30 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Yapı tabanındaki gerilmelerde ise EPS15, EPS22 ve EPS39 kullanıldığı takdirde sırası ile %47, %40 ve %23'lük azalmalar olduğu belirtilmiştir.



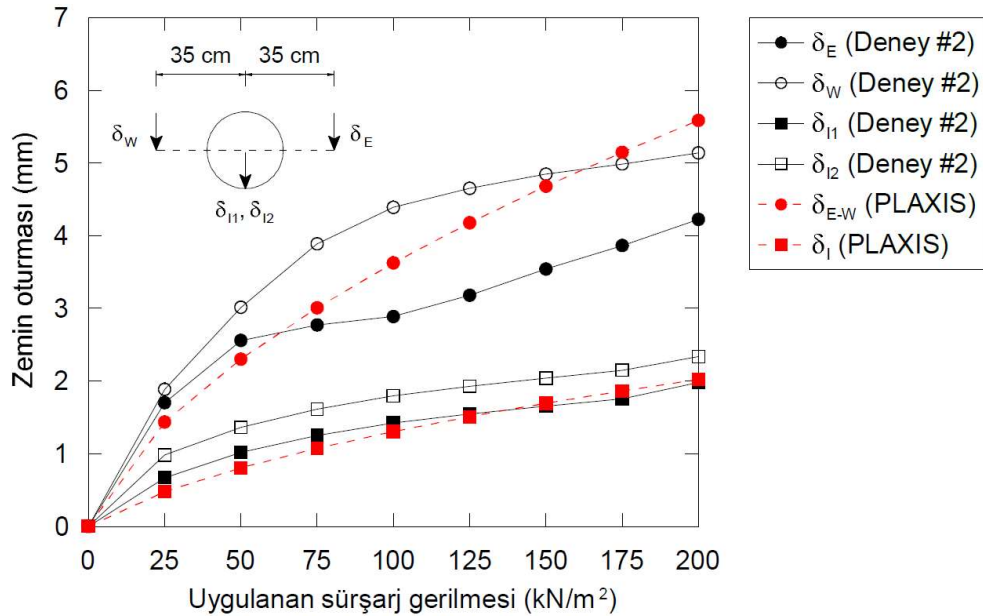
Şekil 1.18 Menfez üst duvarına etkiyen normalize temas basıncının uygulanan yük ve EPS yoğunluğu ile karşılaştırılması (Meguid ve Hussein, 2017)

Kılıç ve Akınay (2017) tarafından yapılan başka bir çalışmada gömülü yüksek yoğunluklu polietilen (HPDE) boruların davranışı deneysel ve sayısal analizler ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında model deney düzeneği Plaxis 2D programı kullanılarak nümerik olarak modellenmiştir. Modelleme ardından yapılan kalibrasyon sonucunda deney sonuçlarının ve sayısal analiz sonuçlarının birbiri ile ne ölçüde uyum sağladığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan borusuz deneye ait olan veriler Şekil 1.19'da gösterilmiştir. Bu grafikte zemin oturması ve uygulanan sürşarj gerilmesine karşılık alınan oturma değerleri sayısal analizden hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde, oluşturulan sayısal model ile deneysel olarak ortaya çıkan zemin davranışının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.



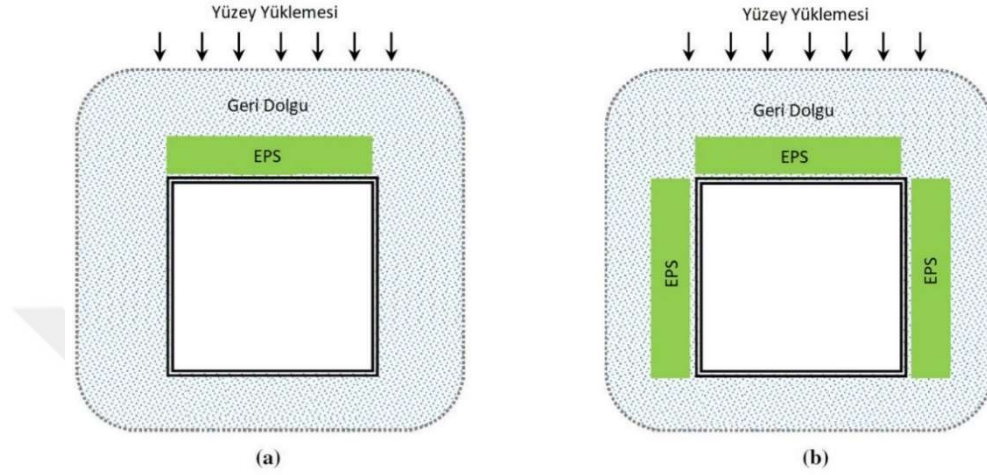
Şekil 1.19 Deneysel verilerin ve nümerik analizlerin zemin oturması ve uygulanan sürşarj yükü değerleri üzerinden borusuz deney için karşılaştırılması (Kılıç ve Akınay, 2017)

Bu değerlendirmenin ardından laboratuvar testinde Ø300 mm çaplı HDPE boru kullanarak deneyler yapılmış ve aynı şekilde Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 1.20). Boru kullanılarak yapılan deney sonucunda elde edilen oturma değerlerinin borusuz deneye nazaran birbirine daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 1.20 Deneysel verilerin ve analizlerdeki zemin oturması ve uygulanan sürşarj yükü değerleri üzerinden borusuz deney için karşılaştırılması (Kılıç ve Akınay, 2017)

M. A. Meguid vd. (2017) daha önce üzerinde çalıştıkları deney sisteminde zemin içerisindeki rijit yapının üzerinde EPS bulunması durumunun yanı sıra “U şeklinde (U – shape)”, bir diğer deyişle ise yapının üzerine, sol duvarına ve sağ duvarına EPS yerleştirip bir seri deney gerçekleştirmişlerdir. Bu iki farklı geometriye sahip EPS malzemenin kullanıldığı konfigürasyonlar Şekil 1.21 ile gösterilmiştir.

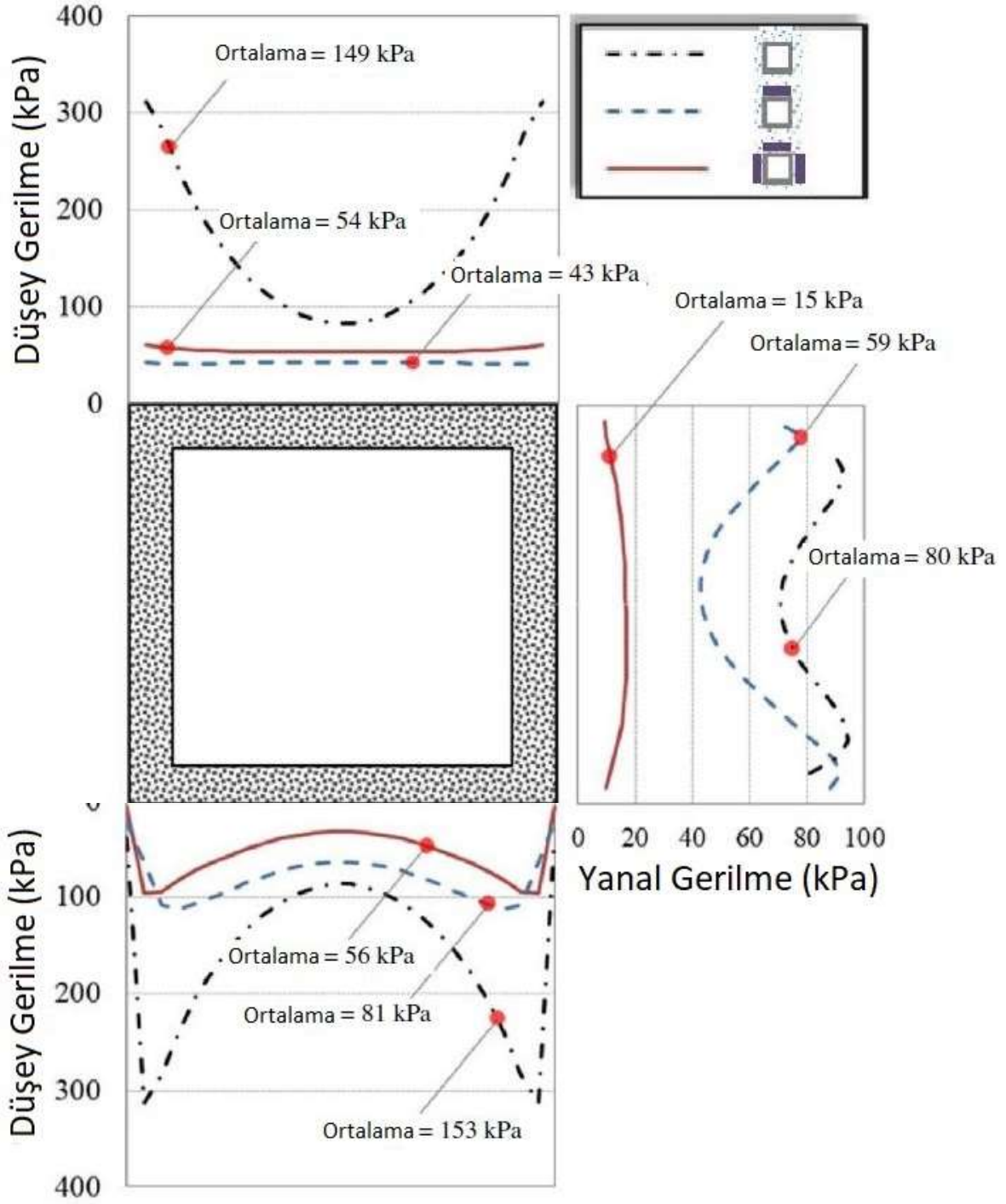


Şekil 1.21 Yapay hendek metodu: (a) Gömülü yapı üzerinde EPS Geofom malzeme kullanımı, (b) “U şeklinde” EPS Geofom malzeme kullanımı (Meguid vd. 2017)

Yapılan deneylerin ardından deney düzeneği 2 boyutlu olarak “ABAQUS” yazılımı ile modellenmiş ve kalibrasyon yapılmıştır. Sayısal modelde EPS Geofom malzemenin lineer olmayan elasto – plastik davranış sergilediği varsayılmıştır. Ayrıca nümerik analizlerde yoğunluğu 38.4 kg/m^3 (EPS39), 21.6 kg/m^3 (EP22) ve 14.4 kg/m^3 (EPS15) olan üç farklı EPS Geofom malzeme kullanılmıştır.

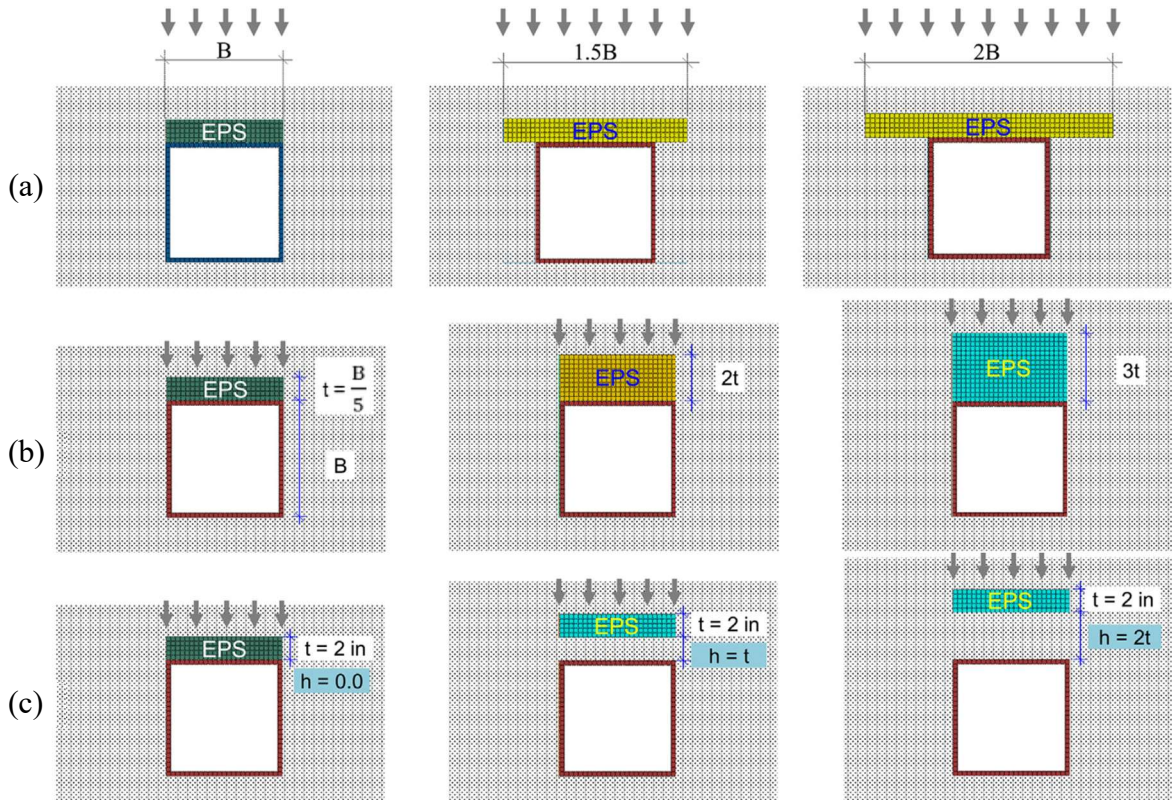
Meguid vd. (2017) elde ettikleri sonuçlara göre “U – şeklinde” EPS15 malzeme kullanımının gömülü yapının üzerine gelen yükleri %64 kadar azalttığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde yan duvarlara gelen gerilmeleri 60 kPa değerinden 15 kPa değerine kadar düşmüştür. Taban gerilmeleri ise EPS malzeme kullanılmadığı durumda 153 kPa değerinden ortalama 81 kPa’a, “U – şeklinde” EPS malzeme kullanılması durumunda ise ortalama 56 kPa’a kadar düşmüştür. Verilen bu değerler Şekil 1.22 ile gösterilmiştir.

Yapılan bu çalışmadan çıkarılan bir başka sonuç ise düşey ve yanal gerilmelerin EPS malzeme yoğunluğunun artması ile doğru orantı gösterdiği olarak not edilmiştir. Bu sebepten ötürü verilen sonuçlar EPS yoğunluğu 14.4 kg/m^3 olan EPS15 Geofom malzemeye göre incelenmiştir.



Şekil 1.22 EPS15 Geofoam malzeme ile yapılan deneyde gömülü yapı üzerinde ve yan duvarında elde edilen düşey ve yatay gerilmelerin değişimi (Meguid vd., 2017)

Meguid vd. (2017) yaptıkları bu çalışmayı geliştirerek EPS Geofom malzemenin farklı yüksekliklerde, farklı genişliklerde, farklı geometrilerde ve rijit yapı ile arasında mesafe olması durumları için tekrar incelemiştir. Bu çalışmada Şekil 1.23'de belirtilen model üzerinde EPS Geofom bloğun genişliğinin rijit yapı genişliği kadar, rijit yapının genişliğinin 1.5 katı ve 2 katı olması durumları, EPS yüksekliğinin 2 katı olması ve 3 katı olması durumları ve ilk durumda mevcut olan "t" yüksekliğine sahip EPS bloğun rijit yapının üzerine yapışık olması, rijit yapı üzerinden t kadar ve 2t kadar yüksekte olması durumları incelenmiştir. Son olarak ise yapı üzerinde bulunan EPS bloğun sol ve sağ kenarlara konulduğu takdirde gerilmelerde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Belirtilen bu geometrik koşullar Şekil 1.23 ile gösterilmiştir.

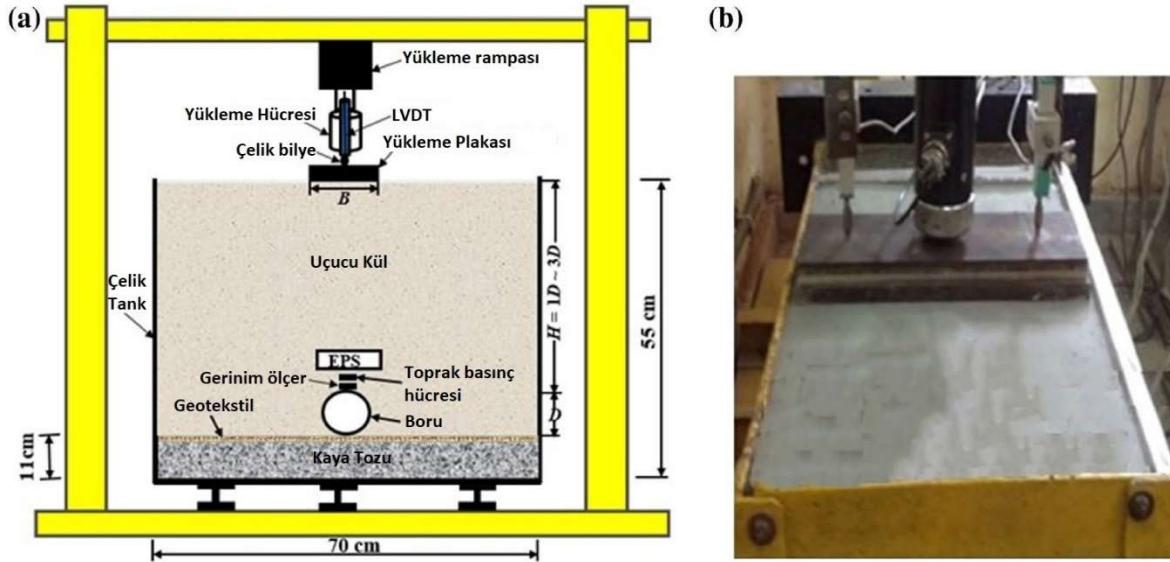


Şekil 1.23 Gömülü rijit yapı ile birlikte kullanılan EPS Geofom bloklarının geometrik koşullarının şematik olarak gösterilmesi: (a) EPS genişliği değişimi, (b) EPS yüksekliği değişimi, (c) EPS'nin yapı üzerindeki konumları (Meguid, 2017)

Yapılan parametrik çalışmaların sonucunda EPS genişliği artışının yapı üzerindeki gerilmeleri %12 kadar arttırdığı fakat yapının altındaki ve yanlarındaki gerilmeleri %10 kadar azalttığı ortaya konmuştur. EPS yüksekliği arttığında ise yapı üzerindeki gerilmeler %18 kadar azalmakta fakat yapının altında ve yanlarında kayda değer değişimler olmamaktadır. Bir diğer nokta olan EPS Geofom bloğun konumunun değişiminde ise

yanlarda bir fark gözlemlenmezken yapının üzerinde ve altında %10'luk bir gerilme değişiminden bahsedilmektedir. Son olarak EPS malzemenin yapının iki yan duvarına yerleştirilmesi ile yan gerilmelerde %70'e varan azalmalar meydana geldiği belirlenmiştir.

Y.Z. Beju ve J.N Mandal (2017) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise test ekipmanı içerisinde bulunan uçucu kül içerisinde kaya tozuna oturmuş bir HDPE borunun üzerine yerleştirilmiş EPS Geofoam malzemenin davranışı araştırılmıştır. Aynı zamanda geotekstil malzemeleri deney kapsamında incelenmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra şekil 1.24'te gösterilen deney düzeneği sayısal olarak PLAXIS 3D sonlu eleman analizi programı ile modellenmiştir.



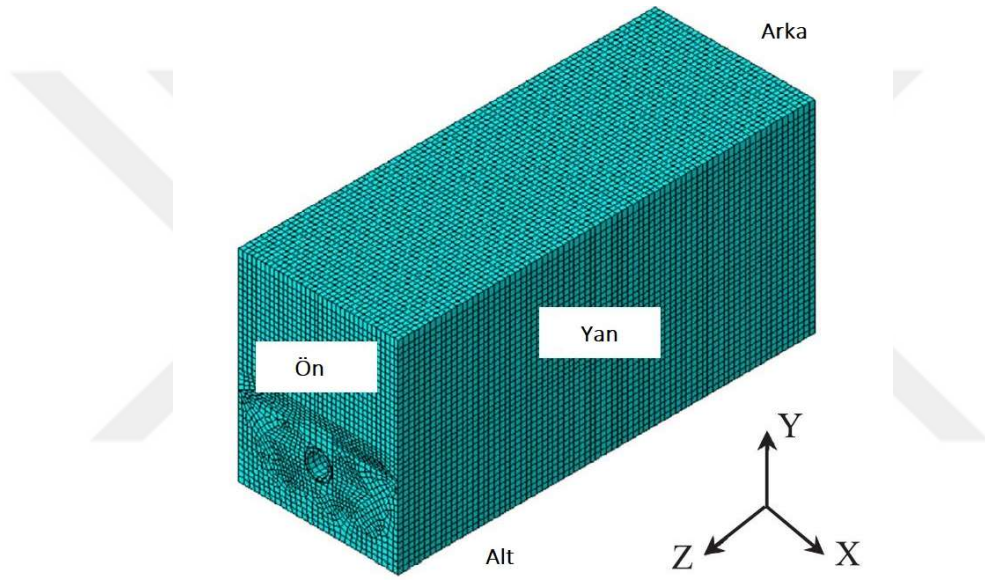
Şekil 1.24 Deney düzeneğine ait gösterimler: (a) Şematik olarak deney düzeneği, (b) Deney düzeneğinin bir fotoğrafı (Beju ve Mandal, 2017)

Deneylerin sonucunda çift katman olarak EPS kullanımının gerilmelerde %63.5, kadar geotekstil kullanımı ile birlikte %73 kadar azalma gözlemlenmiştir. Ardından PLAXIS 3D sonlu eleman analizi programı ile yapılan analizlerde ortaya çıkan en uygun sonuçların EPS Geofoam malzemenin boru tacı ile arasındaki mesafenin borunun çapının %20'sinden küçük olduğu durumlarda meydana geldiği belirtilmiştir.

Kang (2019) tarafından yapılan en son çalışmada ise yapay hendek yöntemi uygulanmış gömülü beton borular ile yumuşak malzeme arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi yapan bir yazılım ile yapılmıştır. Bu çalışmada modellenmiş 3B model Şekil 1.25'te gösterilmiştir. Bu 3 boyutlu model sayesinde çalışma

kapsamında boru çeperinin birçok noktasındaki temas basıncı deneylerden elde edilen değerlere çok daha yakın bir şekilde tespit edilebilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen 5 farklı durumun boru davranışı üzerindeki etkileri sırası ile aşağıda belirtilmiştir:

- i. Artan dolgu yükleri
- ii. Zemin özelliklerinin değişimi
- iii. Yumuşak malzeme özelliklerinin değişimi
- iv. Yumuşak malzeme bölgesinde meydana gelen süreksizlikler
- v. Yan dolguda meydana gelen süreksizlikler

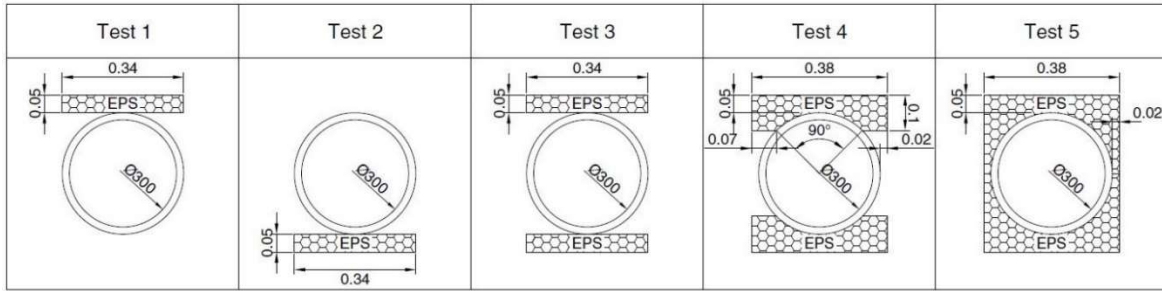


Şekil 1.25 Üç boyutlu sonlu eleman modelinin izometrik görünümü (Kang,2009)

Çalışmanın sonuçları arasında başlıca olarak yumuşak malzeme kullanımının boru üzerine gelen gerilmeleri azaltması gözlemlenmiştir. Bu gözlemler 2 boyutlu modellerden farklı olarak üçüncü bir boyut olan derinlik boyunca meydana gelen farklılıklara dayanmaktadır. Bu boyutta meydana gelen değişimler incelenerek etkileri çalışma kapsamında paylaşılmıştır.

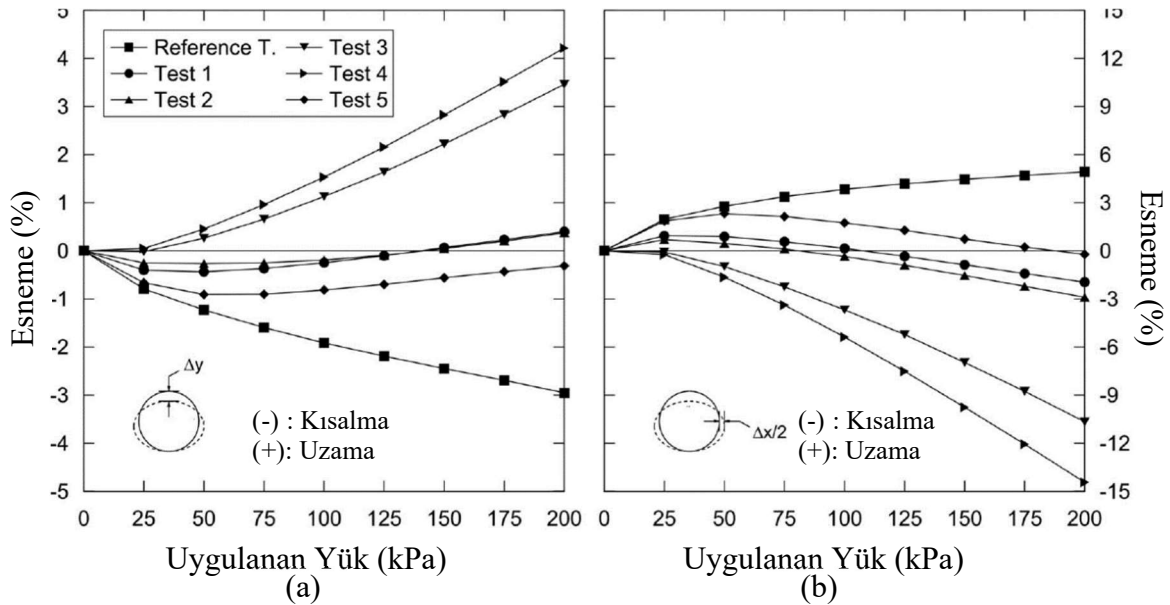
Bir diğer sonuç olarak yapay hendek metodu ile yapılan bir yer altı yapısının zemin parametrelerinden oldukça fazla etkilendiği ve bu şekilde inşa edilen yer altı yapılarının oldukça iyi inşa edilmesinin önemi belirtilmiştir. Son olarak yan dolguların kompaksiyon seviyelerinin yapay hendek metodunda oldukça önemli olduğu paylaşılmıştır.

Kılıç ve Akınay (2019) tarafından yapılan çalışmada HDPE boru ile birlikte EPS Gefoam malzeme kullanımının (Şekil 1.26) boru davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Laboratuvarda yapılan 5 farklı geometriye sahip EPS Gefoam malzeme ile HDPE borunun birlikte davranışı incelenmiştir. Bu 5 farklı geometrik koşul Şekil 1.26'te belirtilmiştir. Belirtilen bu geometrik durumların her biri için borunun üzerinde, altında ve yan duvarlarındaki zemin gerilmeleri; boru tabanındaki, boru tacındaki ve zemin içerisindeki oturma değerleri; son olarak ise borunun düşeyde ve yatayda yaptığı esneme değerleri elde edilip karşılaştırılmıştır.



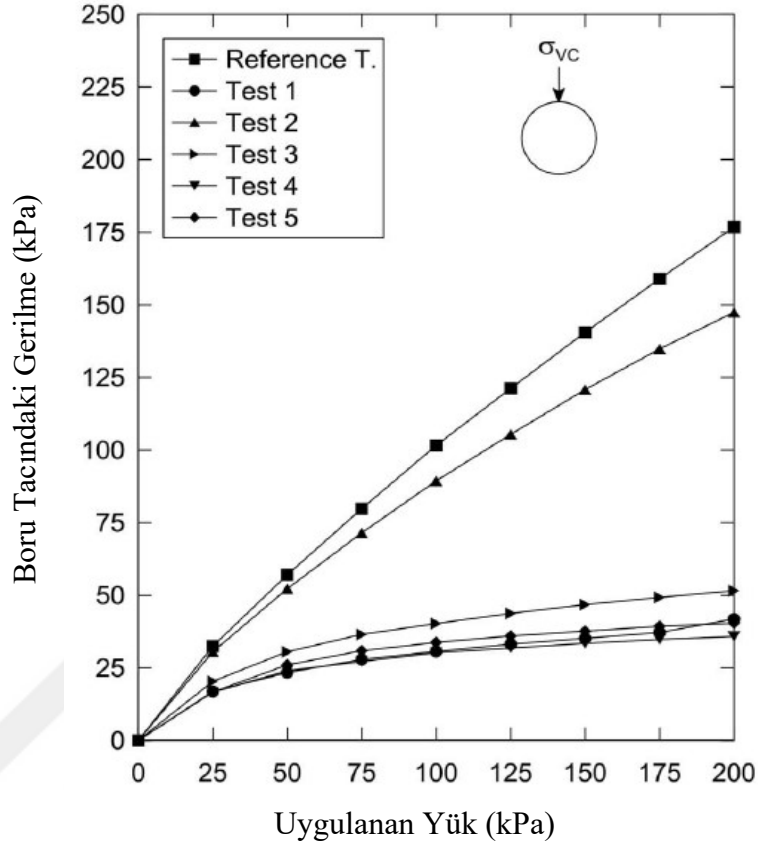
Şekil 1.26 Kılıç ve Akınay'ın çalışmasında kullanılan deney geometrileri. Boru çapları milimetre, diğer ölçüler metre cinsinden verilmiştir. (Kılıç ve Akınay, 2019)

Yalnızca 10 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS Gefoam malzeme kullanıldığında düşey ve yatay esnemelerin sırası ile %87 ve %60 oranında azaltılabildiği (Şekil 1.27) belirlenmiştir.



Şekil 1.27 Boruda meydana gelen esnemelerin uygulanan yük ile ilişkisi: (a) Düşey esneme değerleri, (b) Yatay esneme değerleri (Kılıç ve Akınay, 2019)

Şekil 1.26'da gösterilen geometriler kullanılarak yapılan deneylerde, boru üzerindeki düşey gerilmelerin azaldığı (Şekil 1.28) görülmüştür. Yalnızca EPS Geofoam malzeme boru tabanında olduğunda taç kısmındaki gerilme referans deneye yakın çıkmıştır.



Şekil 1.28 Boru tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerinin uygulanan yük ile ilişkisi (Kılıç ve Akınay, 2019)

Çalışmada 5 farklı EPS geometrisinin laboratuvar ortamında gerçek ölçekli olarak test edilmesinin sonucu olarak 200 kPa'a varan yük altındaki bir borunun üzerine gelen düşey zemin gerilmelerin boru tacına EPS Geofoam malzeme yerleştirilmesi ile %70 oranında azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde, boru çapının 1/6'sı kadarlık bir yükseklikte ve boru çapı kadar genişlikte bir EPS Geofoam malzeme kullanılmıştır. Ayrıca bu değerlere sahip EPS Geofoam malzeme kullanıldığında borudaki düşey ve yatay esnemelerin sırası ile %87 ve %60 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amaçları aşağıda gibi sıralanmıştır:

1. Genellikle HDPE borular yüksek dolgu yükleri altında aşırı şekil değişimi gösterdiği için kullanılmamaktadır. HDPE boru ile birlikte sıkışabilir malzeme olarak EPS Geofom kullanılması durumunda, kemerlenme etkisinden faydalanıp boru üzerine gelen zemin gerilmeler azaltılarak borunun deforme olmadan ve formunu kaybetmeden hizmet ömrü boyunca performansını koruyabildiğinin gösterilmesi
2. Laboratuvarında yapılan gerçek ölçekli deneyler dikkate alınarak oluşturulan sayısal modelin kalibrasyonundan sonra, boru rijitliği, boru çapı, EPS yoğunluğu, EPS geometrisi, zemin özellikleri gibi değişkenlerin HDPE boru davranışına olan etkilerini incelemek
3. Yüksek dolgu yüküne maruz kalacak uygulamalarda HDPE boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanımının, yüksek maliyetli beton, betonarme ve çelik borular yerine alternatif olarak kullanılabilceğini değerlendirmek
4. HDPE boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanılması durumunda, HDPE boru rijitliğinin azaltılmasının ekonomik olarak faydalarını incelemek

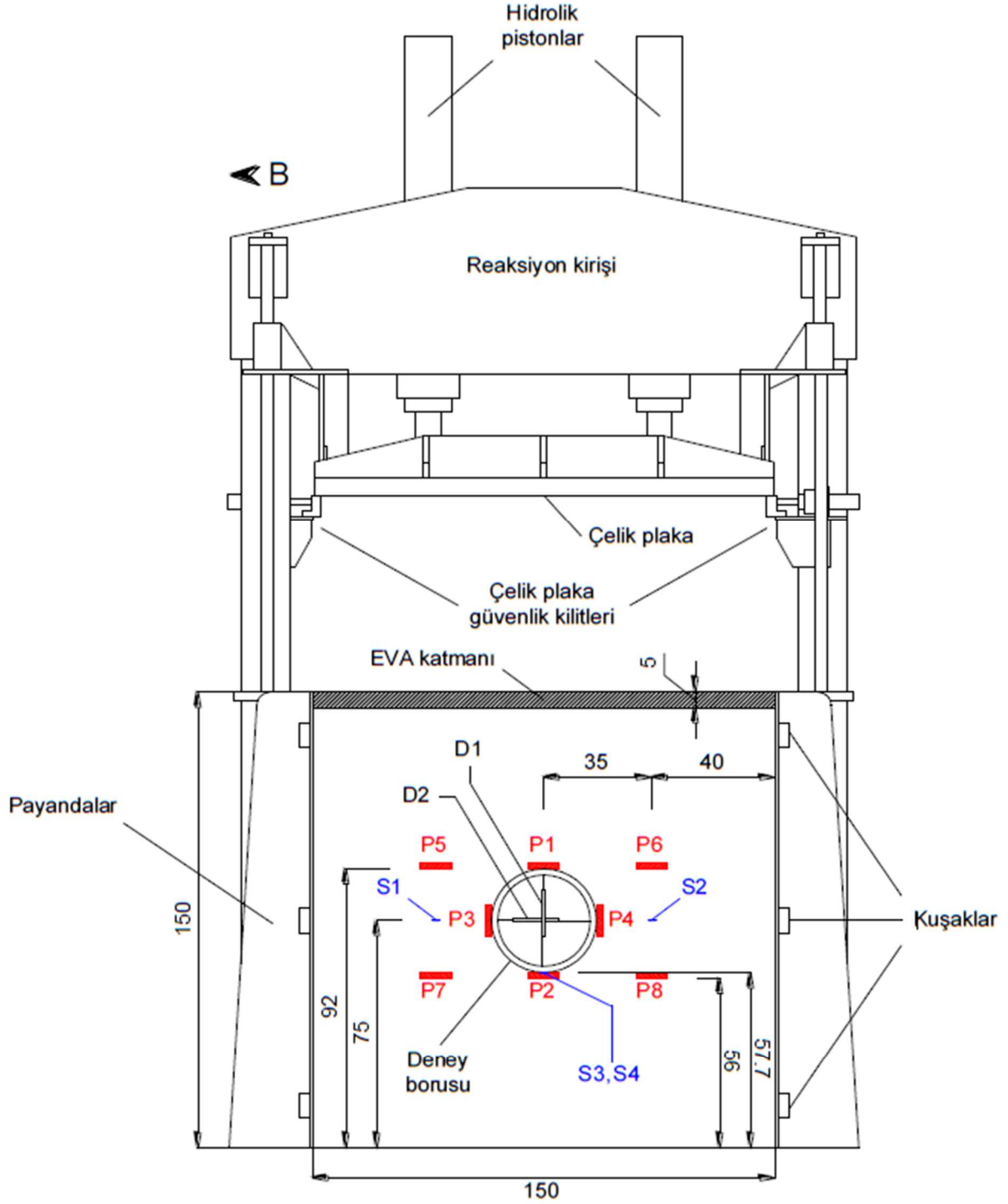
1.3 Hipotez

Yapay hendek yöntemi ile inşa edilen bir boru hattında, sıkışabilir malzeme kullanımı ile kemerlenme oranı arttırılarak borunun üzerine etkiyen düşey zemin yükleri bir miktar azaltılabilir. HDPE boru ile birlikte EPS Geofom malzemenin kullanılması sonucu düşey zemin gerilmelerinin yanı sıra yatay zemin gerilmeleri de azaltılabilir. Böylece, yüksek dolgu gerilmelerine maruz kalacak uygulamalarda, HDPE boru hizmet ömrü boyunca hasar görmeden formunu koruyabilecektir. HDPE boru üzerine aktarılan gerilmelerin azalması sonucu olarak HDPE borunun rijitliği azaltılabilir. EPS Geofom malzeme kullanıldığında HDPE borunun rijitliği azaltılarak, rijitliği yüksek bir borunun performans limitlerine ulaşılabilir. Bu durumun ekonomik olarak oldukça fayda sağlayacağı öngörülmektedir. Böylece, yüksek dolgu yükleri altında kullanılmakta olan beton veya çelik borular yerine daha ekonomik, taşınması kolay ve montaj ile bakım açısından daha avantajlı olan HDPE boruların kullanılabilceği düşünülmüştür.

2.1 Deney Hakkında Bilgiler

Gömülü esnek boru davranışını incelemek için Yıldız Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN Laboratuvarı'nda kurulan deney sisteminde Akınay (2017) kapsamında gerçekleştirilen gerçek ölçekli deneyler bu çalışmanın birinci bölümünün temelini oluşturmaktadır. Deney sisteminin ölçekli gösterimi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de sunulmuştur. Deneyler sırasında boru etrafına yerleştiren P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 ve P8 gerilme ölçerleri ile gerilmeler, boru tabanında ve boru simetri ekseninde sırasıyla S1, S2, S3 ve S4 oturma ölçerleri ile oturmalar ve boru içerisinde D1 ve D2 potansiyometreleri ile boru esnemeleri ölçülmüştür. Deneylerde iç çapı 300 mm olan HDPE korige bir boru kullanılmıştır. EPS Geofom malzeme ile yapılan laboratuvar deneyleri arasından yalnızca Şekil 2.3'te gösterilen konfigürasyonlar ele alınmıştır. Öncelikle Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterildiği gibi yalnızca borunun yer aldığı deney yapılmış ve bu deney "Referans Deney" olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.3'te gösterilen diğer konfigürasyonlarda EPS boru üzerine yerleştirilmiş (Konfigürasyon #1) ve borunun çepeçevre EPS malzeme ile sarılması (Konfigürasyon #2) durumlarında kullanılmıştır.

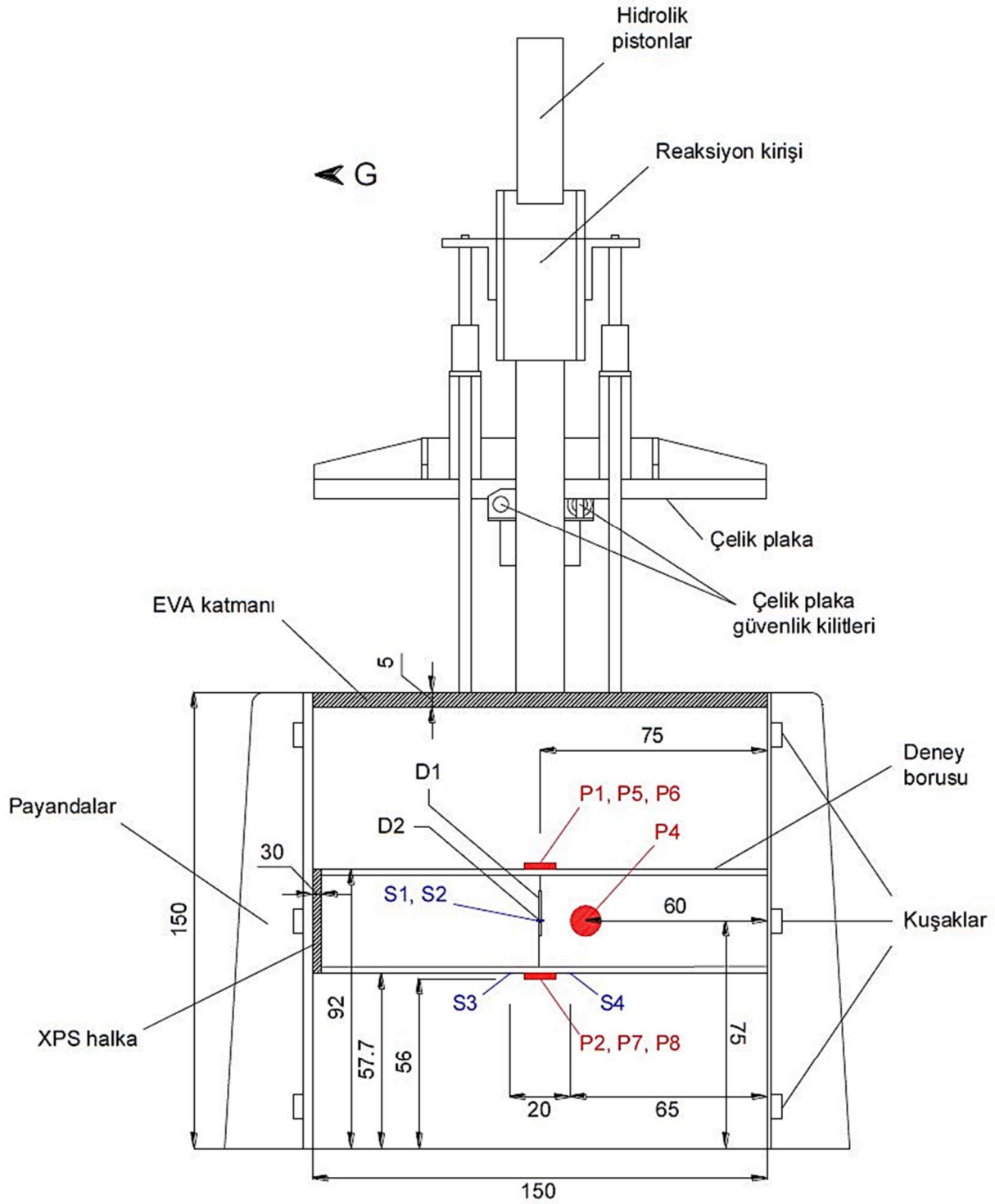
EPS Geofom malzeme ile yapılan laboratuvar deneylerinde malzeme yoğunluğu $\rho_{EPS} = 10 \text{ kg/m}^3$ ve $\rho_{EPS} = 15 \text{ kg/m}^3$ olarak kullanılmıştır. Bu sayede EPS yoğunluğunun deney ortamında HDPE boru ve zemin ilişkisi açısından incelenmesi gerçekleştirilmiştir.



Notasyon:

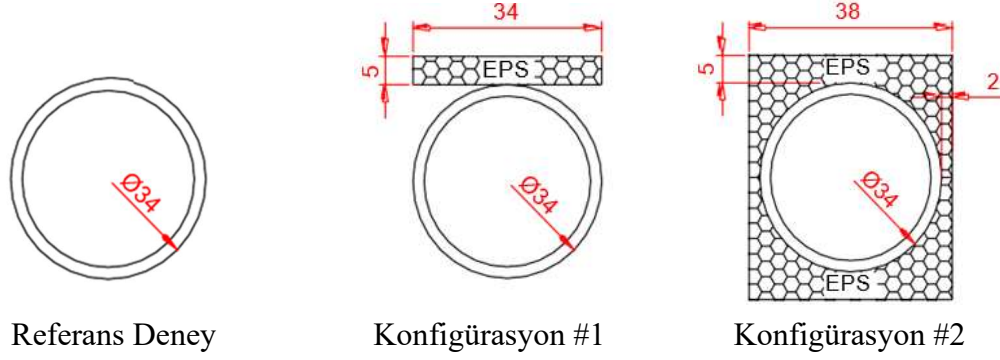
- D: Potansiyometrik yer değiştirme sensörü
- P: Toprak basıncı hücresi
- S: Oturma plakası

Şekil 2.1 Deney düzeneğinin cm ile ölçülandırılmış şematığı ve Referans deney için enstrumantasyon planı: Doğu-Batı doğrultusu (Aknay, 2017)



Notasyon:
D: Potansiyometrik yer değiştirme sensörü
P: Toprak basıncı hücresi
S: Oturma plakası

şekil 2.2 Deney düzeneğinin cm ile ölçülandırılmış şematığı ve Referans deney için enstrumantasyon planı: Kuzey-Güney doğrultusu (Akınay, 2017)



Şekil 2.3 Ø300 mm iç HDPE esnek boru ve EPS Geofom malzemenin yerleşim durumları (Akınay, 2017)

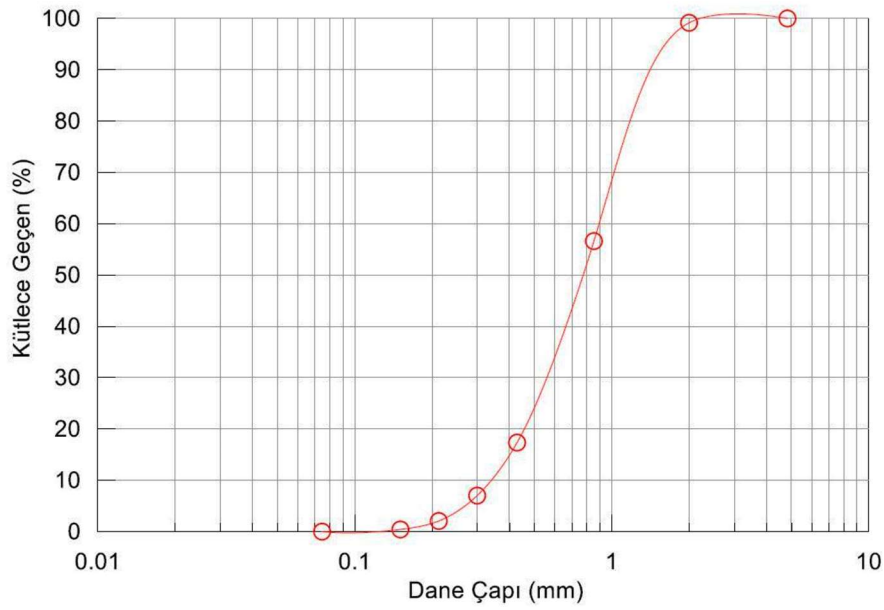
Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilen deney tankı 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m ölçülerinde olup üç duvarı çelik ve bir duvarı saydam pleksiglas malzemedenden oluşmaktadır. Kum tankının üzerinde 50 ton yükleme kapasitesine sahip iki adet hidrolik piston bulunmaktadır. Bu pistonlar bir plaka aracılığı ile yükü zemine iletebilmektedir.

Deney borusu HDPE hammadden üretilmiş bir astarlı - kıvrımlı duvarlı (lined - corrugated wall) borudur ve deney borusunun anma çapı 300 mm’dir. Borunun halka rijitliği 8 kN/m²’dir (SN8 veya SR32, Tip 5). Deney borusunun gerçek halka rijitliği TS EN ISO 9969 standardına uyularak yapılan yükleme deneyi sonucunda Akınay (2017)’de 8.8 kN/m² olarak belirlenmiştir. Borunun geometrik özellikleri ise kesilip bir tarayıcı tarafından dijital ortama aktarılmasının ardından AutoCad çizim programı ile belirlenmiştir. Deney borusu toplamda 147 cm uzunluğunda olup, ölçüm aygıtlarının boru içerisinde orta uzunluktaki kesite yerleştirilebilmesi için her biri 49 cm uzunluğunda üç parçadan oluşmuştur. Ölçüm aygıtlarının yerleştirilmesinin ardından parçalar alın kaynağı ile birleştirilmiştir.

Deneyde kullanılan kum zemin kötü derecelenmiş temiz (SP) kumdur. Deney zemini indeks özellikleri ve dane çapı dağılımı sırasıyla Tablo 2.1 ve Şekil 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.1 Deney zemini indeks özellikleri (Akınay, 2017)

USCS sembolü	SP
En büyük boşluk oranı (e_{max})	0.81
En küçük boşluk oranı (e_{min})	0.50
Özgül ağırlık (G_s)	2.65
Ortalama dane çapı (D_{50}) (mm)	0.76
Efektif dane çapı (D_{10}) (mm)	0.35
Uniformluk katsayısı (C_u)	2.57
Derecelenme katsayısı (C_c)	0.92



Şekil 2.4 Deney zemini dane çapı dağılım eğrisi (Akınay, 2017)

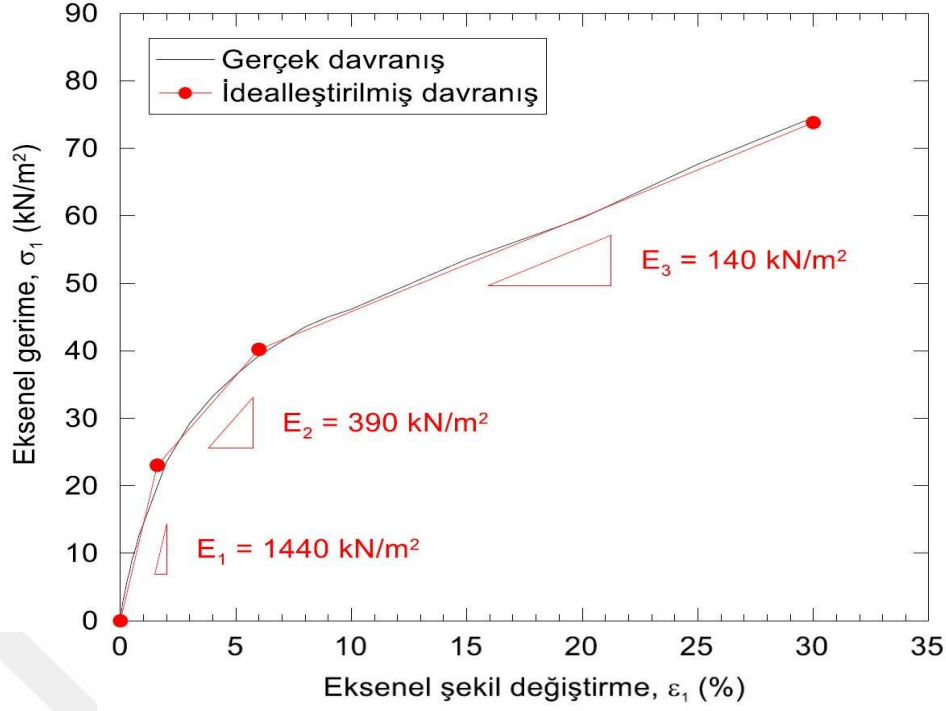
Akınay tarafından EPS Geofom malzeme parametrelerini belirlemek için 5 cm yükseklikli ve 5 cm çaplı numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan EPS malzemeye ait özellikler Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2 Deneylerde kullanılan EPS malzeme özellikleri (Akınay, 2017)

Özellik	EPS10 ($\rho_{EPS} = 10 \text{ kg/m}^3$)	EPS15 ($\rho_{EPS} = 15 \text{ kg/m}^3$)
Boy, H_{EPS} (mm):	48.85	48.89
Çap, D_{EPS} (mm):	50.00	50.40
Kesit alanı, A_{EPS} (cm^2):	19.64	19.95
Hacim, V_{EPS} (cm^3):	95.92	97.54
Ağırlık, W_{EPS} (gf):	0.98	1.44
Yoğunluk, ρ_{EPS} (kg/m^3)	10.2	14.8

EPS numuneleri üzerinde yapılan deneyler ile eksenel şekil değiştirme - eksenel gerilme ilişkileri belirlenmeye çalışılmıştır. $\rho_{EPS} = 10 \text{ kg/m}^3$ ve $\rho_{EPS} = 15 \text{ kg/m}^3$ yoğunluklarda olan bu numunelere ait grafikler çizilmiş ve elastisite modülleri belirlenmiştir. Örnek olarak Şekil 2.5'teki grafikte EPS malzemenin doğrusal parçalara ayrıldığı ve bu parçalar için ayrı elastisite modülleri hesaplandığı ve idealize edildiği görülebilmektedir.

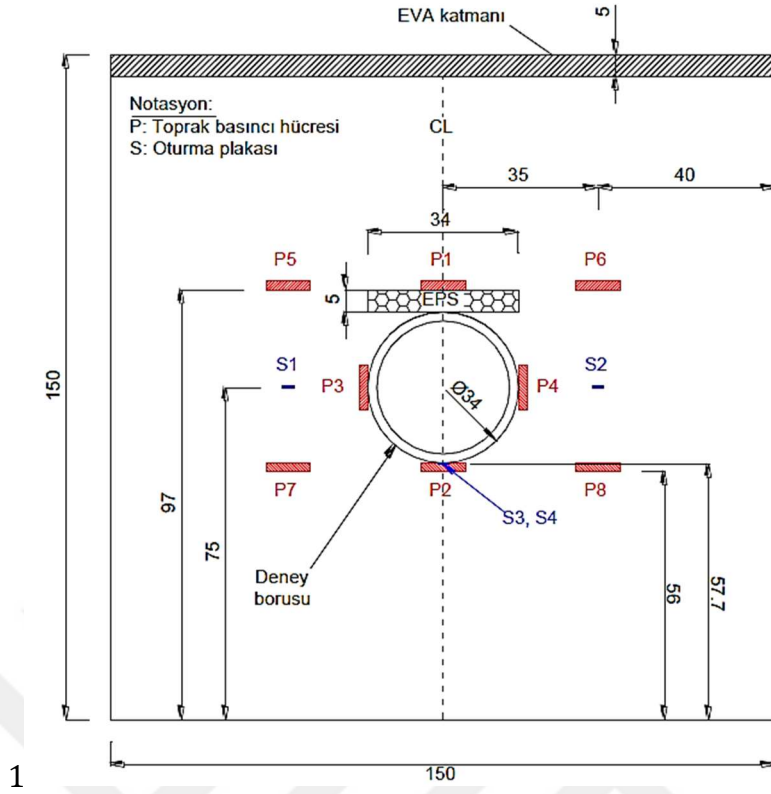
Bu idealleştirme yapılırken orijin ile %1'lik bölüme denk gelen şekil değiştirmeler için $E_1 = 1440 \text{ kN/m}^2$, %2 ila %6 arasındaki eksenel şekil değiştirmeler için $E_2 = 390 \text{ kN/m}^2$ ve son olarak %6 ila %30 arasındaki eksenel şekil değiştirmeler için elastisite modülü $E_3 = 140 \text{ kN/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Bu şekilde Plaxis 2D programında kullanılan $\rho_{EPS} = 10 \text{ kg/m}^3$ ve $\rho_{EPS} = 15 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip malzemelerin elastisite modülleri ve Poisson oranları Akınay (2017) tarafından yapılan deneylerden belirlenmiştir.



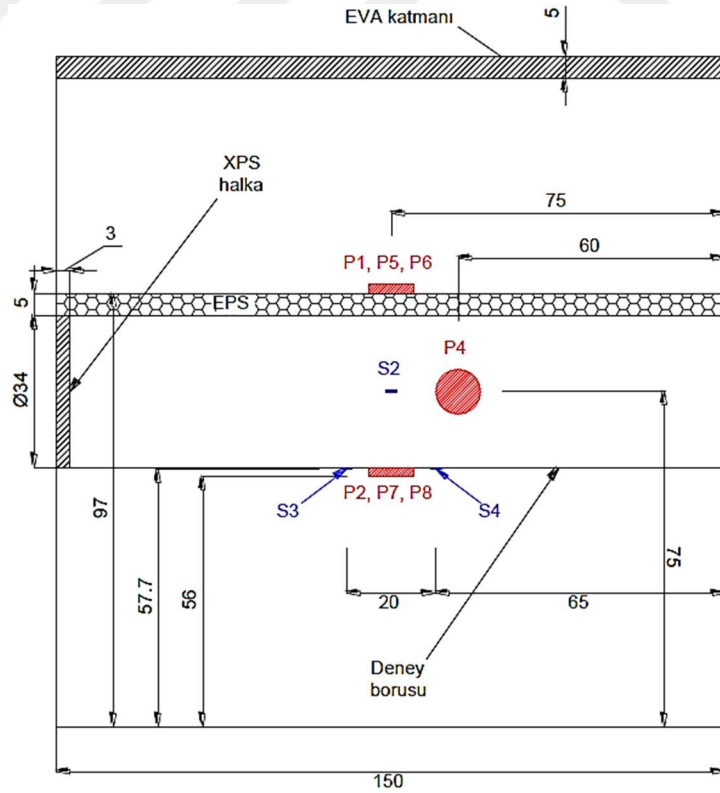
Şekil 2.5 $\rho_{EPS} = 10 \text{ kg/m}^3$ yoğunlukta EPS numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinde elde edilen eksenel şekil değiştirme – eksenel gerilme eğrisi (Akınay, 2017)

2.1.1 Deney Süresince Gerilme, Oturma ve Esneme Değerlerinin Elde Edilmesi

Laboratuvarda yapılan gerçek ölçekli deneylerde zemin içerisinde oluşan gerilmeleri ölçmek için toprak basıncı hücreleri (gerilme ölçer), oturma değerlerini ölçmek için oturma plakaları ve borunun düşey ve yatay esneme değerlerini ölçmek için potansiyometrik yer değiştirme sensörleri kullanılmıştır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 ile gösterilen toprak basınç hücrelerinden elde edilen ölçümlerden sayesinde EPS Geofom malzeme kullanımının boru davranışına etkileri belirlenebilmiştir. Aynı şekilde Şekil 2.6 ve Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, EPS malzemenin sağındaki ve solundaki zemin içerisinde bulunan toprak basıncı hücreleri boru tacında (P5 ve P6) boru tabanında (P7 ve P8) ise kemerlenme etkilerini belirleyebilmek için kullanılmıştır. Bu sayede EPS malzemenin boru üzerine gelen yüklerin ne kadarının zemine geri aktarıldığı tespit edilmiştir.

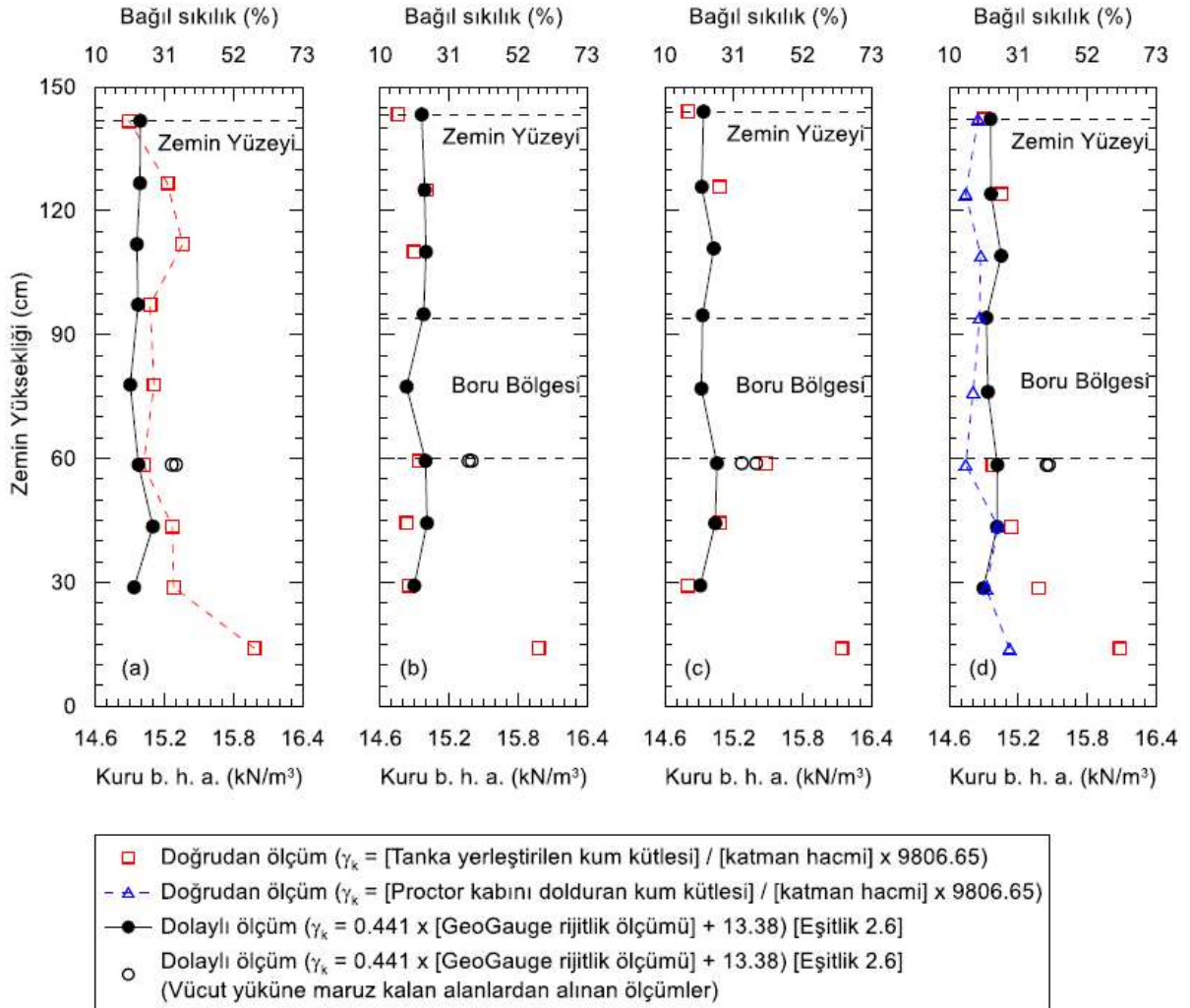


Şekil 2.6 Zemin enstrumantasyonunda kullanılan ölçüm aygıtlarının Doğu-Batı doğrultusu (Akınay, 2017)3



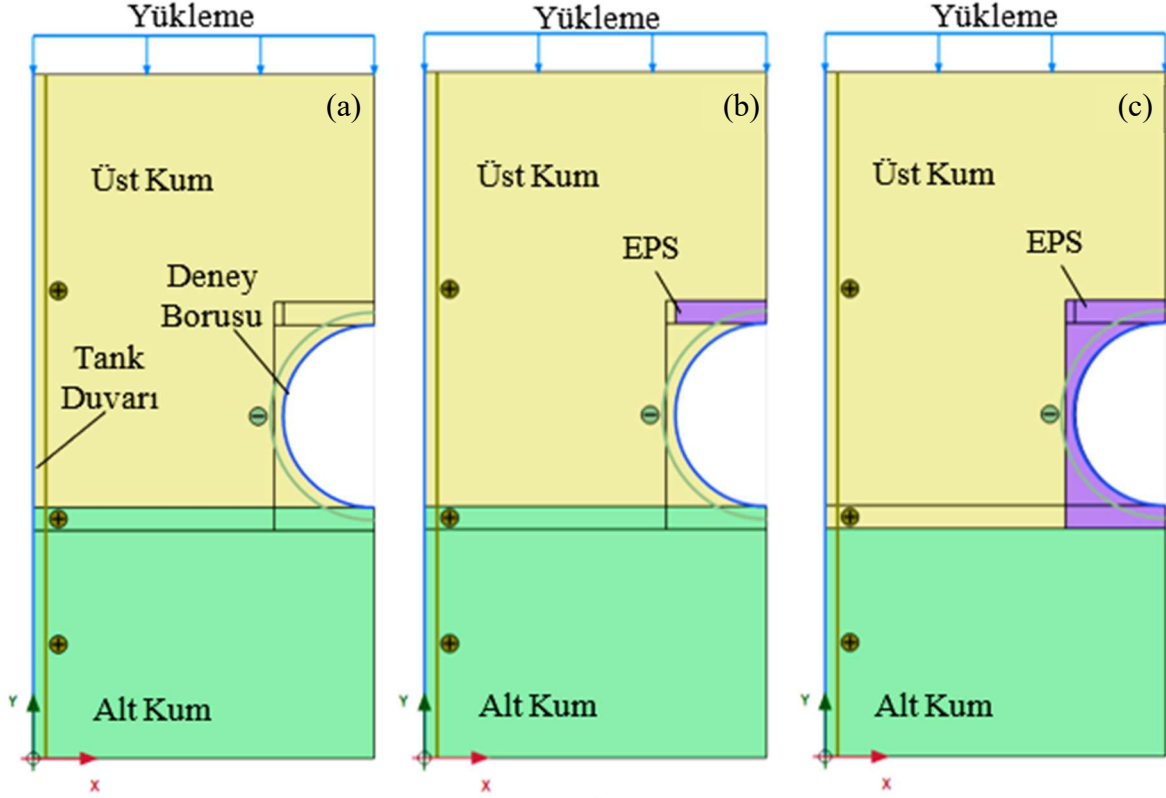
Şekil 2.7 Zemin enstrumantasyonunda kullanılan ölçüm aygıtlarının Kuzey-Güney doğrultusu (Akınay, 2017)

Deneyler sırasında yerleştirilen kumun sıklığı SSG aleti ve Proktor kalıpları ile kontrol edilmiş ve derinlik boyunca değişimi borusuz deney, referans deney, Konfigürasyon #1a ve Konfigürasyon #1b için Şekil 2.10'da sunulmuştur. Bu grafiklerde yüksekliği 1.5 metreye varan dolgu yükleri için elde edilen sıklık değerlerinin yanı sıra kumun birim hacim ağırlığı da verilmiştir.



Şekil 2.10 Zemin katmanları için belirlenen kuru birim hacim ağırlıkları ve karşılık gelen bağıl sıklıklar (a) Borusuz Deney (b) Referans Deney (c) Deney #1a ve (d) Deney #1b (Akınay, 2017)

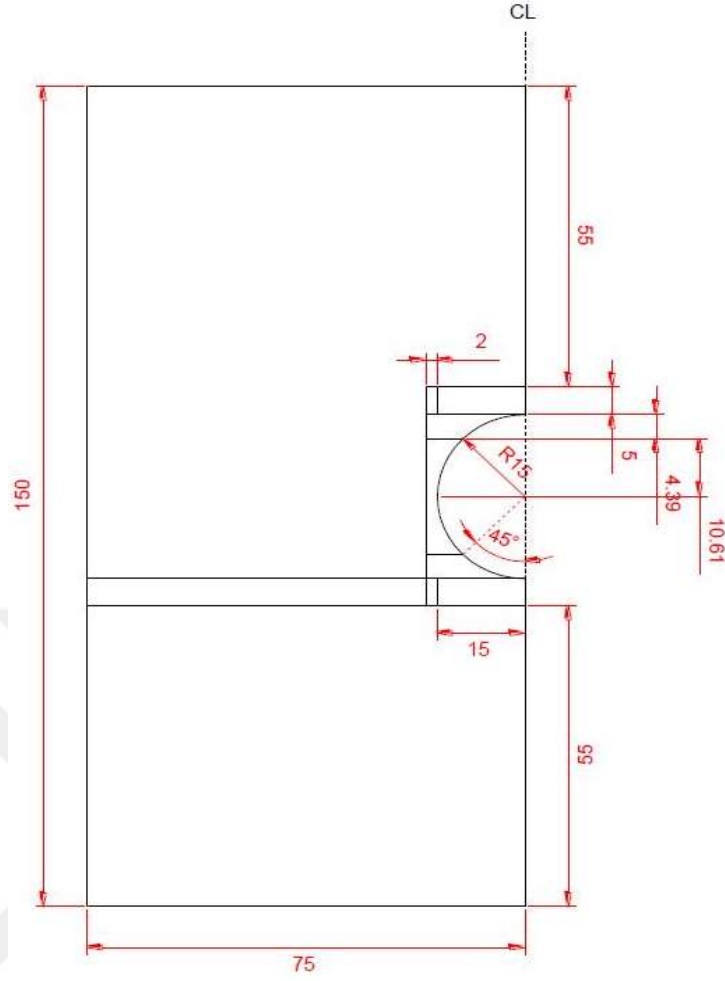
Oturma değerlerinin hesaplanmasında kullanılan potansiyometrik yer değiştirme sensörleri borunun yük altında ne kadar deformasyona maruz kaldığını tespit etmek için de kullanılmıştır. Şekil 2.11'de kullanılan Burster 8709-5100 potansiyometrik yer değiştirme sensörlerinin boru içerisindeki yerleşimi gösterilmiştir. Düşey ve yatay



Şekil 2.12 Plaxis 2D sayısal analizlerinde kullanılan Ø300 mm'lik HDPE boru ve EPS malzemenin sırası ile için model geometrileri: (a) Referans, (b) Konfigürasyon #1 (c) Konfigürasyon #2

Model oluşturulurken 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlar ile oluşturulan sonlu eleman ağı için çok küçük (very fine) aralıklar seçilmiş ve çözüm hassasiyeti olabildiğince artırılmıştır.

Akınay (2017) tarafından paylaşılan geometrik model çizim Şekil 2.13 ile gösterilmiştir. Bu çizim sayısal model oluşturulurken referans alınmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, boru çapının ve EPS geometrisinin değişimleri gibi farklı geometrik koşullardan kaynaklı farklılıklar uygun bir şekilde önerilen çizime uyarlanmıştır.



Şekil 2.13 Sayısal analiz için oluşturulmuş model geometrisi (tüm ölçüler cm birimindedir)(Akınay, 2017)

2.2.1 Deneyde Kullanılan Malzeme Parametreleri

Laboratuvar deneyinde kullanılan başlıca malzemeler arasında kum, HDPE korige boru ve EPS Geofom malzeme yer almaktadır. Mevcut olan tek çeşit kum zemin iki aşamalı inşadan dolayı iki farklı zemin gibi modellenmiş olup parametreleri Tablo 2.3'te sunulmuştur. Aynı şekilde bir diğer önemli parametre olan korige HDPE boru ve EPS Geofom malzeme parametreleri Akınay'ın (2017) belirttiği üzere standartlara uygun üretim yapan üreticilerden tedarik edilmiş ve malzeme özellikleri elde edilmiştir. Son olarak tank duvarlarının modellenmesinde, yanal genişlemeyi engelleyecek koşullar için uygun parametreler seçilerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

2.2.1.1 Zemin parametreleri

Deney kumunun iki farklı şekilde modellenmesinin sebebi borunun yerleştirilmesi sırasında altta kalan kum tabakasının, borunun yerleştirilmesi sırasında daha fazla

gerilmeye maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu zeminlerin rölatif sıklık dereceleri sırasıyla $Dr=25\%$ ve $Dr=40\%$ olarak verilmiştir. Kayma dayanım açıları konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyi yapılarak elde edilmiştir. Bu iki zemine ait diğer önemli parametreler Tablo 2.3'te sunulmuştur. Deney zemini modellenirken "Pekleşen Zemin Modeli" seçilmiştir (Shanz vd., 1999).

Tablo 2.3 Kum zemin parametreleri (Akınay, 2017)

Parametre	Üst Kum		Alt Kum
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m ³)	15		15.5
Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet, m (-)	0.5		0.5
Kayma dayanımı açısı, ϕ (°)	30		35
Genleşme açısı, ψ (°)	0		5
Kohezyon, c (kN/m ²)	0.1		0.1
Yükleme Durumu	Yük \leq 25 kN/m ²	Yük \geq 25 kN/m ²	Tüm Yükleme
Referans ortalama sekant modülü, E_{50}^{ref} (MN/m ²)	7.5	10	60
Referans tanjant ödometre modülü, E_{oed}^{ref} (MN/m ²)	7.5	10	60
Referans yük boşaltma-geri yükleme modülü, E_{ur}^{ref} (MN/m ²)	22.5	30	180

2.2.1.2 Boru ve Tank Duvarı Parametreleri

Deney borusu Plaxis 2D analiz programı arayüzüne tünel modeli olarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde borunun deney boyunca yaptığı davranış doğrusal elastik olarak varsayılmış ve 24 saatlik yükleme için kullanılan akma modülü DIN 16961-2 standardına göre $E_{HDPE} = 390$ MN/m² ve HDPE Poisson Oranı olarak da $\nu_{HDPE} = 0.46$ olarak alınmıştır. Boru modellemesinde kullanılan diğer parametreler Akınay (2017)'den alınarak Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Boru duvarı için girilen “Doğrusal Elastik Model” parametreleri (Akınay, 2017)

Parametre	Değer
Elastisite Modülü, E_{HDPE} (MN/m ²)	390
Poisson Oranı, ν_{HDPE} (-)	0.46
Boru duvarının birim uzunlukta ağırlığı, w_{boru} (kN/m/m)	0
Boru duvarının birim uzunlukta eylemsizlik momenti, I_{boru} (m ⁴ /m)	4.886×10^{-7}
Boru duvarının birim uzunlukta kesit alanı, A_{boru} (m ² /m)	1.803×10^{-2}
Boru duvarının birim uzunlukta eğilme rijitliği, $E_{HDPE}I_{boru}$ (kNm ² /m)	1.906×10^{-1}
Boru duvarının birim uzunlukta normal rijitliği, $E_{HDPE}A_{boru}$ (kN/m)	7032.41

Sayısal analizlerde değişen parametrelerden bir diğeri “SR” yani çember rijitliğidir. Çember rijitliğinin 24 saatlik değerleri (SR₂₄) TS 12132 standardında verildiği gibi rijitliklerine karşılık gelen tip numaraları ile Tablo 2.5’te gösterilmiştir.

Tablo 2.5 Boru tiplerinin çember rijitliklerinin 24 saatlik deney sonuçlarına göre değerleri

Tip Numaraları	Çember Rijitliği SR ₂₄ (kN/m ²)
Tip 1	2
Tip 2	4
Tip 3	8
Tip 4	16
Tip 5	31.5
Tip 6	63

SR₂₄ değeri belirlenirken denklem 2.1’de görüldüğü üzere 24 saatlik elastisite modülü değeri kullanılmalıdır. Bu durum termoplastik boru standartlarına yönelik olan DIN 16961-2’de ifade edilmiştir. Bu standarda göre 1 dakikalık elastisite modülü $E_{ck} = 800000$ kN/m² olarak verilmişken, 24 saatlik elastisite modülü $E_{C24} = 390000$ kN/m² olarak verilmiş. Bunun pratikteki karşılığı plastik malzeme kısa süreli (veya anlık) yüklemelere rijit olarak yanıt verirken, uzun süreli yüklemelerde daha sünek bir davranış sergilemektedir.

$$SR_{24} = \frac{E_{C24} * I_{boru}}{r^3} \quad (2.1)$$

Bu denklemde yer alan “SR” borunun çember rijitliğini, “E” borunun elastisite modülünü, “r” borunun yarı çapını ve “I” denklem 2.2’de gösterildiği üzere borunun et kalınlığı (t_{boru}) ve yarıçapı ile elde edilen birim uzunluktaki eylemsizlik momentini göstermektedir.

$$I_{boru} = \frac{1m * t_{boru}^3}{r^3} \quad (2.2)$$

Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde, değişen çap ve rijitlik parametreleri borunun hem et kalınlığı hem de eylemsizlik momenti ile doğrudan bağlantılıdır. Bu sebepten ötürü 24 saatlik elastisite modüllerinin boru çaplarına ve boru rijitliklerine göre değişimi Tablo 2.6’da verilmiştir. Bu tablodan yola çıkarak 24 saatlik rijitliğin (SR_{24}) Tip 5 (SR_{24-32}) değerinden Tip 2 (SR_{24-4}) değerine düşmesi et kalınlığını yarı yarıya azalması ile meydana gelmiştir.

Tablo 2.6 Sayısal Analizlerde Kullanılan SR32 ve SR4 Borular için Parametreler

Rijitlik	SR32			SR4		
Çap (mm)	Ø300	Ø200	Ø400	Ø300	Ø200	Ø400
Et kalınlığı (t) (m)	0.01492	0.00995	0.0199	0.00746	0.00497	0.00995
Eylemsizlik momenti (m^4/m)	2.8×10^{-7}	8.2×10^{-8}	6.6×10^{-7}	3.5×10^{-8}	1.0×10^{-7}	8.2×10^{-8}
Poisson Oranı(n)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
E-24 saat (kN/m^2)	390000	390000	390000	390000	390000	390000
EA-24 (kN/m)	7032	4688	9376	3516	2344	4688
EI-24 (kNm^2/m)	0.1906	0.05647	0.45179	0.02382	0.00705	0.05647

Bir diğer deney materyali olan tank duvarı ise yine doğrusal elastik model dikkate alınmış fakat yanal genişlemeyi engellemek adına yüksek değerlerde rijitlik tanımlanmıştır. Modellenen tankın duvar kalınlığının $t_{tank} = 5$ cm olduğu varsayılmış ve elastisite modülü $E_{çelik} = 200$ GN/ m^2 olarak alınmıştır. Tank duvarına ait diğer malzeme parametreleri ise Tablo 2.7’de sunulmuştur.

Tablo 2.7 Tank duvarı için Doğrusal Elastik Model parametreleri (Akınay, 2017)

Parametre	Değer
Elastisite Modülü, $E_{\text{çelik}}$ (GN/m ²)	200
Poisson Oranı, $\nu_{\text{çelik}}$ (boyutsuz)	0.3
Tank duvarının birim uzunlukta ağırlığı, w_{tank} (kN/m/m)	0
Tank duvarının birim uzunlukta eylemsizlik momenti, I_{tank} (m ⁴ /m)	1.042×10^{-5}
Tank duvarının birim uzunlukta kesit alanı, A_{tank} (m ² /m)	0.05
Tank duvarının birim uzunlukta eğilme rijitliği, ($E_{\text{çelik}} \times I_{\text{tank}}$) (kNm ² /m)	2083.33
Tank duvarının birim uzunlukta normal rijitliği, ($E_{\text{çelik}} \times A_{\text{tank}}$) (kN/m)	10 ⁷

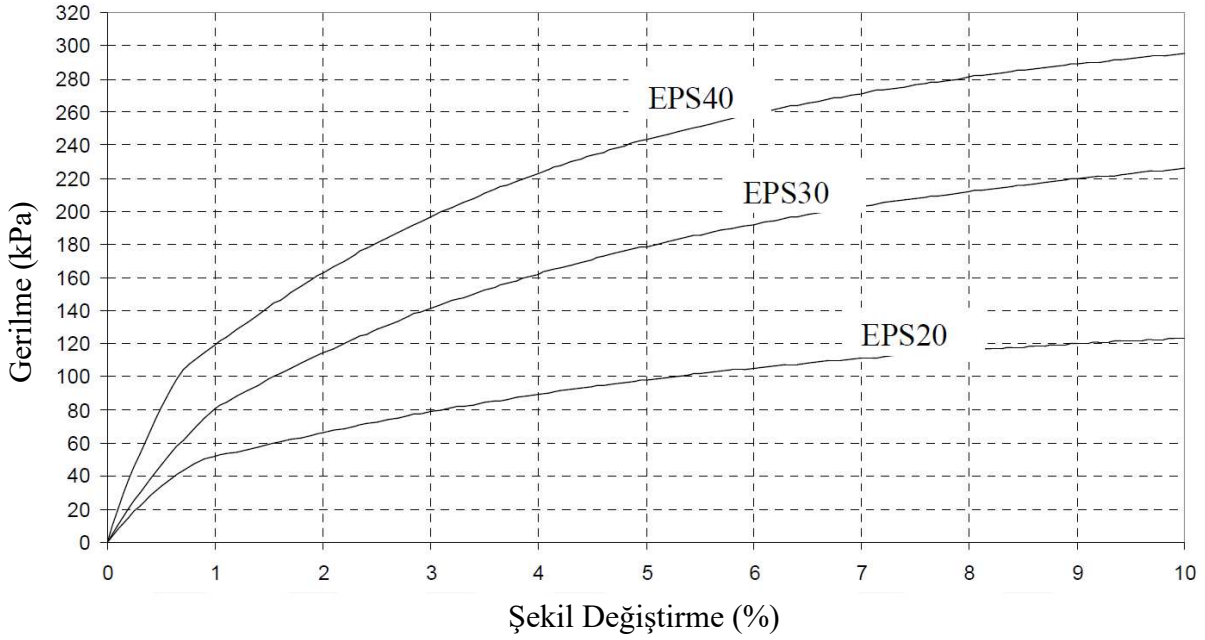
2.2.1.3 EPS Geofom malzeme parametreleri

Akınay (2017) kapsamında yapılan laboratuvar deneylerinde kullanılan EPS Geofom malzeme, sayısal analizlerde kullanılırken malzeme modeli olarak “doğrusal elastik model” seçilmiştir. Bu malzeme modeli için kullanılan parametreler yapılan serbest basınç deneylerinden belirlenen gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden belirlenmiştir (Şekil 2.5). EPS Geofom malzeme için farklı gerilme aralıklarında uygun elastisite modülü ve Poisson oranı belirlenmiştir.

Bu aşamalarda elde edilen elastisite modülleri ise yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen düşey şekil değiştirme - sürşarj gerilmesi grafiklerinden doğrusal parçalar şeklinde okunarak alınmıştır. Bu hesaplama bir örnek teşkil etmesi açısından Akınay tarafından oluşturulmuş EPS Geofom malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.5’te verilmiştir.

Tezi oluşturan ikinci kısımda ise Tefera vd. (2010) tarafından yapılan araştırmada elde edilen ve yoğunlukları 20 kg/m³, 30 kg/m³ ve 40 kg/m³ olan EPS20, EPS30 ve EPS40 malzemeleri yine çalışmayı yapanlar tarafından önerilen “Pekleşen Zemin Modeli”

kullanılarak modellenmiştir. Bu noktada tezin ilk aşamasında Akınay tarafından doğrusal elastik olarak modellenen EPS malzemesi de pekleşen zemin modeli ile yeniden modellenmiş ve kalibre edilmiştir. Tezin ikinci kısmında bulunan arazi deneyi modellenmesinde yüksek dolgu yükleri mevcut olduğundan elde edilen elastisite modülleri Şekil 2.14'te verilen grafik üzerinden olabildiğince dar aralıklar belirlenerek alınmıştır.



Şekil 2.14 Farklı yoğunluk değerlerindeki EPS Geofom malzemeler için gerilme – şekil değiştirme grafiği (Tefera, 2010)

Aynı çalışma kapsamında Tefera (2010) tarafından farklı yoğunluklara sahip EPS Geofom malzemelerin Plaxis 2D sonlu elemanlar analizleri için önerilen pekleşen zemin parametreleri Tablo 2.8'de gösterilmiştir. Bu tabloda yoğunluk artışı ile genişleme açısı, Poisson oranları ve referans gerilme değerleri değişmezken diğer parametrelerin hangi ölçüde değiştiği görülebilmektedir. Bunun yanı sıra Şekil 2.14'ten elde edilerek sayısal analizlerde kullanılan EPS malzemenin farklı yükler altındaki elastisite modülü değerleri Tablo 2.9'da paylaşılmıştır. Bu değerler Şekil 2.14'te belirtilen grafik üzerinden okunarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.8 EPS tiplerine göre pekleşen zemin modeli parametreleri (Tefera, 2010)

Pekleşen Zemin Modeli Parametreleri	EPS Tipi		
	EPS20	EPS30	EPS40
Birim hacim ağırlık (kg/m ³)	20	30	40
Kohezyon ¹ , c (kN/m ²)	35	60	75
İçsel sürtünme açısı ¹ , φ (°)	30	42	40
Genleşme açısı ¹ , 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 ¹ , p^{ref} (kPa)	100	100	100

¹ Belirtilen değerler lineer elastik model için kullanılmamıştır.

Tablo 2.9 Analizlerde kullanılan EPS malzemenin farklı yükler altındaki elastisite modülü değerleri

EPS20	Yük (kPa)	20	40	60	80	80+	-	-	-
	E (kPa)	1120	444	148	140	140	-	-	-
EPS40	Yük (kPa)	20	40	60	80	100	120	140	140+
	E (kPa)	6711	6369	2144	1246	892	553	500	500
EPS40	Yük (kPa)	20	40	60	80	100	120	140	160
	E (kPa)	18000	18000	18000	12690	12690	5682	4019	4019
	Yük (kPa)	180	200	220	240	260	280	300	300+
	E (kPa)	4019	2974	2974	1850	1850	665	600	600

2.2.1.4 Arayüzey Parametreleri

Deney kalibrasyonu için bir diğer önemli nokta arayüzey ilişkilerinin belirlenmesidir. Bu noktada Tank duvarı – Deney Zemini, HDPE Boru – Deney Zemini, EPS – HDPE Boru ve EPS – Deney zemini olarak 4 farklı arayüzey tanımı yapılmıştır. Bu parametrik tanımlar Akınay (2017) tarafından boru model deneyleri öncesi yapılan laboratuvar deneyleri, deney malzemelerinin üzerinde yapılan sayısal analizler ve literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiştir.

Öncelikle tank duvarı ve zemin arasındaki dayanımı azaltmak için iyileştirme katmanları uygulanmış ve kayma dayanımı açısı 5° düzeylerine kadar düşürülmüştür. Bu nedenle, kum zemin ile tank ara yüzeyi için tanımlanan " R_{inter} " değeri 0.17 olarak belirlenmiştir.

HDPE borunun etrafındaki zeminin kayma dayanım açısının 30° olduğu bilgisi göz önünde bulundurularak arayüzey azaltma faktörü $R_{inter} = 0.67$ olarak kullanılmıştır. Yine HDPE borunun EPS ile temas ettiği konfigürasyonlarda arayüzey parametresi Mohr – Coulomb malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Sheeley ve Negussey (2000) tarafından yapılan kesme deneyi çalışmaları sonucunda HDPE boru – EPS arasında 14° lik bir arayüzey dayanım açısı tespit edilmiştir. Bu kaynaklar referans alınarak HDPE boru – EPS arasındaki arayüzey azaltma faktörü (R_{inter}) değeri "1" olarak kullanılmıştır.

Son olarak EPS Geofom malzeme ile deney zemininin arayüzey azaltma değeri ise $R_{inter} = 1$ olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi arayüzey kayma dayanım açısının genellikle 30° olmasından ve EPS – kum zemin arayüzünün rijit olmasından kaynaklanan harekettir.

2.3 Kalibre Edilmiş Verilerin Deney Verileri ile Karşılaştırılması

Akınay (2017) tarafından yapılan doktora tezi kapsamındaki laboratuvar deneylerinde kullanılan deney isimlerine ilişkin kodlamanın bir benzeri bu yüksek lisans çalışmasına adapte edilmiştir. Benzer şekilde yapılan bu kodlama sistemi, ilk etapta bu iki çalışma arasındaki kalibrasyonun uyumunu ve farklarını ortaya çıkarmak, daha sonra ise genişletilerek değişen parametrelerin anlaşılır olmasını sağlamak için kullanılmıştır. Bölüm 2.1 içerisinde bulunan Şekil 2.3'te gösterilen konfigürasyonlar dikkate alınarak değişen boru çapları ve boru rijitlikleri için farklı kodlar kullanılmıştır. Boru rijitliğinin SR4 olması SR32'ye göre çok daha esnek bir boruyu ifade etmektedir (Tablo 2.6). Aynı zamanda EPS Geofom malzemenin değişen geometrisi ve iki farklı yoğunluğuna göre de kodlama sistemi genişletilmiştir.

Bu bölümde bahsedilen kodlamada sistemi örnek olarak Şekil 2.15'te da gösterildiği gibi aşağıda belirtilmiştir:

- I numaralı bölüm - deney geometrisini ifade etmektedir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.12'de görüldüğü üzere bu geometrilerdeki "**R**" değeri referans (EPS olmadan), "**1**" değeri EPS'nin borunun üzerinde olması durumunu, "**2**" değeri borunun çepeçevre EPS ile sarılması durumunu temsil etmektedir.

- II numaralı bölüm - EPS Geofom malzemenin yoğunluğunu temsil etmektedir. Kullanılan EPS Geofom malzemenin yoğunluğu 10 kg/m³ ise “a”, 15 kg/m³ ise “b” olarak kodlamaya eklenmiştir.
- III numaralı bölüm - boru çaplarını ifade etmektedir. “D” karakteri çap için kullanılmış ve ardından gelen 02, 03 ve 04 sayıları sırasıyla Ø200, Ø300 ve Ø400 milimetrelilik çapları temsil etmektedir.
- IV numaralı bölüm deney borusunu 24 saatlik çember rijitliğini ifade etmektedir. Bu değerler **SR32** ve **SR4** olarak ikiye ayrılmaktadır. SR32 ve SR4 değerleri sırasıyla 24 saatlik çember rijitliğinin 32 kN/m² ve 4 kN/m² olduğunu ifade etmektedir.

I II III IV
 ┌───┬───┬───┬───┐
 #1a-D04.SR32

Şekil 2.15 EPS'nin boru üzerinde bulunduğu, 10 kg/m³ yoğunluklu EPS'ye sahip, Ø400 mm çapında ve rijitliği 32 kN/m² olan bir kodlama örneği

Akınay (2017) tarafından yapılan laboratuvar deneyleri ile sayısal analizlerin karşılaştırıldığı bölüm içerisinde bulunan grafiklerdeki deney verileri için “Deney” ifadesi, sayısal analizler için ise “Plaxis” ifadesi eklenerek grafiklerde belirtilmiştir. Ayrıca yapılan bu laboratuvar deneylerinde yalnızca EPS geometrileri ve EPS yoğunlukları değişkenlik göstermiştir. Elde edilen kalibrasyon değerlendirmelerinde de bu bilgilere dayanılarak yalnızca Ø300 mm'lik boru çapına sahip ve 24 saatlik çember rijitliği 32 kN/m² olan borunun yer aldığı analizler göz önünde bulundurulmuştur.

2.3.1 Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması

Mevcut laboratuvar deneyi ile aynı yükleme adımlarına sahip Plaxis 2D analizleri arasındaki ilişki boru tacında ve tabanında meydana gelen düşey zemin gerilmeleri ile borunu yan duvarındaki yatay zemin gerilmeleri grafiklerde sunulmuştur. Bu grafiklerdeki uygulanan sürşarj gerilmesinin yükleme adımları 0 kPa'dan 200 kPa yüke kadar her bir 25 kPa değişim için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 2.7'de belirtilen P1 toprak basıncı hücresi boru tacındaki düşey gerilmeleri, P4 toprak basıncı hücresi boru tabanındaki düşey gerilmeleri ve P2 ile P3 toprak basıncı hücreleri boru yan

duvarlarındaki yatay gerilmeleri tespit etmek için kullanılmıştır. Bu grafiklerde boru tacı için “ σ_c ”, boru tabanı için “ σ_B ” ve boru yan duvarları için “ σ_H ” indisleri kullanılmıştır. Böylece P1 toprak basıncı hücresi sonuçları “ σ_c ”, P4 toprak basıncı hücresi sonuçları “ σ_B ” ve P2 ile P3 toprak basıncı hücresi sonuçları “ σ_H ” ile gösterilmiştir.

Grafiklerde görüleceği üzere başlarında “Deney” ibaresi olan eğriler Akınay (2017) kapsamında laboratuvarda yapılan gerçek ölçekli deneylerde ölçülen değerleri, “Plaxis” ibaresi olanlar ise bu tez kapsamında yapılan sayısal analizlerden hesaplanan değerleri göstermektedir. Bu sonuçlar EPS Geofom malzemenin geometrik koşullarına ve EPS yoğunluğuna göre karşılaştırılarak ölçüm ile hesap değerlerinin birbirine yaklaşması sağlanmıştır.

Deneyler ve sayısal analizlerden elde edilen gerilmeler EPS yoğunluğu 10 kg/m^3 (EPS10) olan durumlarda farklı geometriler için Şekil 2.16, Şekil 2.18 ve Şekil 2.20 ile; EPS yoğunluğu 15 kg/m^3 (EPS15) olan durumlarda farklı geometriler için ise Şekil 2.17, Şekil 2.19 ve Şekil 2.21’de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerden hesaplanan gerilme değerlerinin, deney ölçümlerinden bir miktar yüksek çıktığı görülmektedir. Özellikle boru tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerinde birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmesi yanı sıra borunun yan kısmına gelen yatay zemin gerilmeleri ve boru tabanındaki düşey zemin gerilmeleri bakımından referans deneylerin arasında bir miktar fark gözlemlenmektedir.

2.3.1.1 Boru Tacına Etkiyen Düşey Gerilmelerin Karşılaştırması

Laboratuvar deneyleri ve Plaxis 2D ile yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçların boru tacında ölçülen düşey gerilmelere göre karşılaştırılması Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 ile sunulmuştur. İlk şekilde EPS10 ve ikinci şekilde ise EPS15 sonuçları gösterilmiştir.

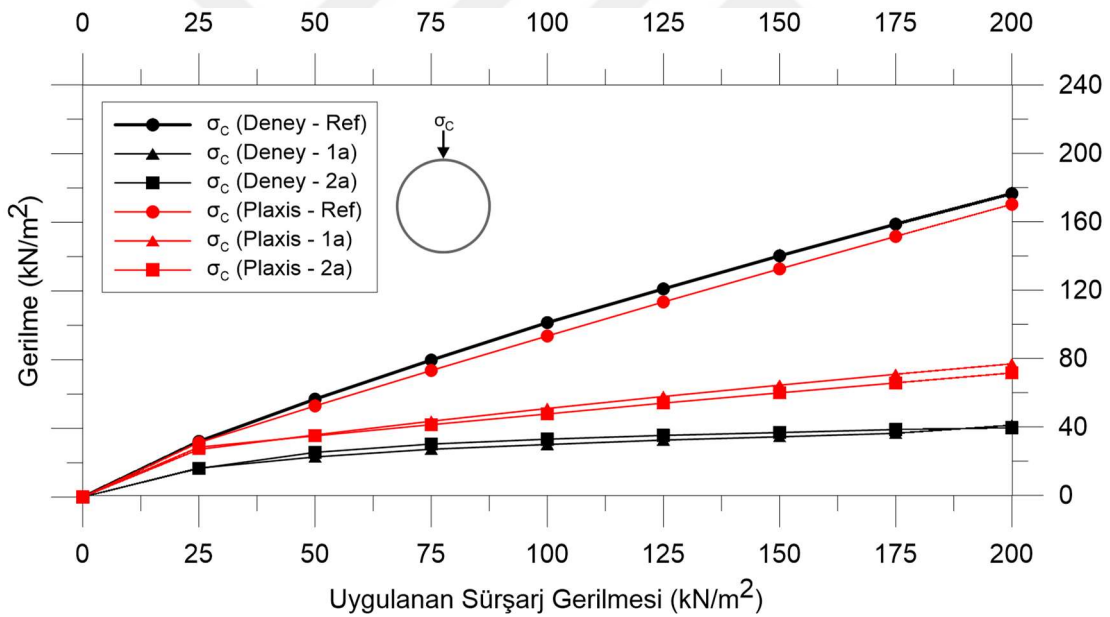
Şekil 2.16’da verilen değerlere göre, referans deney ölçümleri ile referans sayısal hesap sonuçlarının birbiri ile oldukça uyumlu olmakla beraber EPS10 olan Konfigürasyon #1 ve Konfigürasyon #2’de düşey gerilme değerlerinin deneysel ölçümlerden yaklaşık 30 kPa kadar fazla olduğu görülmektedir.

EPS15 yoğunluk için yapılan karşılaştırmalar Şekil 2.17’de sunulmuştur. Referans deney ölçümleri ve analiz hesap değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

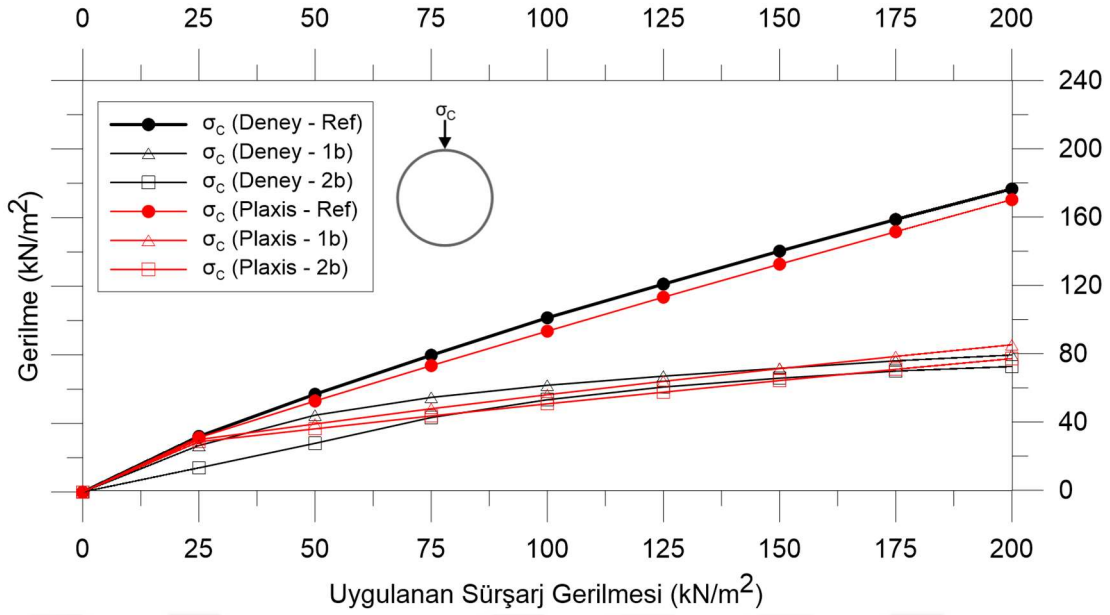
EPS15 için sayısal analiz sonuçları 5-10 kPa aralığında artış gösterirken deney verilerindeki artış yaklaşık 35 kPa kadardır.

Boru tacındaki gerilmeler geometriye göre değerlendirildiğinde hem deneyde hem de sayısal analiz sonuçlarında aynı eğilim görülmektedir. Borunun üzerinde EPS Gefoam malzeme olması veya borunun çepeçevre bu malzeme ile sarılı olması boru tacındaki gerilmeleri çok fazla değiştirmemektedir. Aynı zamanda EPS Gefoam malzeme kullanımının referans deney ile karşılaştırıldığında boru tacına etkiyen düşey gerilmeleri %60'a kadar azalttığı gözlemlenmektedir.

Boru tacında meydana gelen değişimler EPS yoğunluğu göz önüne alınarak incelendiğinde ise yoğunluğun artması ile boru tacına etkiyen düşey zemin gerilmelerinde artış meydana gelmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında bu artış daha açık bir şekilde görülürken sayısal analiz sonuçlarında EPS yoğunluğundaki artışın boru tacına etkiyen gerilmenin değerini daha az etkilediği görülmektedir.



Şekil 2.16 EPS geometrisine göre boru tacındaki düşey gerilmelerin karşılaştırılması (EPS10)



Şekil 2.17 EPS geometrisine göre boru tacındaki düşey gerilmelerin karşılaştırılması (EPS15)

2.3.1.2 Boru Yanına Etkiyen Yatay Gerilmelerin Karşılaştırması

Boru yanlarında deneylerde alınan ölçümler ve sayısal analizlerden hesaplanan yatay gerilmelerin karşılaştırılması sonucu elde edilen grafikler Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da sırasıyla EPS10 ve EPS15 için sunulmuştur.

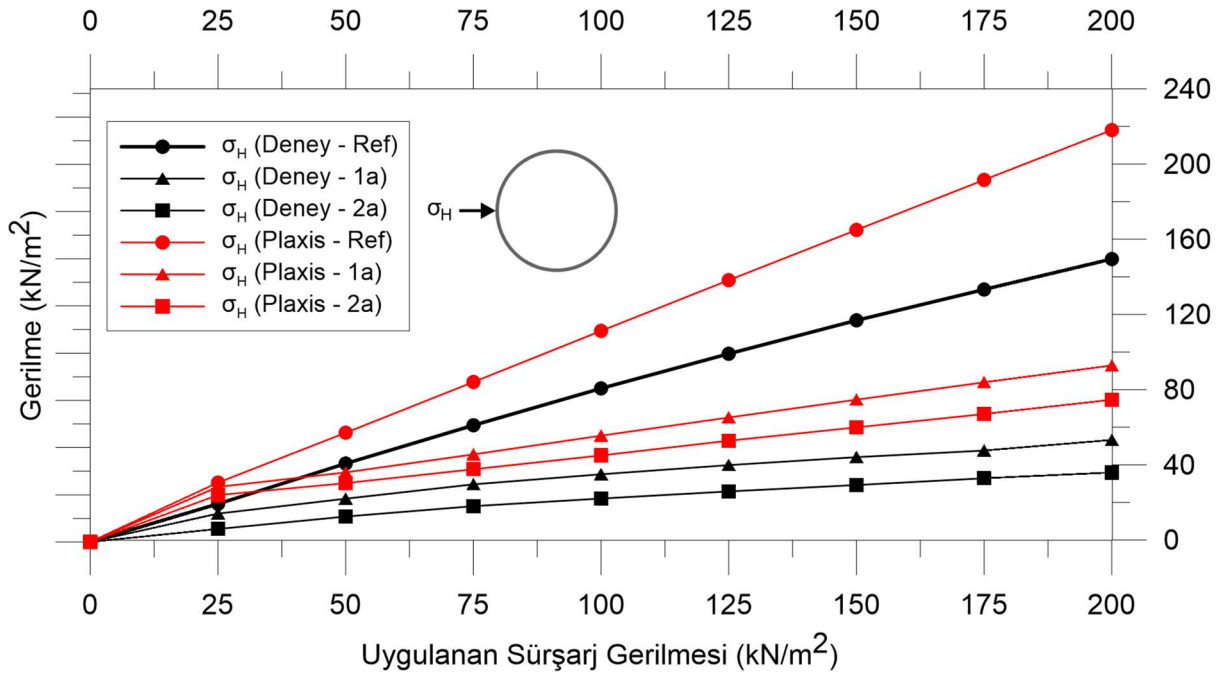
Grafiklerden görüldüğü gibi yatay gerilmeler için analiz sonuçları deneysel ölçümlerin bir miktar üzerindedir. Özellikle referans deney için aradaki fark 80 kPa'a kadar yaklaşmaktadır. Fakat oturma ve esneme değerleri kalibrasyon açısından daha önemli varsayılmış ve bu iki değer deney verilerine daha yakın olması amacıyla kalibre edilen zemin parametreleri sonucu yanal gerilmelerde sapmalar meydana geldiği düşünülmektedir.

Boru yan çeperine etkiyen yanal zemin gerilmeleri genel olarak incelendiğinde ise EPS Geofom malzeme kullanımı ile hem deneysel ölçümlerde hem de sayısal analiz hesap sonuçlarında bir azalma meydana geldiği söylenebilir. En düşük değerlerin elde edildiği Konfigürasyon #2'nin yanı sıra boru üzerine EPS Geofom malzeme konulması da boru yan duvarlarına gelen yanal zemin gerilmelerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

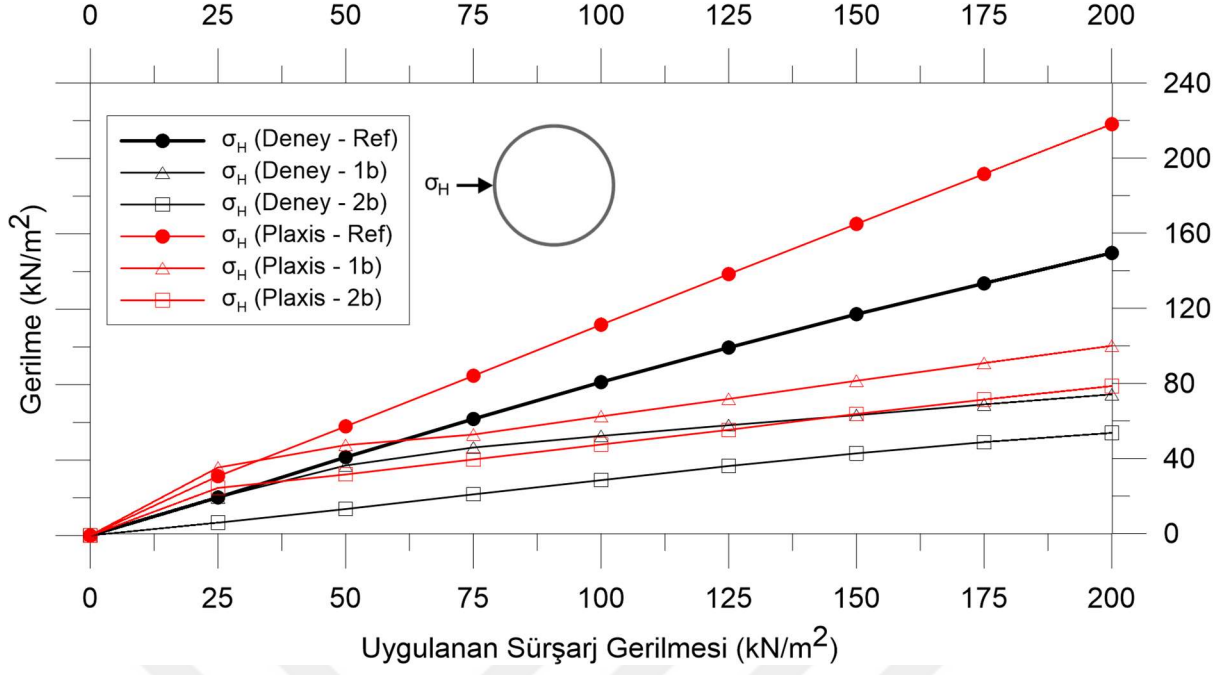
Deneylerden ölçülen yanal zemin gerilmeleri boru tacına etkiyen gerilmelerde olduğu gibi, EPS malzeme yoğunluğu arttığında, artış göstermiştir. 200 kPa'lık sürşarj gerilmesi

için EPS10'da ortalama 40 kPa ölçülen yatay zemin gerilmesi, EPS15'te 60 kPa'a yakın ölçülmüştür.

Sayısal analizlerden hesaplanan değerlerde, referans deneyde boru yanlarında meydana gelen 150 kPa büyüklüğündeki yatay zemin gerilmelerinin Konfigürasyon #1a'da yaklaşık 55 kPa, Konfigürasyon #2a'da ise yaklaşık 40 kPa olduğu görülmüştür. Bu durumda azalmalar sırası ile %63 ve %73 olarak hesaplanmıştır. Aynı hesaplama EPS15 için yapıldığında ise azalmalar sırası ile %48 ve %60 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.18 EPS geometrisine göre boru yanlarındaki yatay zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS10)



Şekil 2.19 EPS geometrisine göre boru yanlarındaki yatay zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS15)

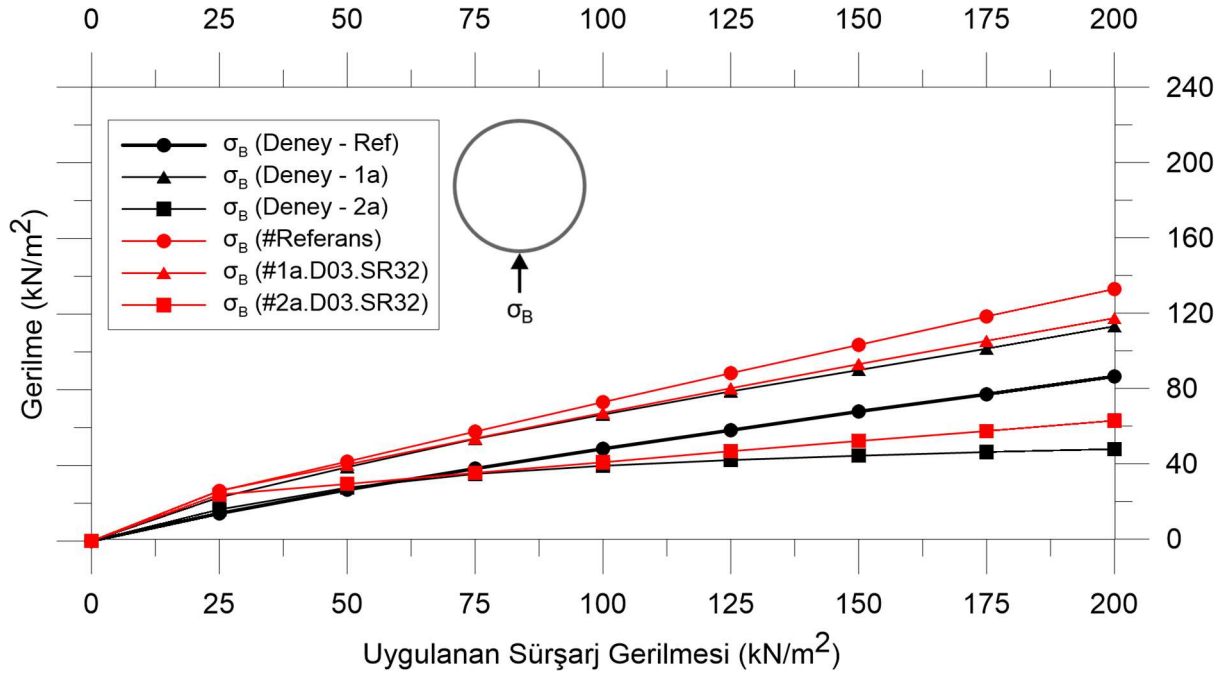
2.3.1.3 Boru Tabanına Etkiyen Düşey Gerilmelerin Karşılaştırması

Boru tabanında ölçülen ve hesaplanan düşey zemin gerilmelerinin değişimi Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de sırası ile EPS10 ve EPS15 için sunulmuştur.

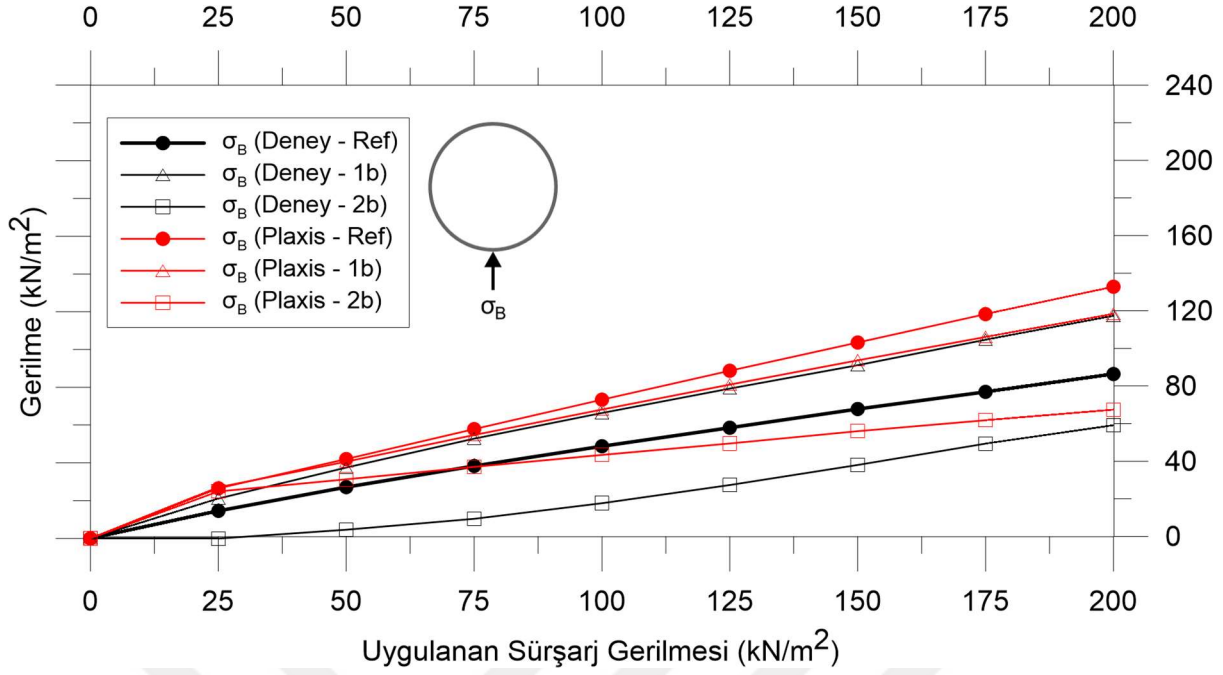
Şekil 2.20'de referans deneyde boru tabanında ölçülen düşey gerilmenin, sayısal analizden hesaplanan düşey gerilmeden daha az olduğu gözle çarpılmaktadır. Bunun dışında Konfigürasyon #1 ve #2 sonuçlarına bakıldığında ortaya çıkan sonuçların oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Şekil 2.21'de ise yoğunluğu yüksek EPS Geofom malzeme kullanımının boru tabanındaki gerilmeleri çok fazla etkilemediği görülmektedir. Sayısal analizlerde hesaplanan değerlerde bir fark olmamakla birlikte deney sonuçlarına bakıldığında Konfigürasyon #2'de EPS yoğunluğunun değişiminin tabanda ölçülen gerilmeyi etkilediği görülmektedir. Bu deneylerde EPS malzemenin yoğunluğunun artması ile boru tabanındaki düşey gerilmeler yaklaşık 15 kPa kadar artmış, ayrıca yükleme aşamaları göz önünde bulundurulduğunda EPS10 ile yapılan deneylerde Konfigürasyon #2 için boru tabanındaki gerilme artışının konkav, EPS15 ile yapılan deneylerde bu artışın daha çok konveks olduğu söylenebilir. Fakat genel olarak EPS yoğunluğunun bu veriler ışığında boru tabanındaki gerilmelere çok fazla etki etmediği tespit edilmiştir.

Grafik üzerinde yapılabilecek bir diğer önemli yorum ise Konfigürasyon #2'de borunun çepeçevre EPS Geofoam ile sarılması durumunda (Konfigürasyon #1'e göre) boru tabanındaki EPS malzemenin boru tabanına gelen düşey gerilmeleri yarı yarıya azalttığı söylenebilir. Konfigürasyon #1'de gözlemlenen 120 kPa'lık gerilme, Konfigürasyon #2'de yaklaşık 60 kPa seviyelerine kadar düşmüştür.



Şekil 2.20 EPS geometrilerine göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS10)

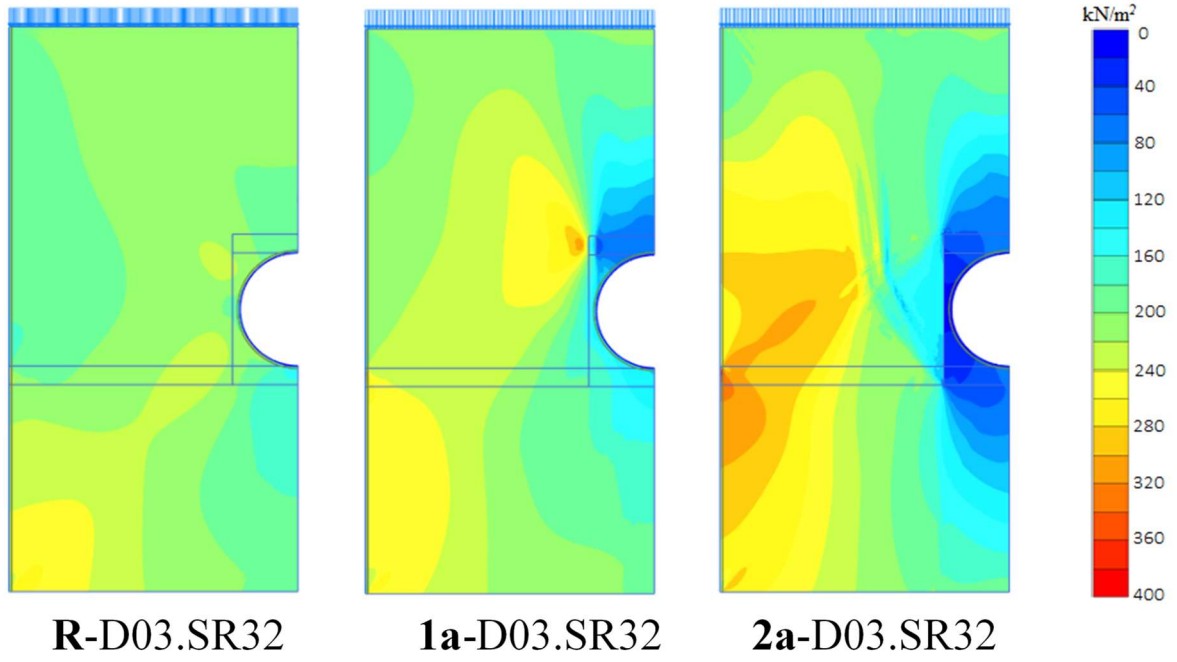


Şekil 2.21 EPS geometrilerine göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması (EPS15)

Şekil 2.22'de ise sürşarj yükünden kaynaklanan düşey zemin gerilmelerinin deney tankı içindeki dağılımları verilmiştir. Sıcak (kırmızıya yakın) renkler yüksek değerleri, soğuk (maviye yakın) renkler ise düşük değerleri temsil etmektedir.

Bu gerilme dağılımlarına bakıldığında EPS bulunmayan referans (#R-D03.SR32) durumda düşey gerilmelerin boru çevresinde oldukça yüksek olduğu görülmektedir. EPS Geofoam malzemenin boru üzerine dikdörtgen şekilde yerleştirilmesinin ardından (#1a-D03.SR32) boru üzerine gelen gerilmelerdeki azalmanın yanı sıra boru tabanında da bir miktar azalma meydana geldiği görülmektedir. Aynı şekilde EPS Geofoam malzemenin boruyu çepeçevre sarması durumunda (#2a-D03.SR32) ise boru tacına gelen gerilmelerin yanı sıra boru tabanında ve yanında da gerilmeleri oldukça azalttığı göze çarpmaktadır.

Bu grafiklerde öne çıkan bir diğer önemli nokta ise referans durumda borunun sol tarafında bulunan zemin içerisindeki gerilmelerin değişimidir. Bu gerilmeler Konfigürasyon #1 durumunda yaklaşık 200 kPa değerinden 300 kPa değerine doğru artış göstermiştir. Konfigürasyon #2'de ise bu değerler oldukça fazla artış göstermiş ve EPS Geofoam malzemenin yük altında sıkışması sayesinde meydana gelen kemerlenme ile boru tacına gelen düşey zemin yüklerini yan dolgu zemine aktararak gerilme artışlarına neden olmuştur.



Şekil 2.22 Plaxis 2D programı ile modellenmiş $\varnothing 300$ mm çapa sahip SR32 rijitliğindeki bir borunun farklı EPS geometrileri ile 200 kPa yük altındaki düşey gerilme dağılımları

2.3.2 Oturma Değerlerinin Karşılaştırılması

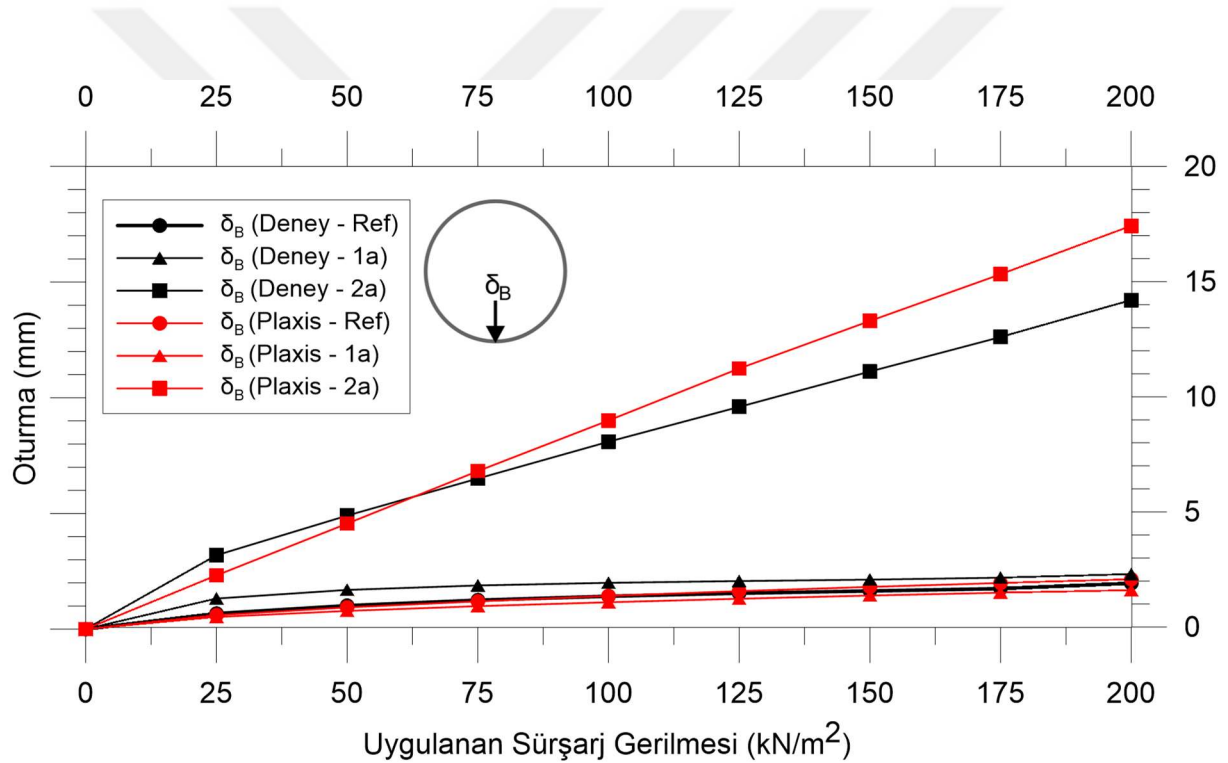
Oturma değerlerinin elde edilmesi ve karşılaştırılması sırasında izlenen yöntem gerilme değerlerinin karşılaştırılması sırasında izlenen yöntem ile aynıdır. Bu değerler karşılaştırılırken deney sonuçları ile sayısal analiz verileri aynı parametrik şartlar ve yükleme koşulları altında değerlendirilmiştir. Şekil 2.7’de belirtilen S1 ve S2 oturma plakaları boru yatay simetri ekseninde, boru merkezinden 35 cm uzaklıkta zemin içerisinde meydana gelen düşey yer değiştirmeleri (oturmaları), S3 ve S4 oturma plakaları ise boru tabanında meydana gelen düşey yer değiştirmeleri tespit etmek için kullanılmıştır. Bu değerleri belirtmek üzere merkezden 35 cm uzaklıktaki zemin oturmaları için “ δ_w ”, boru tabanı için “ δ_B ” indisleri kullanılmıştır. Böylece S1 ve S2 oturma plakası sonuçları “ δ_w ”, S3 ve S4 oturma plakası sonuçları “ δ_B ” ile gösterilmiştir.

Oturma miktarları karşılaştırıldığında gerilme sonuçlarına nazaran daha uyumlu grafikler elde edildiği söylenebilir. Özellikle referans ve Konfigürasyon #1 sonuçları karşılaştırıldığında birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Fakat Konfigürasyon #2 analizindeki oturmalar boruyu çepeçevre saran EPS Geofom malzemenin sıkışması ile yüksek değerlere ulaşmış, bu sebepten ötürü deney ve sayısal analiz sonuçları arasındaki sapma değerini bir miktar artırmıştır.

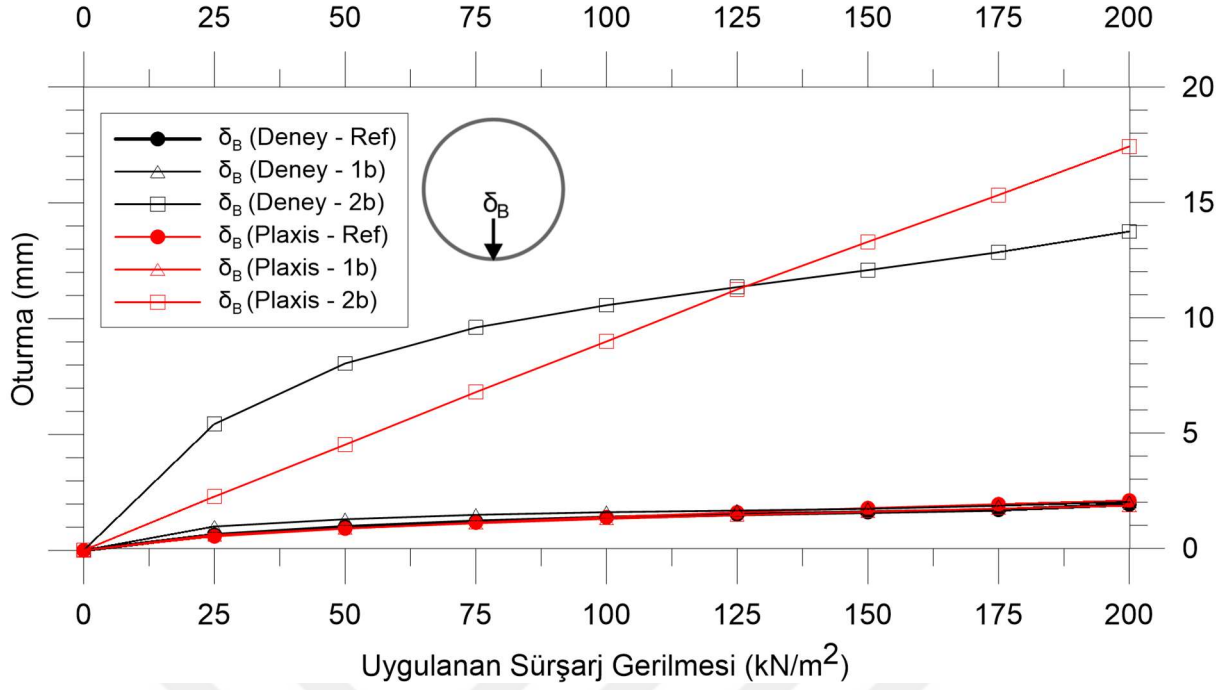
2.3.2.1 Boru Tabanındaki Oturma Değerlerinin Karşılaştırılması

Boru tabanında meydana gelen oturma değerleri EPS yoğunluğuna ve geometriye göre farklı durumlar için Şekil 2.23 ve Şekil 2.24 ile sunulmuştur. İlk şekilde EPS yoğunluğu 10 kg/m³ olarak dikkate alınmış, ikinci şekilde ise EPS yoğunluğu 15 kg/m³ olarak dikkate alınmıştır.

Boru tabanında meydana gelen oturma değerleri EPS yoğunluğuna bakılmaksızın referans ve Konfigürasyon #1 durumları için 1.5 – 2.0 mm arasındadır. Bu değer borunun çepeçevre sarılması durumunda (Konfigürasyon #2) EPS malzemenin de sıkışması ile oldukça yükselmiştir. Deneylerde ölçülen değerler 13–14 mm arasında iken sayısal analizlerden hesaplanan değerler yaklaşık 17 mm'dir.



Şekil 2.23 EPS geometrilerine göre boru tabanındaki oturmaların karşılaştırılması (EPS10)



Şekil 2.24 EPS geometrilerine göre boru tabanındaki oturmaların karşılaştırılması (EPS15)

2.3.2.2 Zemin İçerisindeki Oturma Değerlerinin Karşılaştırılması

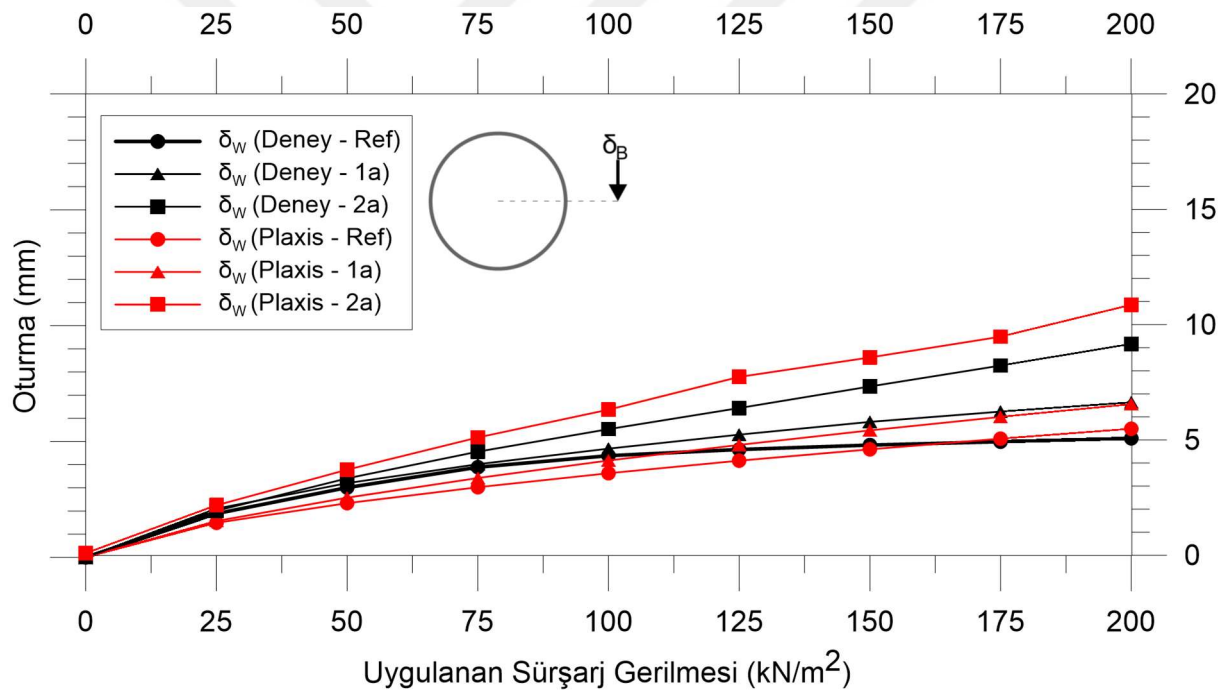
Bir diğer düşey yer değiştirme noktası olan boru yatay simetri ekseninde, merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin içerisindeki oturma plakalarına ait veriler ve bu verilerin sayısal analiz sonuçlarına göre karşılaştırılması Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'de sunulmuştur. Zemin içerisindeki hareketlerin tespit edilmesi bu konu üzerinde çalışan araştırmacıların kemerlenme etkisini ve bu mekanizmanın yol açtığı davranışı tespit edebilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Deneysel sırasında kullanılan S1 ve S2 plakaları zemin içerisindeki oturmaları ölçerek kemerlenme mekanizmasının hangi şartlar altında daha faydalı sonuçlar verdiğini tespit etmeye yaramaktadır. Bu bakış açısıyla zemin içerisinde meydana gelen oturma artışları kemerlenme etkilerinin daha belirgin şekilde gözlemlendiği anlamına gelmektedir.

Bu noktada referans deney baz alınarak Konfigurasyon #1 kullanımı sonucunda zemin içerisindeki oturmaların bir miktar arttığı görülmektedir. Böylece EPS malzemenin boru üzerine yerleştirilmesi ile zemin içerisindeki kemerlenme mekanizması bir miktar daha tetiklenmiş ve boru üzerine gelen gerilmenin bir kısmı zemine tekrar aktarılmıştır. Bu

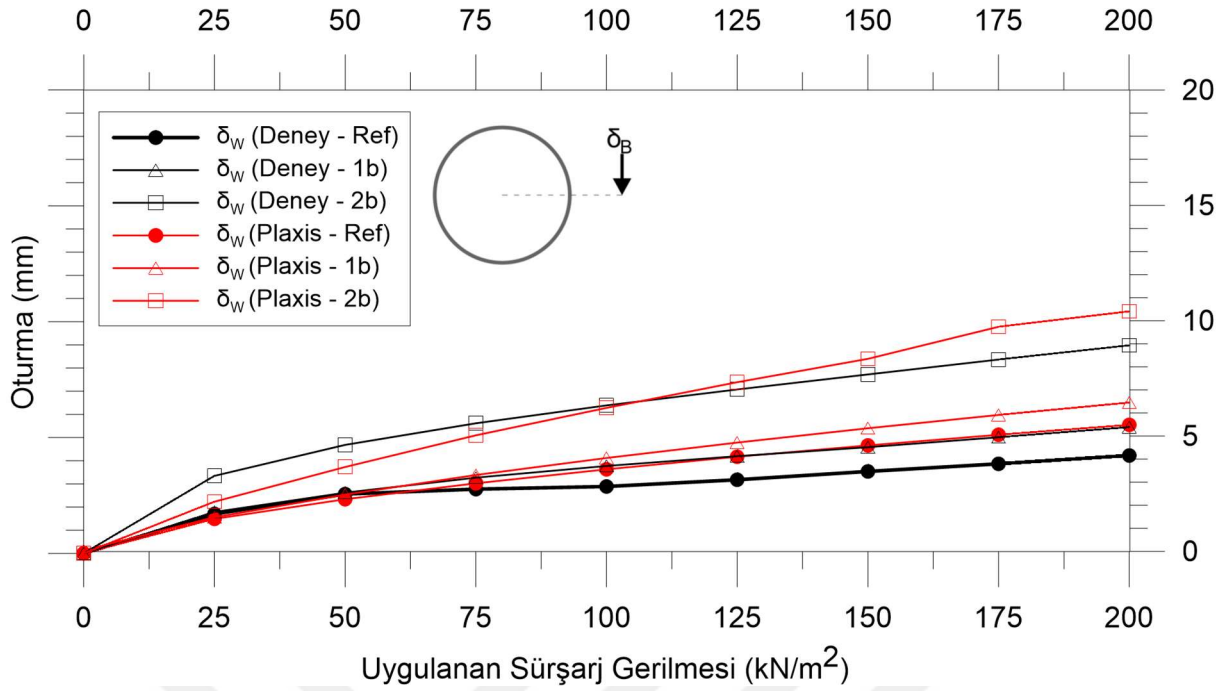
bilgi doğrultusunda Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 incelendiğinde boru tacına gelen düşey gerilmelerin azaldığı görülebilmektedir.

Bir diğer konfigürasyon olan borunun çepeçevre EPS malzeme ile sarılmasının (Konfigürasyon #2) ise zemin içerisindeki oturma değerlerini diğer konfigürasyonlara nazaran oldukça arttırdığı söylenebilir. Sayısal olarak ifade etmek gerekirse Konfigürasyon #1 kullanımı zemin içerisindeki oturmaları %30, Konfigürasyon #2 kullanımı ise aynı değerleri yaklaşık %100 artırmıştır.

EPS yoğunluğunun artması ise boru tabanındaki oturmalarda olduğu gibi sonuçları etkileyecek kadar yüksek farklara yol açmamıştır. Görülebilecek ufak farklar ise yalnızca EPS malzemenin boruya çepeçevre sarıldığı durumda borunun EPS malzemedan hem hacimce hem de ağırlıkça daha fazla etkilendiği Konfigürasyon #2’de meydana gelmiştir.



Şekil 2.25 EPS geometrilerine göre boru merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin oturmalarının karşılaştırılması (EPS10)



Şekil 2.26 EPS geometrilerine göre boru merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin oturmalarının karşılaştırılması (EPS15)

2.3.3 Esneme değerlerinin karşılaştırılması

Deneysel borusunun enkesitine yerleştirilen potansiyometrik yer değiştirme sensörlerinden elde edilen veriler ile sayısal analizlerden hesaplanan sonuçlar bu bölüm içerisinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucu verilerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle referans deneysel ve analiz sonuçları birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Düşey esneme değerleri " Δy ", yatay esneme değerleri " Δx " ile gösterilmiştir.

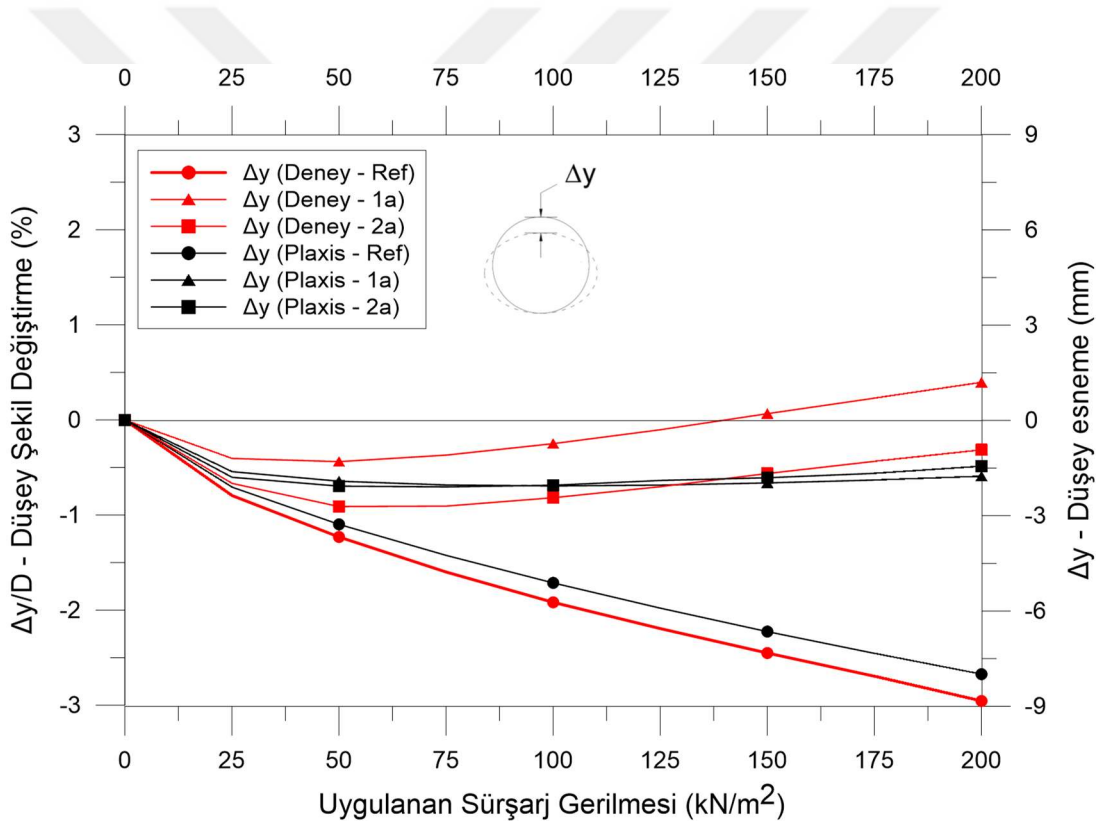
2.3.3.1 Düşey Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 2.27'de belirtilen grafikte görüldüğü üzere EPS kullanılmadan elde edilen sonuçlar ile EPS Geofom kullanılan durumlar karşılaştırıldığında esnemelerin %80'in üzerinde azaldığı ve Konfigürasyon #1 durumunda deneysel sırasında pozitif bölgeye geçtiği de gözlemlenmiştir.

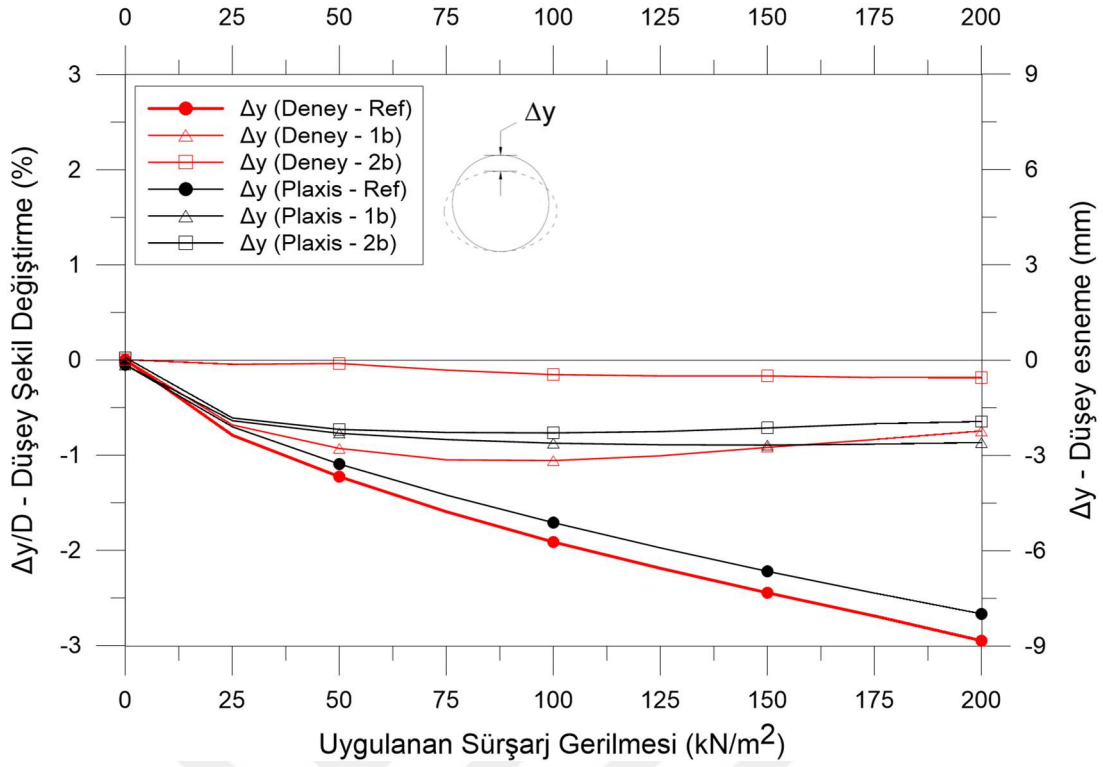
EPS10 kullanımı sonucu Konfigürasyon #1'de görülen -%0.5 ile +%0.5 arasındaki fark milimetre olarak ifade edildiğinde yaklaşık 3 mm'ye denk gelmektedir. Konfigürasyon #2'de ortaya çıkan sonuçlara bakıldığında ise deneysel ve analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Şekil 2.28’de paylaşıldığı üzere EPS15 ile yapılan deney ve sayısal analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında EPS10’a göre daha uyumlu sonuçlar elde edildiği ortaya çıkmıştır. Bu analizlerde EPS10 kullanımında farklı olarak pozitif bölgeye geçme durumu, diğer bir deyişle boruda uzama meydana gelmemiştir. Düşey esnemelerin 15 kg/m³ yoğunluklu EPS malzeme kullanılan analizlerde bir miktar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre EPS malzeme kullanımının düşey esnemeleri azalttığı görülmektedir. İki durumda göz önüne alınarak yapılan karşılaştırmada ise en düşük esneme değerleri Konfigurasyon #2 durumunda meydana gelmiştir. Aynı zamanda EPS Geofoam malzemenin yoğunluğunun artması ile esnemelerin bir miktar daha arttığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.27 EPS geometrilerine göre borudaki düşey esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS10)



Şekil 2.28 EPS geometrilerine göre borudaki düşey esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS15)

2.3.3.2 Yatay Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması

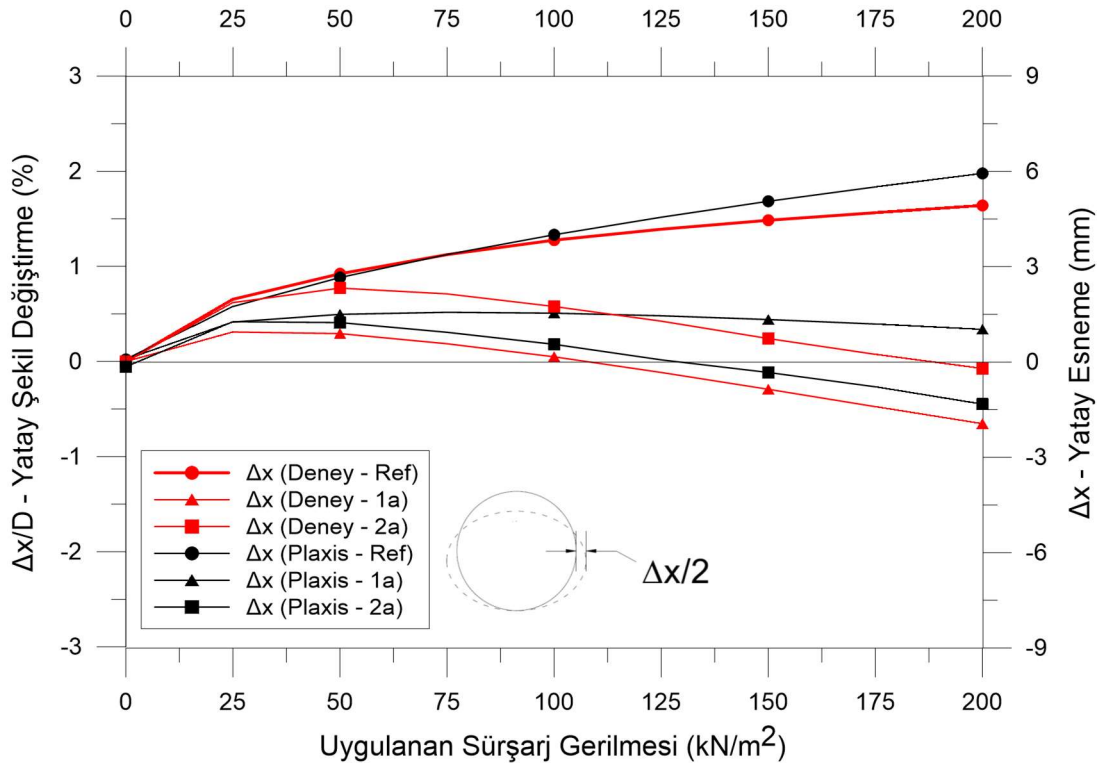
Şekil 2.29 ve Şekil 2.30'da belirtilen grafikte görüldüğü üzere yatay esneme değerlerinin negatif olması borunun yatayda daraldığını, pozitif değerler ise genişlediğini göstermektedir. EPS10 kullanıldığında esneme değerleri, Konfigürasyon #2 durumunda negatif bölgeye geçmiş, bir diğer anlamı ile daralmış, EPS15 kullanıldığında bu fark sayısal olarak yaklaşık 3 mm'ye karşılık gelmektedir.

İki farklı EPS yoğunluğu ile elde edilen değerler birbirleri ile karşılaştırıldığında EPS15 ile yapılan deney ve analizlerde EPS10 kullanımına göre daha uyumlu sonuçlar elde edildiği ortaya çıkmıştır. Bu analizlerde HDPE boru ile birlikte EPS malzeme kullanımının yatay esnemeleri azalttığı görülmektedir. İki durumda göz önüne alınarak yapılan karşılaştırmada ise sıfır değerine en yakın yatay esneme değerleri Konfigürasyon #2'de meydana gelmiştir.

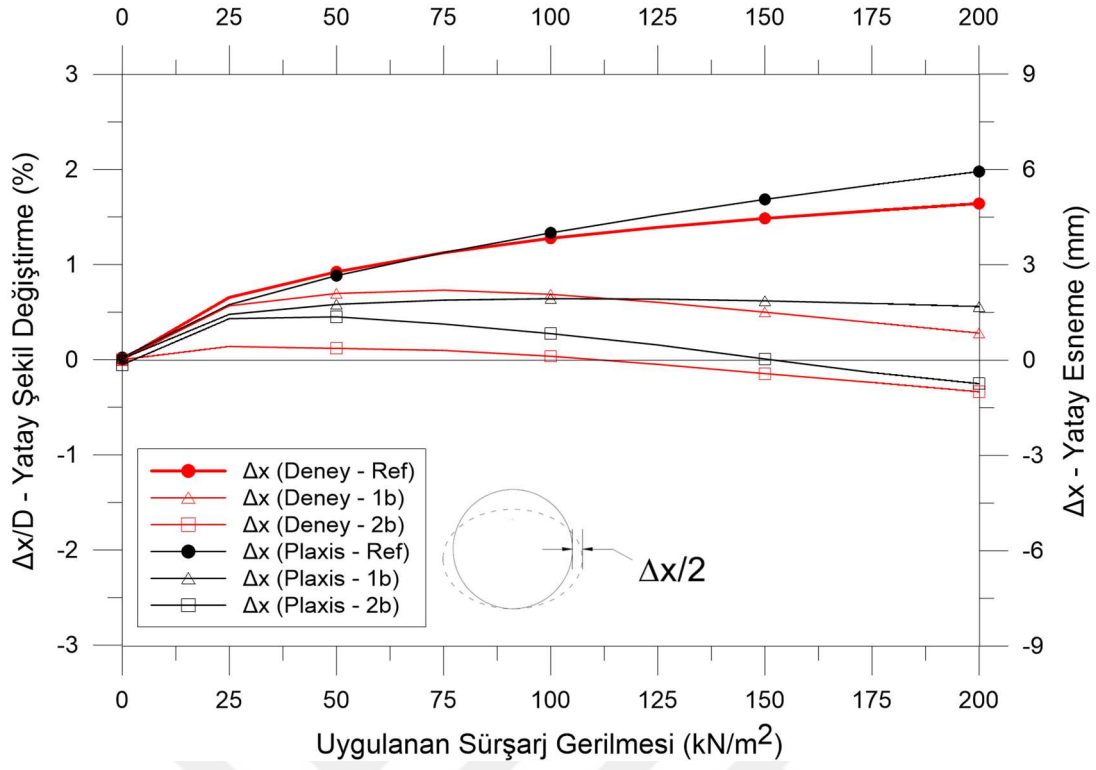
Elde edilen sayısal verilerin yanı sıra deney sonuçlarının ve sayısal analiz verilerinin artış ve azalış eğilimlerini gösteren yük - esneme eğrileri birbirine oldukça benzemektedir. Buradan yola çıkılarak sayısal analizlerin ölçüm sonuçlarını yaklaşık olarak temsil ettiği

ve aynı modeller kullanılarak deney yapılamayan durumlara karşılık olarak sayısal analizlerin yapılabileceğini göstermektedir.

Ölçümler ile hesaplar arasındaki farklılıkların; 3 boyutlu deney ile 2 boyutlu sayısal modelleme arasındaki farklar, laboratuvar deneyleri sırasında meydana gelen aksaklıklar, parametrelerin (özellikle boru ve EPS) farklı yaklaşımlar ile Plaxis üzerinden modellenmesi vb. gibi sebeplerden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 2.29 EPS geometrilerine göre borudaki yatay esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS10)



Şekil 2.30 EPS geometrilerine göre borudaki yatay esneme değerlerinin karşılaştırılması (EPS15)

LABORATUVAR DENEYİ ÜZERİNDEN YAPILAN SAYISAL ANALİZLER

3.1 Sayısal Analizler ve Plaxis 2D Kullanımı

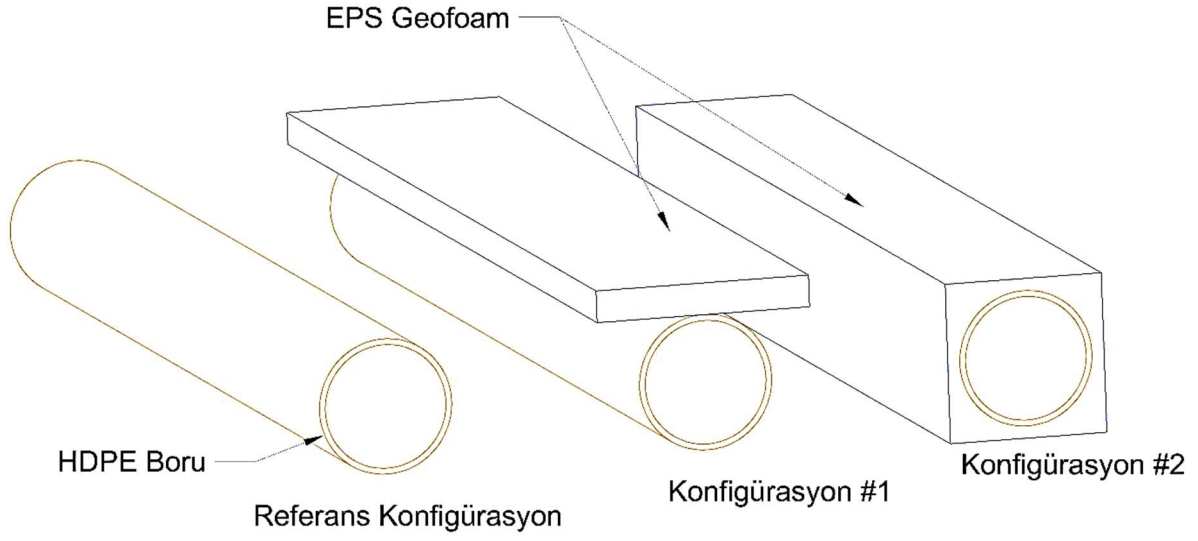
PLAXIS 2D, geoteknik mühendisliği ve kaya mekaniğindeki problemleri iki boyutlu deformasyon ve stabilite analizleri ile çözmeyi amaçlayan ve bu işlemi sonlu elemanlar yöntemi ile yapan bir mühendislik yazılımıdır. PLAXIS, inşaat ve geoteknik mühendisliği endüstrisindeki birçok mühendislik şirketleri ve kurumları tarafından dünya çapında kullanılmaktadır. İçinde barındırdığı uygulamalar kazılardan, dolgulara, temellerden tünel açma ve madencilik problemlerine kadar uzanmaktadır. Arayüzünde bulunan profesyonel çizim modülü sayesinde başka bir çizim programı gerektirmeksizin modellemeye imkân verebilmektedir. Çalışmada yapı – zemin etkileşim problemleri için “Plaxis 2D 2018” sürümü kullanılmıştır. Çalışmada belirtildiği üzere laboratuvar deneyi modellemesi aşamalı inşa modeli ile yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur.

3.2 Parametre değişimlerinin incelenmesi

Akınay (2017) tarafından yapılan gerçek ölçekli laboratuvar deneyinde EPS malzemenin yoğunluğu ve EPS malzemenin boru – zemin arasındaki konumu değiştirilmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, deneysel olarak incelenen malzeme davranışlarının ve malzemelerin birbirileri ile olan etkileşimlerinin sayısal olarak analizi gerçekleştirilerek karşılaştırılması Bölüm 2’de sunulmuştur. Ancak boru çapındaki, çember rijitliğindeki ve EPS yoğunluğundaki farklılıkların HDPE boru-zemin davranışına etkilerinin araştırılması için parametrik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 EPS Malzemenin Yoğunluğunun ve Geometrisinin Değişimi

EPS Geofom malzeme geometrisinin değişimi daha önce Bölüm 2.1 içerisinde Şekil 2.3 ile gösterilmiştir. Bu bölümde belirtildiği üzere kullanılan geometriler laboratuvarında yapılan deney koşulları dikkate alınarak Şekil 3.1’de üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 EPS Geofoam malzemenin farklı geometriler ile kullanıldığı konfigürasyonların üç boyutlu görselleri

EPS Geofoam malzemenin yoğunluğunun değişimi ise Bölüm 2.1’de anlatılmış olup Tablo 2.2 ile detaylandırılmıştır. Bu bölümde daha önce belirtildiği üzere yoğunluğu 10 kg/m^3 olan EPS malzeme ile yapılan sayısal analizlerin yoğunluk indisi “a”, yoğunluğu 15 kg/m^3 olan EPS malzeme ile yapılan sayısal analizlerin yoğunluk indisi “b” olarak alınmıştır.

Bu bölümde sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar “Bölüm 2.3 – Kalibre Edilmiş Verilerin Karşılaştırılması” içerisinde gösterildiği şekilde ele alınmıştır. Önce sırasıyla EPS geometrilerinin kendi aralarındaki gerilme, oturma ve esneme değişimleri incelenmiş, ardından bu geometrilerin EPS Geofoam malzeme yoğunluğu ile olan ilişkilerine bakılmıştır.

Analiz sonuçları karşılaştırılırken bar grafikler kullanılmış ve kullanılan bu grafiklerde analiz sonuçları 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa olmak üzere 4 farklı gerilme kademesi için incelenmiştir. Bu gösterim şekline dair görsel açıklama Şekil 3.2 ile paylaşılmıştır.



Şekil 3.2 Kullanılan bar grafiklerine dair açıklama

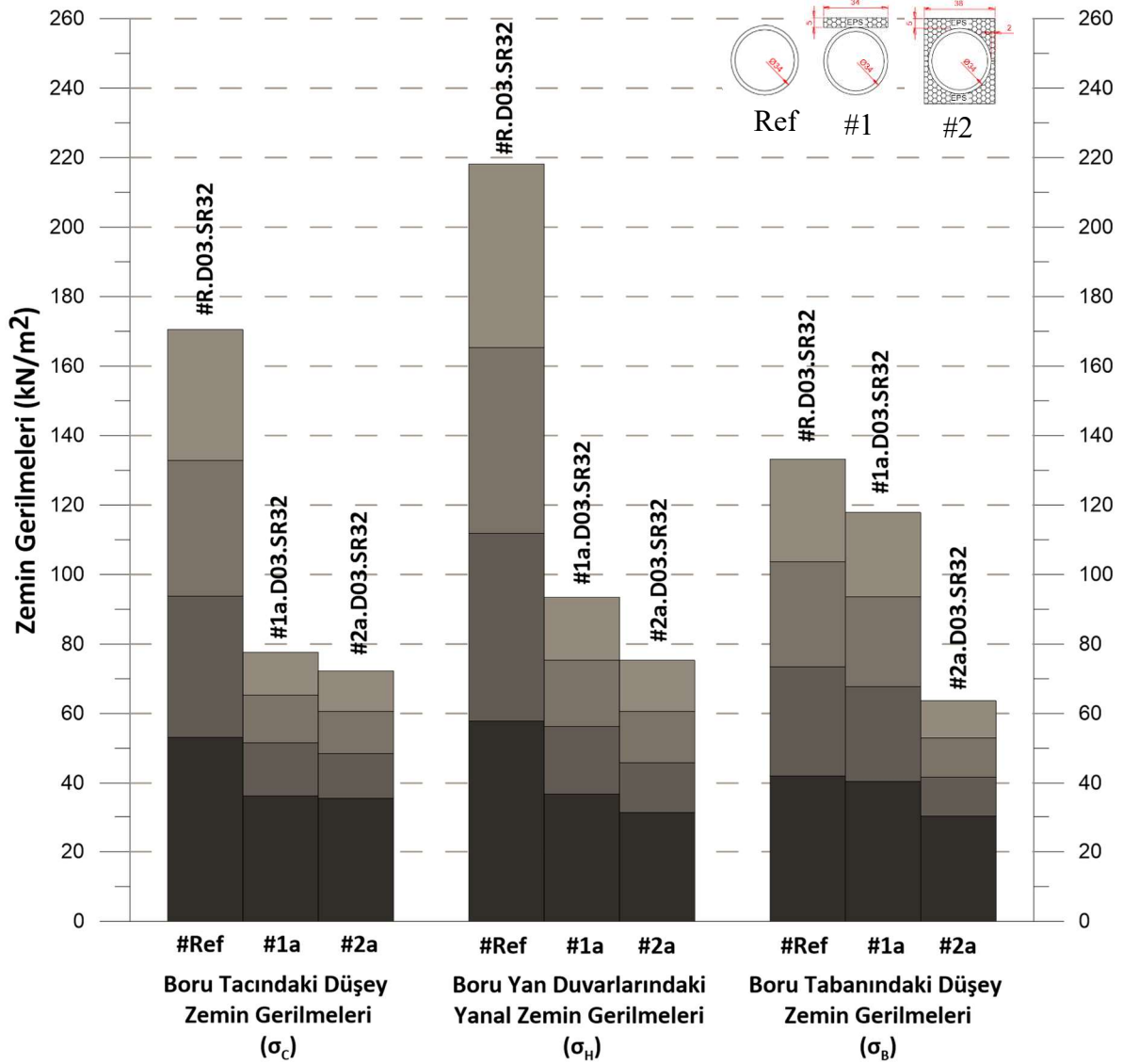
Şekil 3.3'te bulunan bar grafik yardımı ile borunun taç ve taban kısmına etkiyen düşey zemin gerilmeleri ve yan duvarına etkiyen yatay zemin gerilmeleri Konfigürasyon #1 ve Konfigürasyon #2 geometrileri için karşılaştırılmıştır. Bu grafikte EPS Geofom yoğunluğu 10 kg/m^3 olan analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Şekil 3.4'te ise borunun taç ve taban kısmına etkiye düşey gerilmeler ve yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler Konfigürasyon #1 geometrisi farklı için EPS Geofom malzeme yoğunluklarına göre karşılaştırılmıştır. Bu grafikte EPS Geofom yoğunluğu #1a analizleri için 10 kg/m^3 ve #1b analizleri için 15 kg/m^3 olarak değerlendirilmiştir.

Son olarak Şekil 3.5'te, borunun taç ve taban kısmına etkiye düşey gerilmeler ve yan duvarına etkiyen yatay gerilmeler Konfigürasyon #2 geometrisi için farklı EPS Geofom malzeme yoğunluklarına göre karşılaştırılmıştır. Bu grafikte EPS Geofom yoğunluğu #2a analizleri için 10 kg/m^3 ve #2b analizleri için 15 kg/m^3 olarak değerlendirilmiştir.

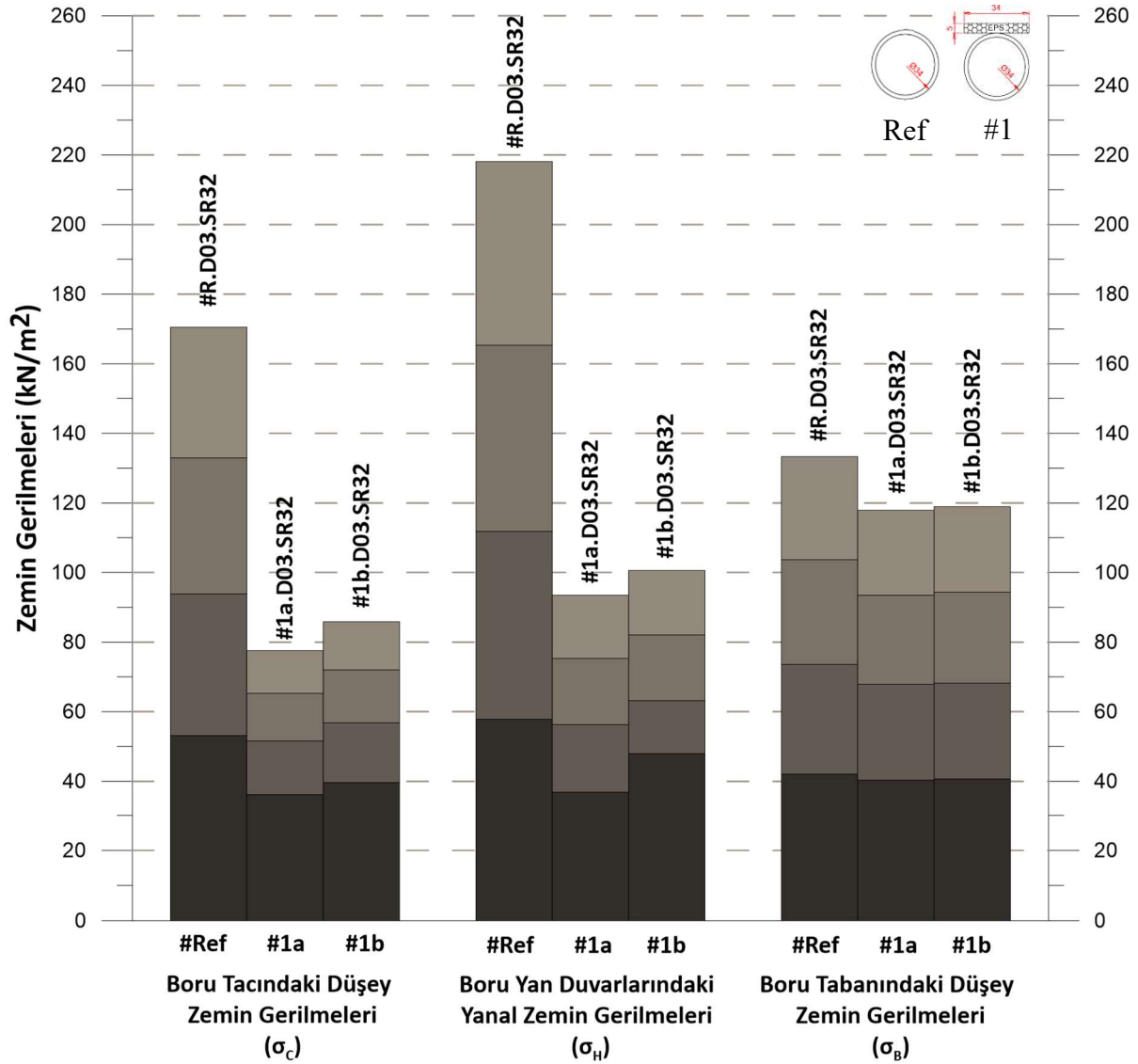
Şekil 3.3'te farklı konfigürasyonlar için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında referans deneye göre düşey ve yanal zemin gerilmelerinin oldukça azaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra borunun çepeçevre EPS ile sarılı olması durumunun borunun yalnızca üzerinde EPS olması durumuna göre borunun üzerine gelen zemin

gerilmeleri bakımından daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi, boru tacındaki, tabanındaki düşey zemin gerilmeleri ve yan duvarındaki yatay zemin gerilmeleri referans deneyde sırası ile yaklaşık 170 kPa, 220 kPa ve 130 kPa iken; #1a.D03.SR32 analizlerinde bu değerler yaklaşık olarak 80 kPa, 90 kPa ve 120 kPa olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde bu değerler #2a.D03.SR32 analizleri için yaklaşık 70 kPa, 75 kPa ve 65 kPa olarak hesaplanmıştır.



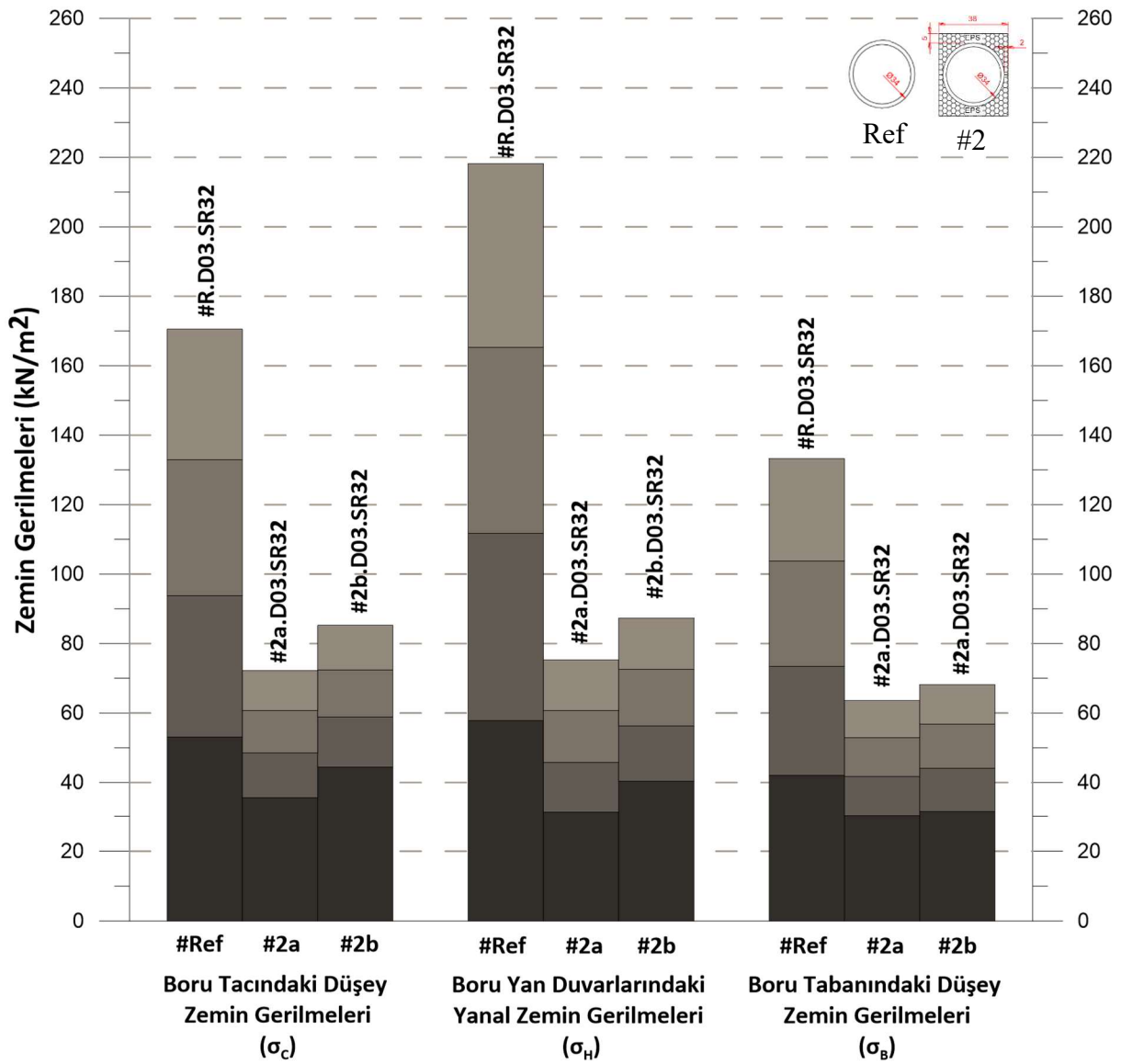
Şekil 3.3 SR32 rijitliğinde ve 300 mm çapındaki boruya etkileyen yan ve düşey zemin gerilmelerinin EPS10 için karşılaştırılması

Şekil 3.4'te ise farklı EPS Geofom malzeme yoğunluğu kullanılarak yapılan analizlerde, referans deneye göre azalan gerilmelerin yanı sıra EPS Geofom malzemenin yoğunluğunun artması ile boru üzerine gelen gerilmelerin bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere boru tacındaki, tabanındaki ve yan duvarındaki zemin gerilmeleri #1a.D03.SR32 analizinde yaklaşık olarak 80 kPa, 90 kPa ve 120 kPa olarak ölçülmüş iken, aynı noktadaki bu değerler #1b.D03.SR32 analizinde yaklaşık 10 kPa, 10 kPa ve 5 kPa artış göstermiştir. Grafikten çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise EPS Geofom malzemenin yoğunluğunun değişimi en fazla boru tacındaki düşey zemin gerilmelerini etkilerken, en az boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerini etkilemektedir.



Şekil 3.4 SR32 rijitliğinde ve 300 mm çapındaki boruya etkileyen yanal ve düşey zemin gerilmelerinin Konfigurasyon #1 geometrisi için farklı EPS10 ve EPS15 için karşılaştırılması

Şekil 3.5 ile bir önceki duruma benzer olarak Konfigürasyon #2 için yapılan farklı EPS Geofaom malzeme yoğunlukları için, referans deneye göre azalan gerilmelerin yanı sıra EPS Geofaom malzemenin yoğunluğunun artması ile boru üzerine gelen gerilmelerin bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere boru tacındaki, tabanındaki ve yan duvarındaki zemin gerilmeleri #2a.D03.SR32 analizinde yaklaşık olarak 70 kPa, 75 kPa ve 65 kPa olarak hesaplanmış iken, aynı noktadaki bu değerler #2b.D03.SR32 analizinde yaklaşık 85 kPa, 90 kPa ve 70 kPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler referans deneyde sırası ile yaklaşık 170 kPa, 218 kPa ve 132 kPa olarak elde edilmiştir.

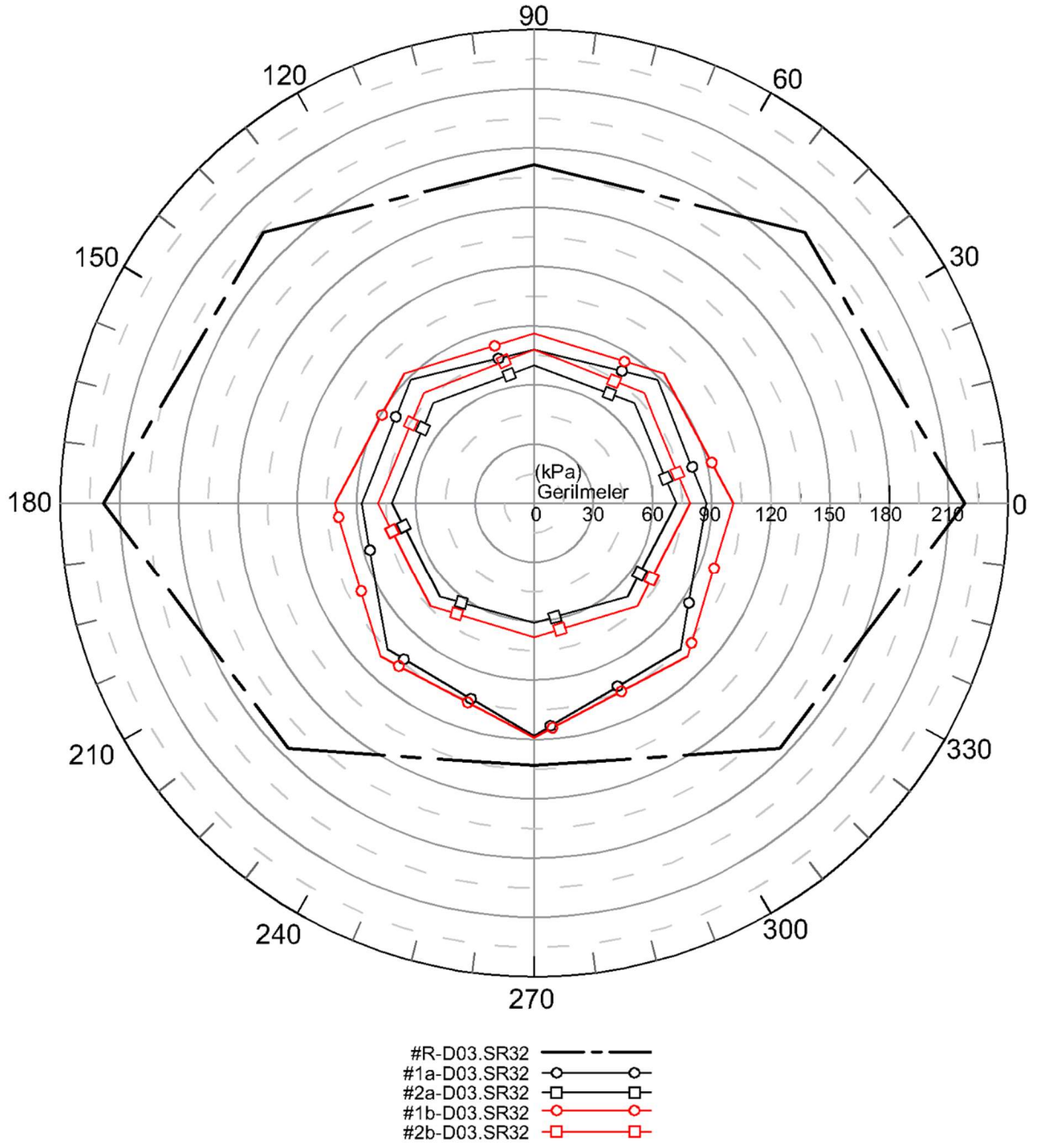


Şekil 3.5 SR32 rijitliğinde ve 300 mm çapındaki boruya etkileyen yan ve düşey zemin gerilmelerinin Konfigürasyon #2 geometrisi için EPS10 ve EPS15 için karşılaştırılması

Analizler ile elde edilen verilerin tamamı Şekil 3.6'da çembersel grafik yardımı ile gösterilmiştir. Bu değerler sayısal olarak karşılaştırıldığında Konfigürasyon #1 ile EPS10 Geofom malzemenin birlikte kullanımında (#1a.D03.SR32) son yük kademesi değerlerinde referans deneye göre (#R.D03.SR32) boru tacındaki düşey zemin gerilmelerinin %54, boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin %12 ve boru yan duvarına etkiyen yatay zemin gerilmelerinin %57 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu analizde kullanılan EPS Geofom malzemenin yoğunluğu artırılarak (EPS15 kullanılarak) tekrar bir sayısal çözümleme yapıldığında ise (#1b.D03.SR32) referans deney verilerine göre boru tacındaki düşey zemin gerilmelerinin %50, boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin %11 ve boru yan duvarına etkiyen yatay zemin gerilmelerinin %54 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Konfigürasyon #2 incelendiğinde ise referans deneyde meydana gelen gerilmelerin Konfigürasyon #1'de elde edilen değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Özellikle boru tabanında EPS Geofom malzeme bulunmasından dolayı referans ve Konfigürasyon #1 deneylerine göre oldukça büyük gerilme farklılıkları bulunmaktadır. Bu değerler sayısal olarak incelendiğinde ise boru tacındaki düşey zemin gerilmelerinin azalma yüzdesi EPS10 ile yapılan analizlerde (#2a.D03.SR32) %58 ve EPS15 ile yapılan analizlerde (#2b.D03.SR32) %54 olarak hesaplanmıştır. Boru yan duvarlarına etkiyen gerilmeler ise birbirine oldukça yakın olmakla beraber sırasıyla EPS10 ve EPS15 için %65 ve %64'tür. Boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerin ise referans deneye göre EPS10 analizlerinde %52, EPS15 analizlerinde %49 azaldığı görülmüştür.

Bahsedilen bu sayısal değerler çembersel grafik ile değerlendirildiğinde özellikle referans deneyde meydana gelen düşey ve yanal gerilmelerin hangi oranla azaldığı göze çarpmaktadır. Aynı şekilde Konfigürasyon #1 analizlerinde boru tabanındaki düşey gerilmelerin referans deneye göre azaldığı, Konfigürasyon #2 analizlerinde ise bu değerler oldukça düşük değerlere ulaştığı görülmektedir. Son olarak zeminin boruya uyguladığı yanal zemin gerilmelerinin yine referans deneye göre oldukça düşük olduğu Şekil 3.6'da görülmektedir.



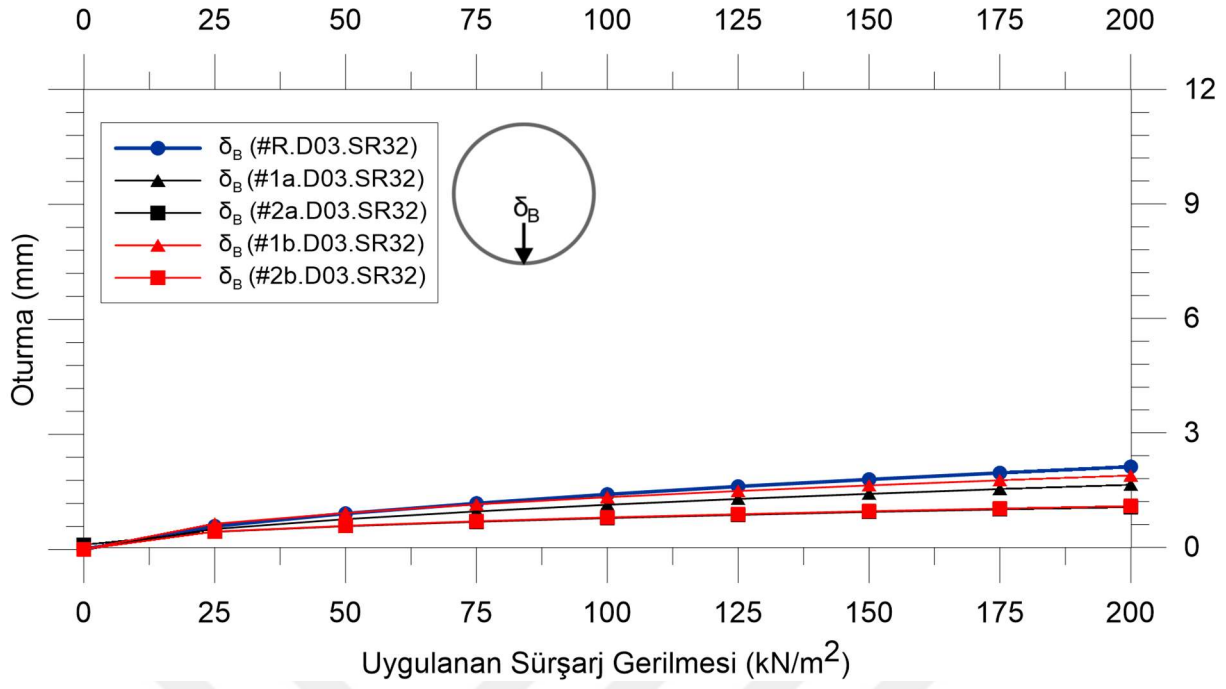
Şekil 3.6 200 kPa yükleme adımında farklı konfigürasyonlar ve EPS10 ve EPS15 için yatay ve düşey zemin gerilmelerin çembersel grafiği

Analizlerde kullanılan EPS Geofom malzemenin yoğunluk ve geometri değişimi göz önünde bulundurularak yapılan analiz sonuçlarında oturma değerlerinin yoğunluk değişiminden çok fazla etkilenmediği, geometri değişiminden ise oldukça etkilendiği görülmüştür. Boru tabanında (δ_B) ve borunun merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin içerisinde meydana gelen iki farklı oturma (δ_w) değeri göz önünde bulundurulduğunda ortaya çıkan grafikler Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 ile sunulmuştur. Bu grafiklerde oturma değerleri mm cinsinden olmak üzere 0 kPa'dan 200 kPa yükleme aşamasına kadar her 25 kPa'lık yükleme adımları için gösterilmiştir.

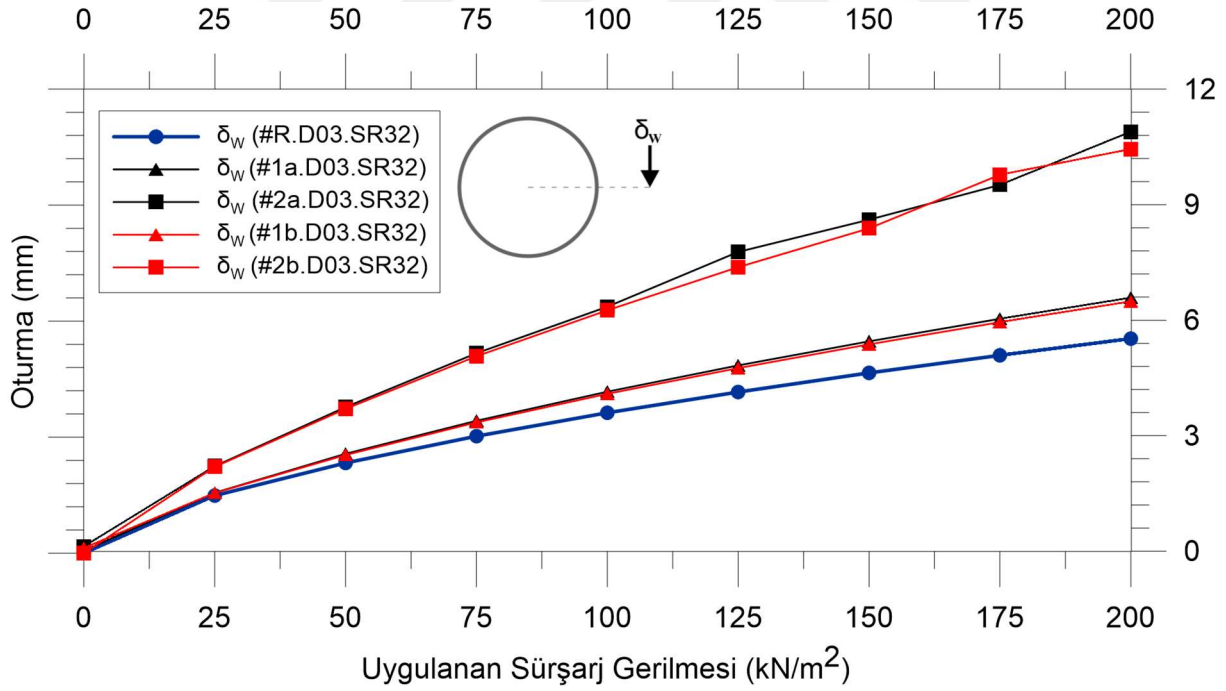
İlk olarak Şekil 3.7'de belirtildiği üzere boru tabanında meydana gelen oturmalar incelendiğinde EPS Geofom malzeme kullanımının boru tabanındaki zemin oturmalarını bir miktar azalttığı görülmüştür. Bu değer mavi renk ile gösterilen referans deneyde 2.16 mm iken borunun EPS ile çepeçevre sarılması durumunda 10 kg/m^3 yoğunluklu EPS kullanıldığında 1.10 mm, 15 kg/m^3 yoğunluklu EPS kullanıldığında ise 1.13 mm'ye kadar azalmıştır. Bu noktada EPS yoğunluğunun boru tabanında meydana gelen zemin oturmalarına doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır.

Zemin içerisinde kemerlenme etkisinden dolayı meydana gelen zemin oturmaları ise Şekil 3.8'de görüldüğü üzere EPS Geofom malzemenin geometrik değişimlerinden doğrudan etkilenmiştir. Mavi renkle gösterilen referans deney göz önüne alındığında boru üzerine EPS yerleştirilmesi ile zemin içerisindeki oturmalar 5.55 mm değerinden 6.61 mm değerine kadar artarken borunun çepeçevre EPS ile sarılması durumunda bu değer yaklaşık iki katına ulaşıp 10.90 değeri elde edilmiştir. EPS yoğunluğunun artması durumunda ise mevcut zemin oturmalarında dikkate alınacak artışlar meydana gelmemiştir.

Ayrıca, daha önce Şekil 3.3'te sunulan boru tacına, tabanına ve yan duvarlarına etkileyen zemin gerilmelerinin kullanılan EPS Geofom ile azalması durumunda yüklerin zemine tekrar iletildiği bu alt başlıkta belirtilmiştir. Bu noktada tekrar zemine iletilen yüklerin sebebiyet verdiği oturmalar Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de ortaya konmuş olup birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.7 EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre boru tabanındaki zemin oturması değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.8 EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre boru merkezinden 35 cm uzaklıktaki oturma değerlerinin karşılaştırılması

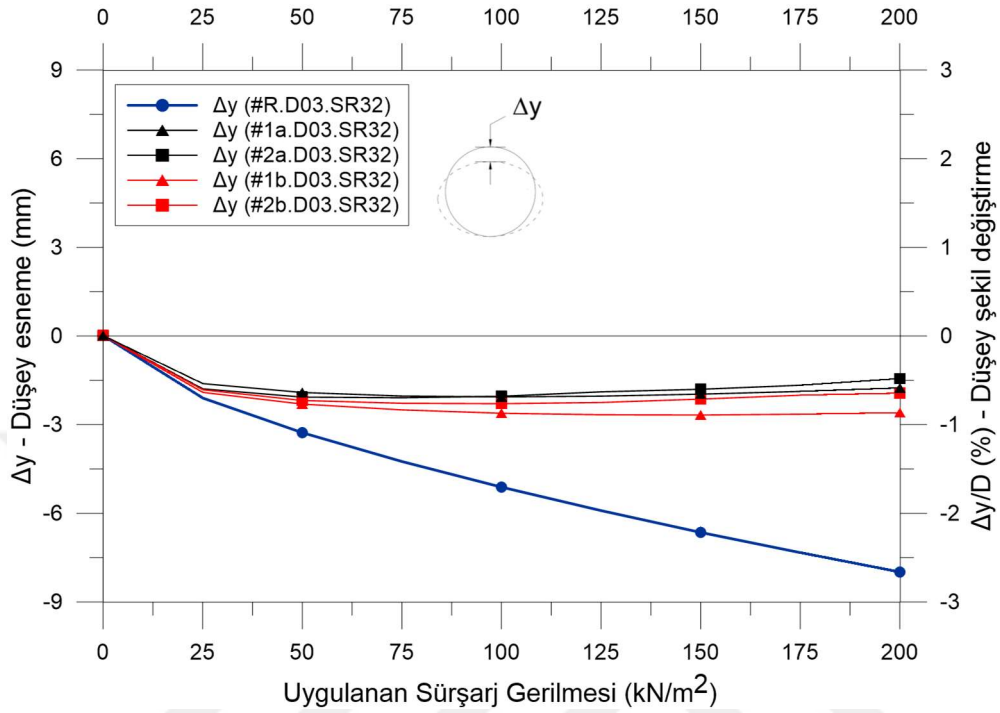
EPS Geofom malzemenin farklı geometrilerde ve yoğunluklarda kullanımına ilişkin gerilme ve oturma sonuçlarının değerlendirilmesinin ardından son ve en önemli olarak boruda meydana gelen esnemeler ele alınmıştır. Bu noktada borunun yük altında davranışı en iyi şekilde gözlemlenebilmektedir. Öncelikle boruda meydana gelen yatay esneme değerleri Şekil 3.9 ve düşey esneme değerleri ise Şekil 3.10 ile paylaşılmıştır. Grafiklerde belirtilen değerler sol düşey ekseninde esneme (mm), sağ düşey ekseninde ise şekil değiştirme yüzdesi (%) olmakla birlikte Ø300 mm çapa sahip boru için elde edilmiştir.

Öncelikle 200 kPa yükleme altında bulunan bir borunun EPS Geofom malzeme kullanılmadığı durumda düşeyde yaklaşık -%2.67 (-8.02 mm) kadar esneme gerçekleştirdiği Şekil 3.9'da görülmektedir. Burada “-“ değeri esneme değerinin negatif olmasını, bir diğer anlamda borunun düşeyde kışalmasını temsil etmektedir. Aynı koşullarda boru üzerine EPS yerleştirildiğinde bu esnemeler -%0.59 (-1.77 mm) ve borunun çepeçevre EPS ile sarılması durumunda -%0.46 (-1.46 mm) değerine kadar azalmaktadır. EPS Geofom malzemenin yoğunluğu artırılarak yapılan analizlerde ise bu değerlerin Konfigürasyon #1 için -%0.87 (-2.61 mm) ve Konfigürasyon #2 için -%0.65 (-1.95 mm) olduğu görülmektedir. Bu noktada EPS yoğunluğunun artması ile borudaki esnemelerin arttığı, borunun çepeçevre EPS ile sarılması durumunda ise düşeyde en az esneme değeri elde edildiği görülmektedir.

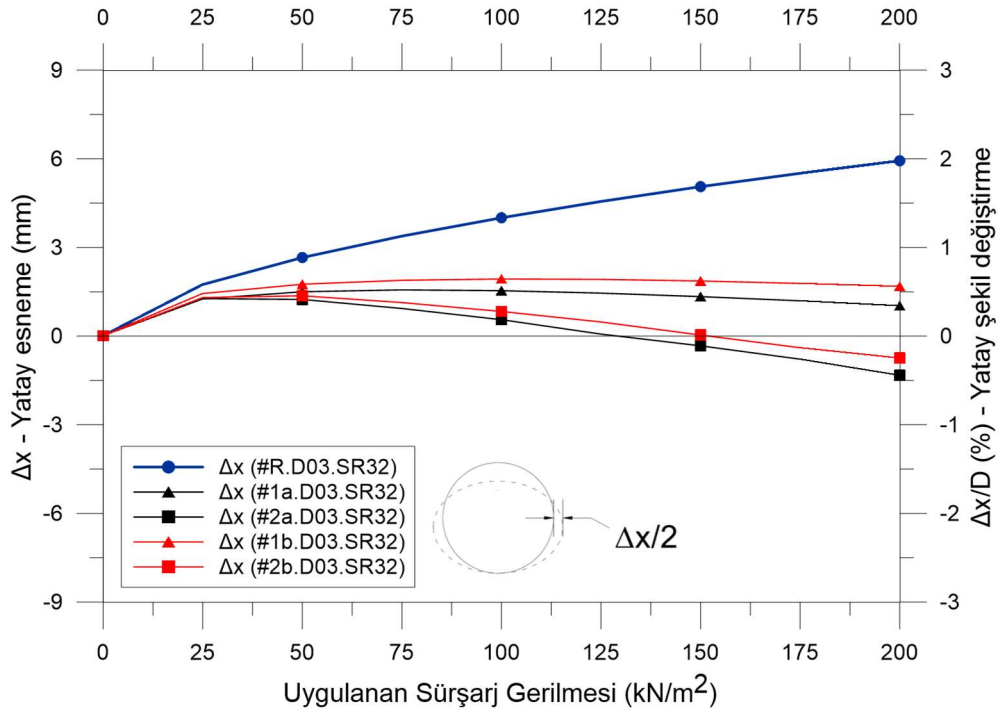
Esneme değerleri yatayda değerlendirildiğinde ise Şekil 3.10'da görüldüğü üzere referans analizine göre oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Referans deneyde elde edilen +%1.98 (5.94 mm) değeri Konfigürasyon #1 ile +%0.34 (1.02 mm), Konfigürasyon #2 ile -%0.45 (-1.34 mm) değerine ulaşmıştır. Bu değerlere bakıldığında borunun çepeçevre EPS ile sarılması durumunda boru yük altında yatayda genişlemek yerine sıkışma eğilimi içerisine girmektedir. Yoğunluk değişimi durumunda ise ortaya çıkan fark en fazla %0.25 değerine ulaşmaktadır.

Yatay ve düşey esnemeler birlikte değerlendirildiğinde Konfigürasyon #1'de borunun düşeyde kışaldığı, yatayda ise genişlediği görülmektedir. Konfigürasyon #2'de ise 150 kPa'a kadar boruda aynı davranışın görüldüğü, bu yük değerinden sonra ise boruda hem düşeyde hem de yatayda kışalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Son olarak yükleme adımları dikkate alınırsa referans durumunda artan yük ile esnemelerin sürekli arttığı gözlemlenirken, Konfigürasyon #2 esnemeler 50 kPa'da yön değiştirerek azalmaya ve yatayda 150 kPa'dan sonra negatif bölgeye geçmeye başlamıştır.



Şekil 3.9 Farklı EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre borudaki düşey esneme değerleri



Şekil 3.10 Farklı EPS geometrileri ve yoğunluklarına göre borudaki yatay esneme değerleri

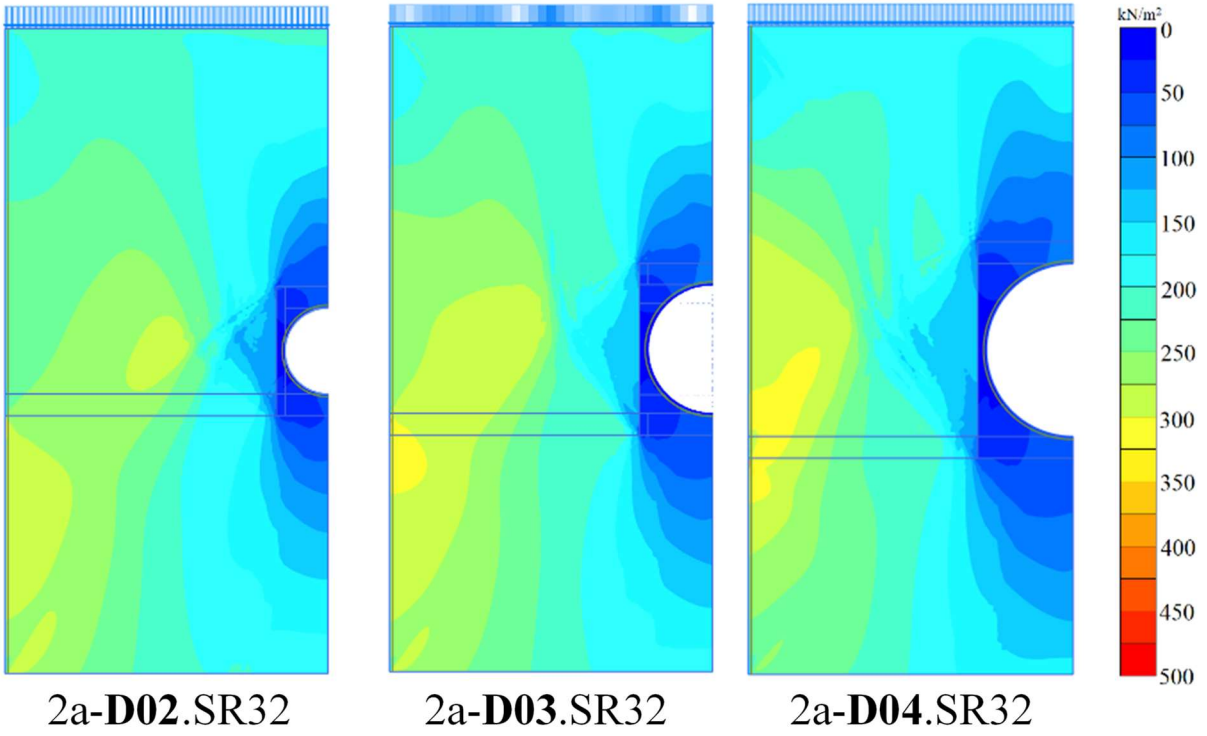
3.2.2 Boru Çapı Değişimi

Laboratuvar deneylerinden farklı olarak incelenen ilk parametre kullanılan borunun çap değişimidir. Bu kapsamda, Akınay'ın (2017) çalışmasında kullanılan boru üreticisinden aynı özelliklere sahip çapı Ø200 mm ve Ø400 mm olan borular için malzeme parametreleri temin edilmiştir. Bu parametrelere ve parametrelerin değişimlerine "2.2.1.2 – Boru ve Tank Duvarı Parametreleri" bölümünde değinilmiştir (Sf. 47).

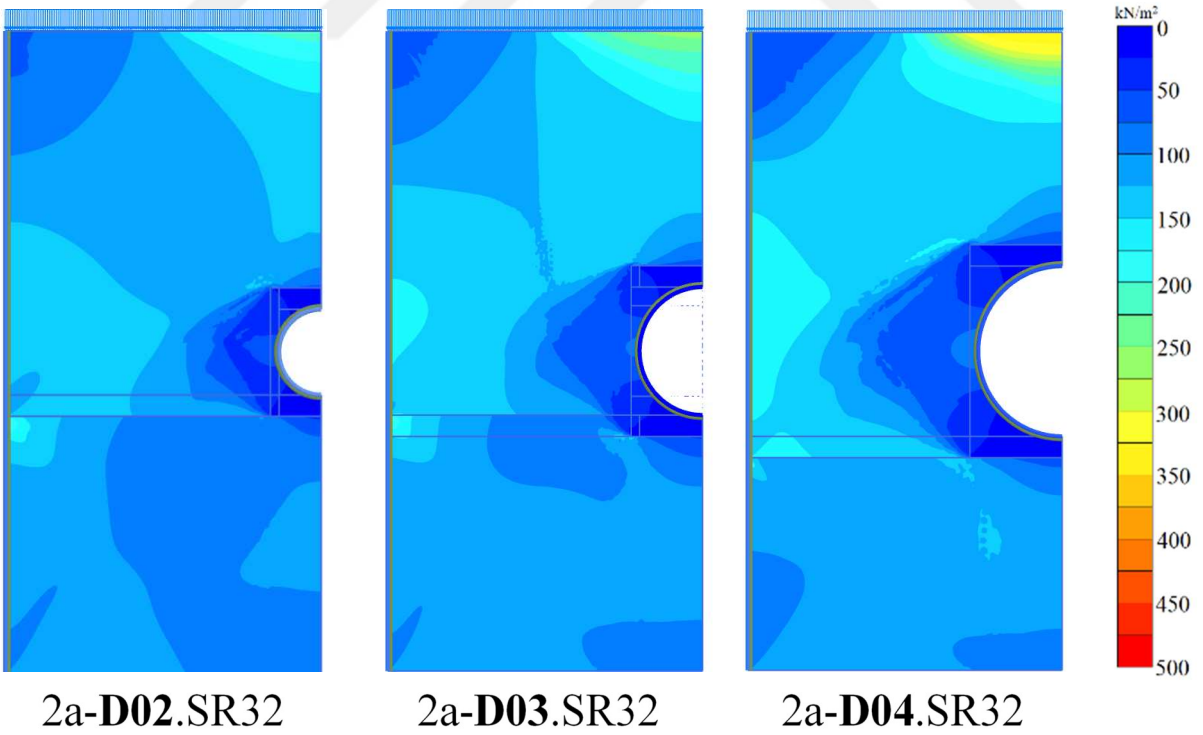
Kullanılan farklı çap parametreleri için yapılan kodlamalarda 200 mm çapa sahip borular için "D02", 300 mm çapa sahip borular için "D03" ve 400 mm çapa sahip borular için "D04" kısaltmaları kullanılmıştır. Bu parametrik değişim ile EPS Gefoam malzemenin geometrik koşulları esnetilmiştir. Konfigürasyon #1 gereği ile EPS Gefoam malzemenin boru çapı kadar bir genişliğinde borunun üzerinde konumlanmasından yola çıkılarak farklı çaplar için EPS malzemenin genişlikleri sabit tutulmamış, boru çapı ile aynı ölçüde alınmıştır. Bu durum Konfigürasyon #2 analizleri için de geçerli olmakla beraber EPS'nin çepeçevre sardığı durumdaki et kalınlıkları sabit tutulmuştur.

Boru çapı parametresinin değişiminin zemin içerisindeki ve boru etrafındaki düşey ve yatay zemin gerilmelerine olan etkisi sayısal analizlerle incelenmiştir. Böylece, boru çapı değişiminin sonuçlara etkileri araştırılmıştır. Boru çapının artmasının boru etrafındaki düşey ve yatay zemin gerilmelerinin etki alanının genişlemesine, bir diğer deyişle gerilme soğanlarının büyümesine yol açmıştır. Aksi durumda ise boru çapı küçüldükçe gerilme soğanlarının küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bu kapsamda yapılan analizlerin sonuçlarına göre, EPS Gefoam malzemenin yoğunluğunun ve geometrisinin genel olarak boru davranışında farklılıklara sebep olmadığı, her durumda çap artışının gerilme soğanlarının büyümesine ve çap azalmasının ise gerilme soğanlarının küçülmesine yol açtığı görülmüştür.

Bu bilgiler ışığında çap değişiminin sayısal olarak incelenmesinden önce Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 ile Konfigürasyon #2 ve EPS10 malzemesi kullanılarak yapılan çap değişimine ait düşey ve yatay gerilme şemaları paylaşılmıştır. Bu şekiller aracılığı ile gerilme soğanlarının çap artışı ve azalışı ile değişimi görülmektedir.

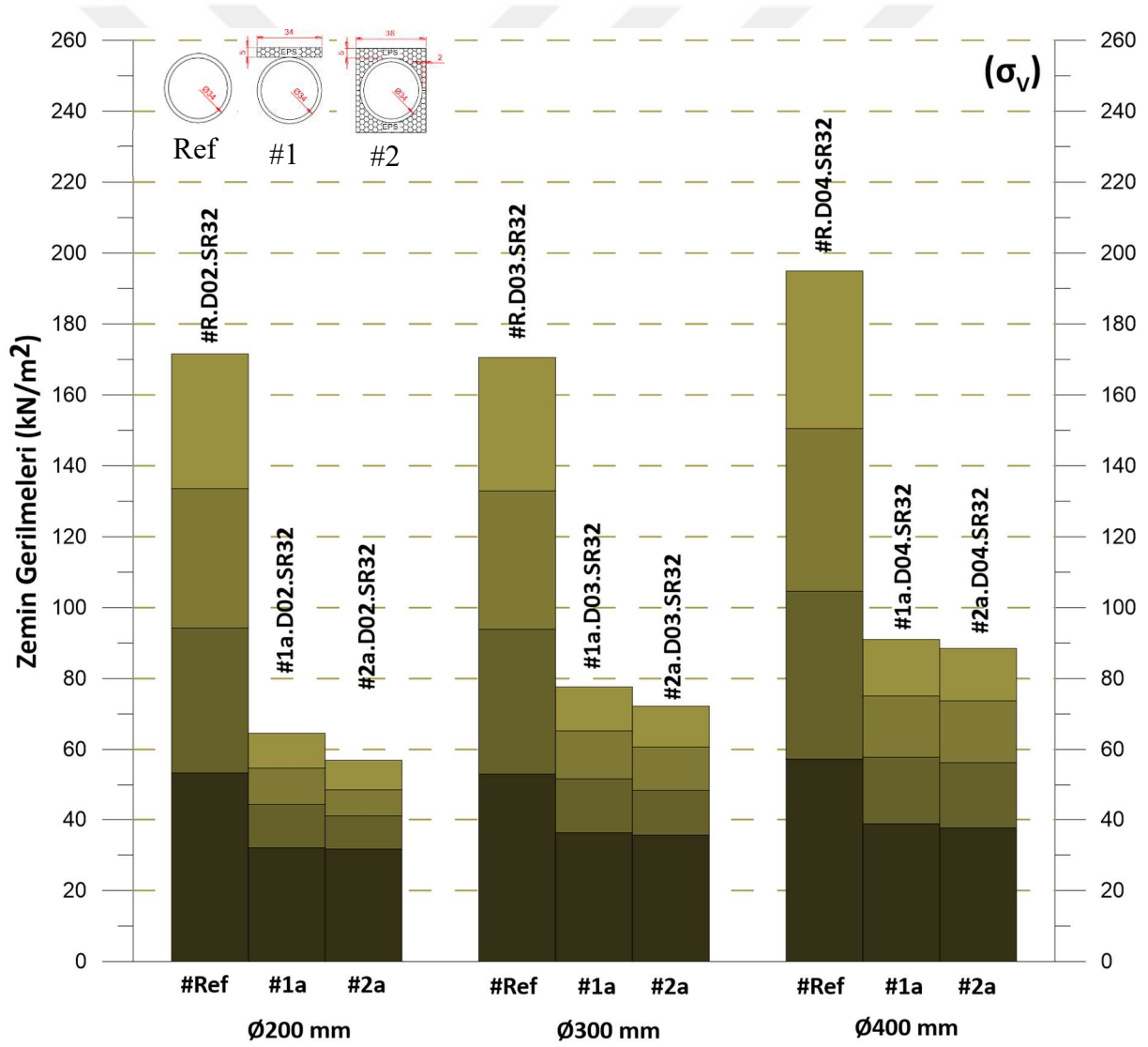


Şekil 3.11 Farklı çaplara göre rijitliği 32 kN/m^2 olan boruda 200 kPa gerilme altındaki düşey gerilmelerin değişimi



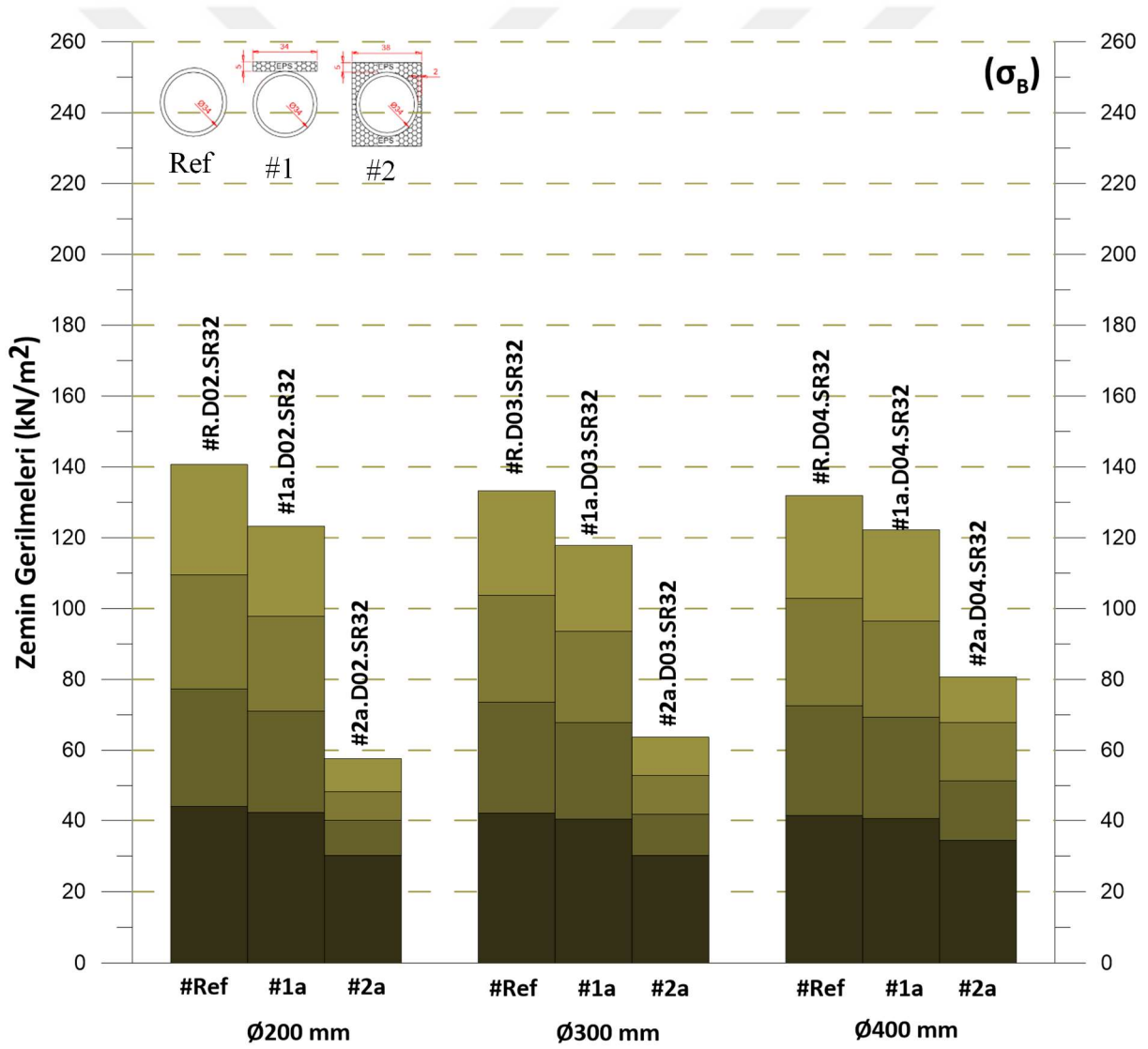
Şekil 3.12 Farklı çaplara göre rijitliği 32 kN/m^2 olan boruda 200 kPa gerilme altındaki yatay gerilmelerin değişimi

Şekil 3.13 ile farklı konfigürasyonlar için yoğunluğu 10 kg/m^3 olan EPS Geofom malzeme ve çember rijitliği 32 kN/m^2 olan boru kullanılarak yapılan analizlerde boru çapı değişiminin boru tacındaki düşey zemin gerilmelerine olan etkisi gösterilmiştir. Bar grafikte görülebileceği üzere referans konfigürasyonda boru çapının 300 mm 'den 400 mm 'ye çıkması durumunda boru tacına gelen düşey zemin gerilmeleri yaklaşık 25 kPa 'lık bir gerilme artışına sebep olurken 200 mm 'ye düşmesi durumunda gerilme değişiminin miktarında bir artış belirlenmiştir. Konfigürasyon #1 ve Konfigürasyon #2 için ise aynı durum söz konusu olmamaktadır. Bu konfigürasyonlar boru çapının artması ile boru üzerine etkiyen düşey zemin gerilmeleri düzenli olarak artış göstermektedir. Ayrıca çapın artması ile iki farklı konfigürasyonda oluşan taç gerilmeleri arasındaki farkın azaldığı da göze çarpmaktadır.



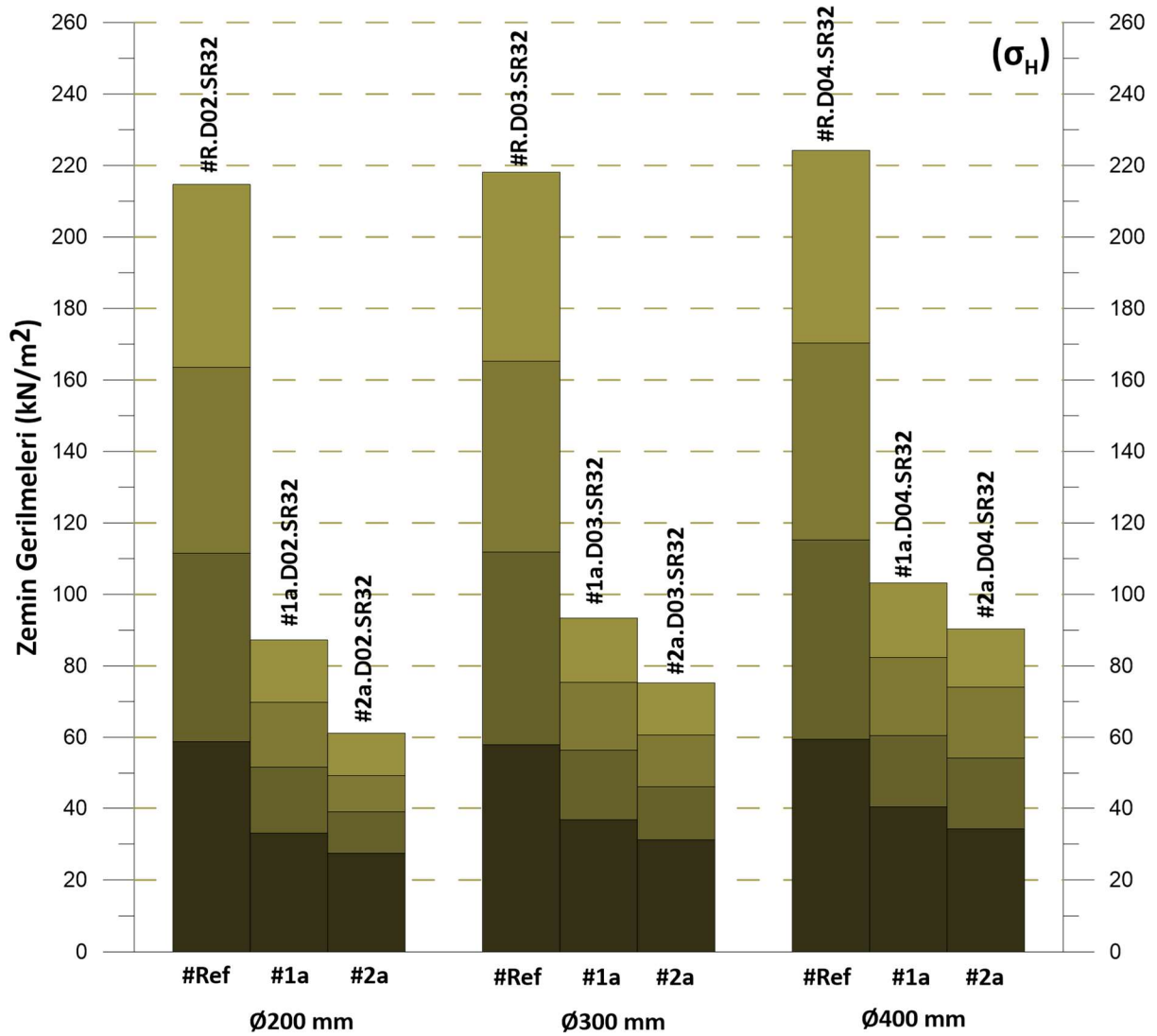
Şekil 3.13 SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde boru tacına etkiyen düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması

Aynı özelliklere sahip boru ve EPS malzeme kullanılması ile boru tabanında oluşan düşey zemin gerilmeleri Şekil 3.14 ile farklı konfigürasyonlar için gösterilmiştir. Bu grafikte görülmektedir ki referans konfigürasyona sahip analizlerde boru çapının azalması taban gerilmelerini çok fazla olmamakla birlikte bir miktarda olsa azaltmaktadır. Konfigürasyon #1 durumunda da referans konfigürasyonunda olduğu gibi önemsenmeyecek farklar görülmektedir. Konfigürasyon #2’de ise boru tabanındaki gerilmelerin 300 mm’den 400 mm’ye çıkması durumunda yaklaşık 20 kPa kadar arttığı gözlemlenmektedir. Bu değişimler sayısal olarak ifade edildiğinde Ø300 mm’lik bir boru için 100 mm’lik çap artışı taban gerilmelerinde %27’ye varan artışlara sebep olabiliyorken, 100 mm’lik çap azalması aynı noktadaki gerilme değerlerinde %10’a varan düşüslere sebep olabilmektedir.



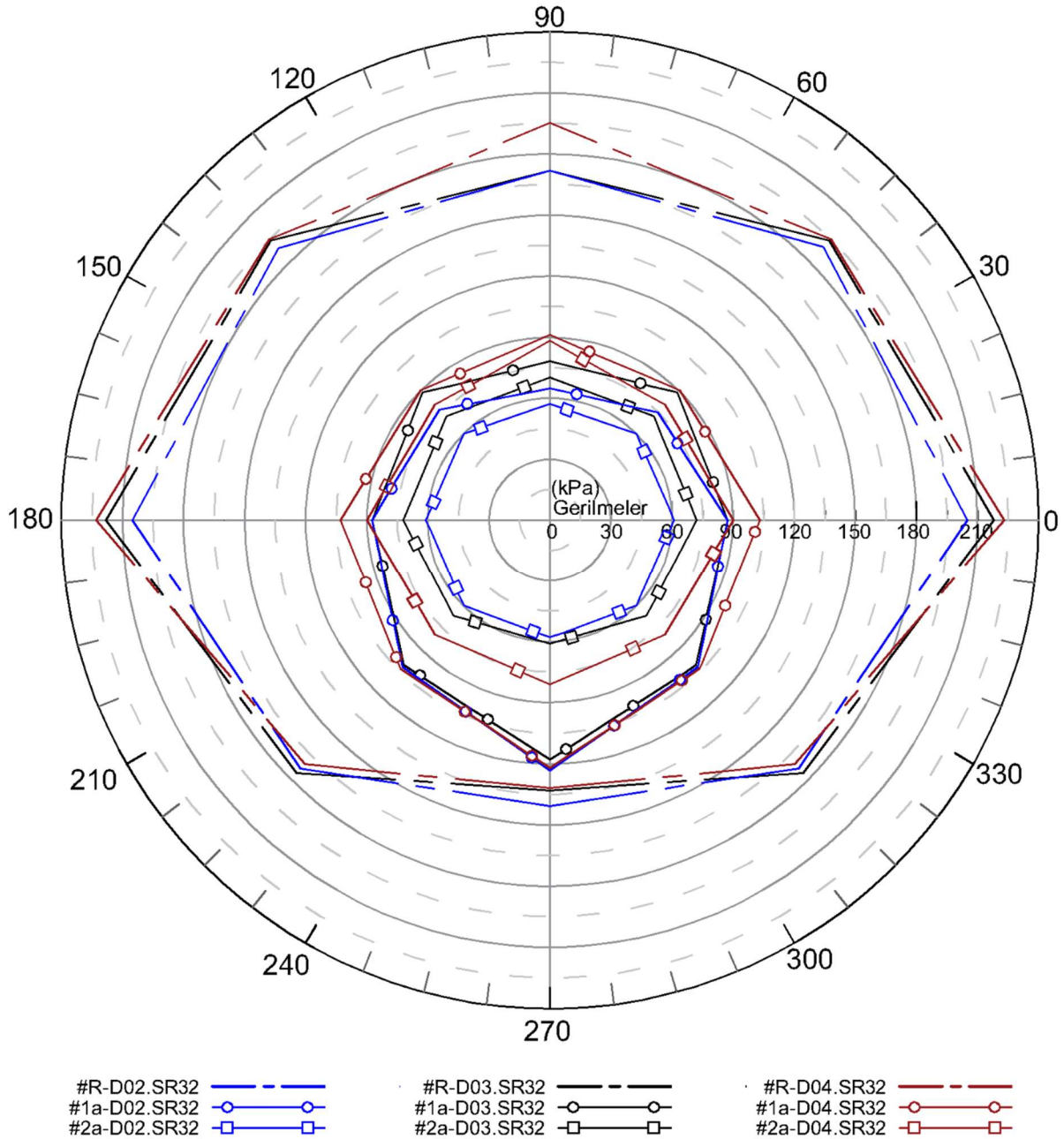
Şekil 3.14 SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde boru tabanına etkiyen düşey zemin gerilmelerinin karşılaştırılması

Şekil 3.15 ile ise farklı konfigürasyonlar aynı değerlere sahip EPS10 malzeme ve boru kullanılarak boru çapı değişiminin boru yan duvarlarındaki yatay zemin gerilmelere etkisi gösterilmiştir. Bu bar grafikte referans konfigürasyonda boru çapının artması düzenli olarak 10 kPa'dan düşük artışlara sebep olmaktadır. Konfigürasyon #1 ve Konfigürasyon #2 için ise yine aynı durum söz konusudur. Bu konfigürasyonlarda boru çapının boru yan duvarlarına etkileyen yatay zemin gerilmelerinin artmasını sağlamaktadır. Ayrıca çapın artması ile iki farklı konfigürasyonda oluşan yatay zemin gerilmelerinin arasındaki farkın taş gerilmelerinde olduğu gibi giderek azaldığı gözle çarpılmaktadır. 300 mm çapa sahip boru göz önünde bulundurulduğunda çap değişiminin %20'ye varan artışlara ve azalmalara yol açtığı söylenebilir.



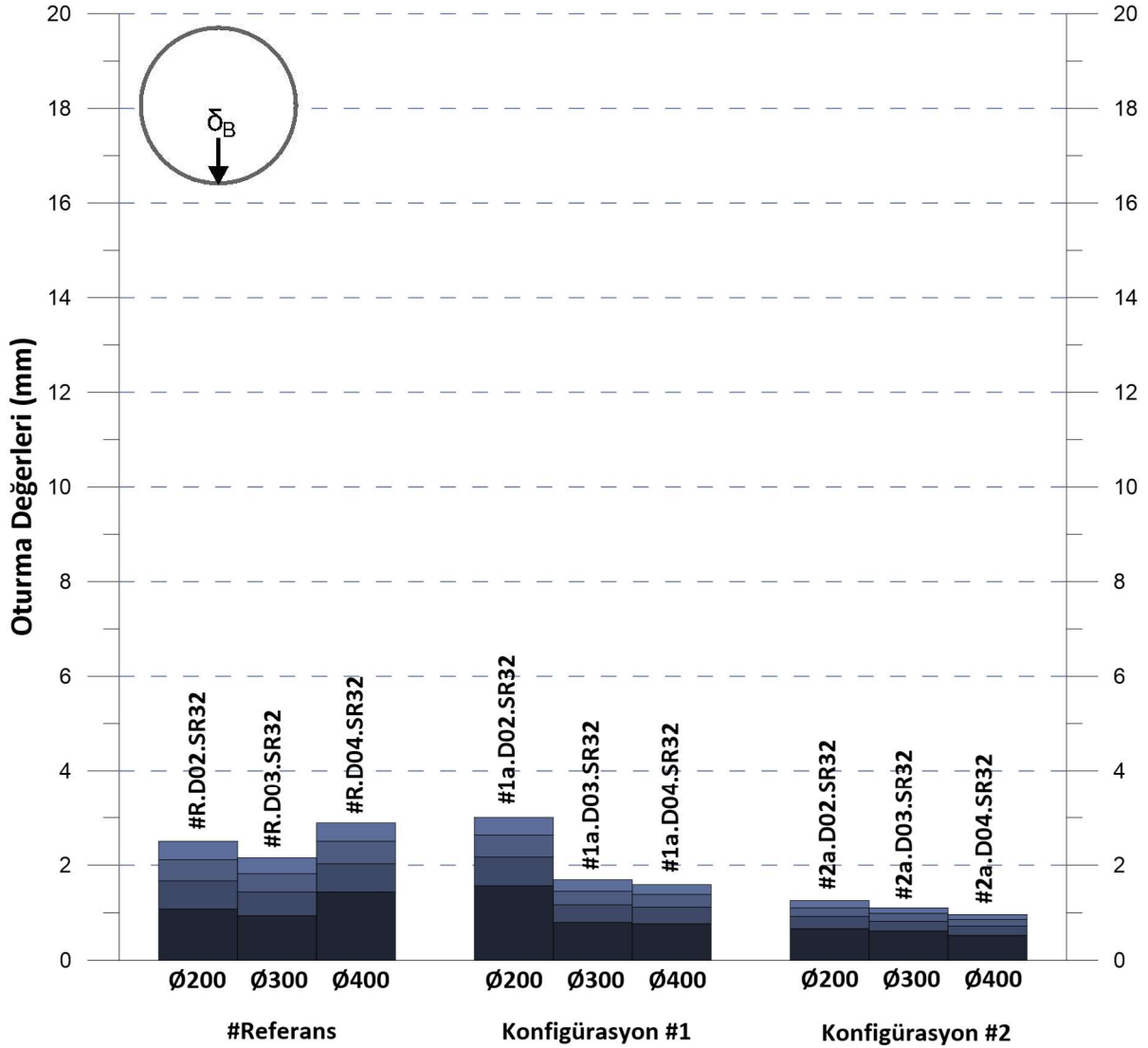
Şekil 3.15 SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde boru yan duvarına etkileyen yatay zemin gerilmelerinin karşılaştırılması

Bu sayısal değerler çembersel grafik ile birlikte değerlendirildiğinde çap değişiminin özellikle Konfigürasyon #2 analizlerinde boru tabanına etkiyen düşey zemin gerilmelerinde ve yan duvara etkiyen yatay zemin gerilmelerinde farklara neden olduğu görülmektedir (Şekil 3.16). Aynı şekilde Konfigürasyon #1 analizlerinde boru tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerin çap artışı ile artış eğiliminde olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.16 SR32 rijitliği ve EPS10 kullanıldığında hesaplanan etkiyen yatay ve düşey zemin gerilmelerin çembersel grafiği

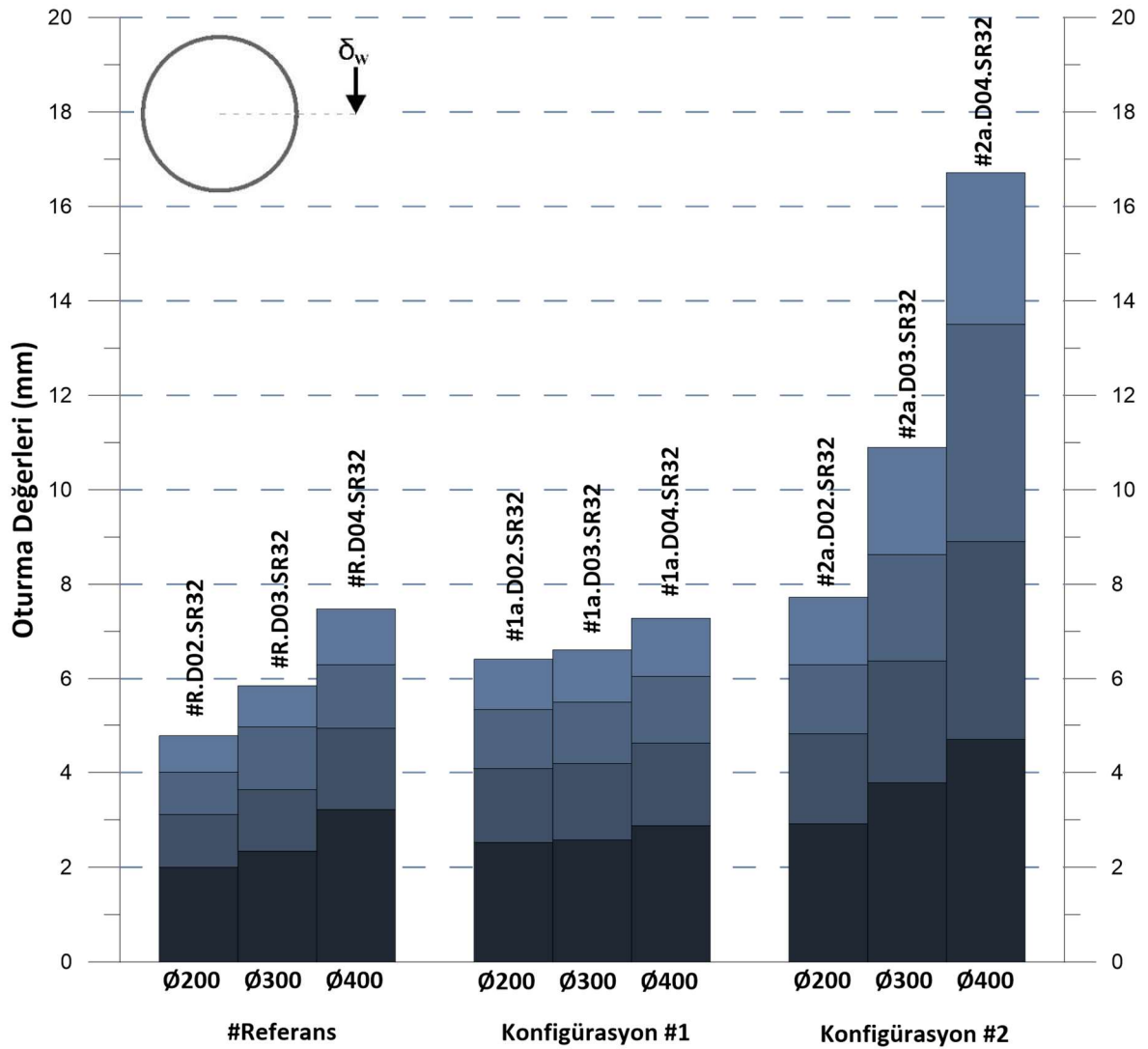
Boru tabanında meydana gelen oturmalar SR32 rijitliğindeki farklı boru çaplarına göre Şekil 3.17’de paylaşılmıştır. Analizlerde yalnızca 10 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS Geofom malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.17 Farklı konfigürasyonlar ve çaplar için boru tabanında meydana gelen oturma değerleri

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde referans konfigürasyonda boru çapı değişiminin boru tabanındaki oturma değerini daima arttırdığı görülmektedir. Konfigürasyon #2'ye bakıldığında ise boru çapı artışı ile meydana gelen oturmaların orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Konfigürasyon #1’de ise Ø300 mm çaplı boru için oturma değeri 1.69 mm iken bu değer Ø200 mm çapında boru için 3.00 mm, Ø400 mm çapında boru için 1.59 mm’dir. Burada boru çapının küçülmesi ile ortaya çıkan oturma artışı göze çarpmaktadır.

İncelenen oturma değerlerinin bir diğeri olan ve kemerlenme etkisi hakkında bilgi veren zemin içerisinde oturma değerleri boru çapı değişimine göre Şekil 3.18’de paylaşılmıştır. Taban oturmalığının aksine artan boru çapına göre zemin içerisinde oturmalarda düzenli artış meydana gelmiştir. Referans konfigürasyon için Ø300 mm boruda çap değişimi oturmalarda yaklaşık ± 2.00 mm kadar fark meydana getirmiştir. Bu fark Konfigürasyon #1’de ± 0.80 mm’yi aşmıyorken, Konfigürasyon #2’de 6 mm’ye yaklaşmaktadır. Böylece, zemin içerisinde meydana gelen oturmalığının artışı gerilme artışları ile orantılı olarak değişmiş, kemerlenme etkisinin aktifleştiğini bir kere daha göstermiştir. Ayrıca oturma değerlerinin değişimini gösteren iki farklı grafik birbiri ile kıyaslandığında tabanda meydana gelen oturmalığının daha düşük olduğu görülmektedir.



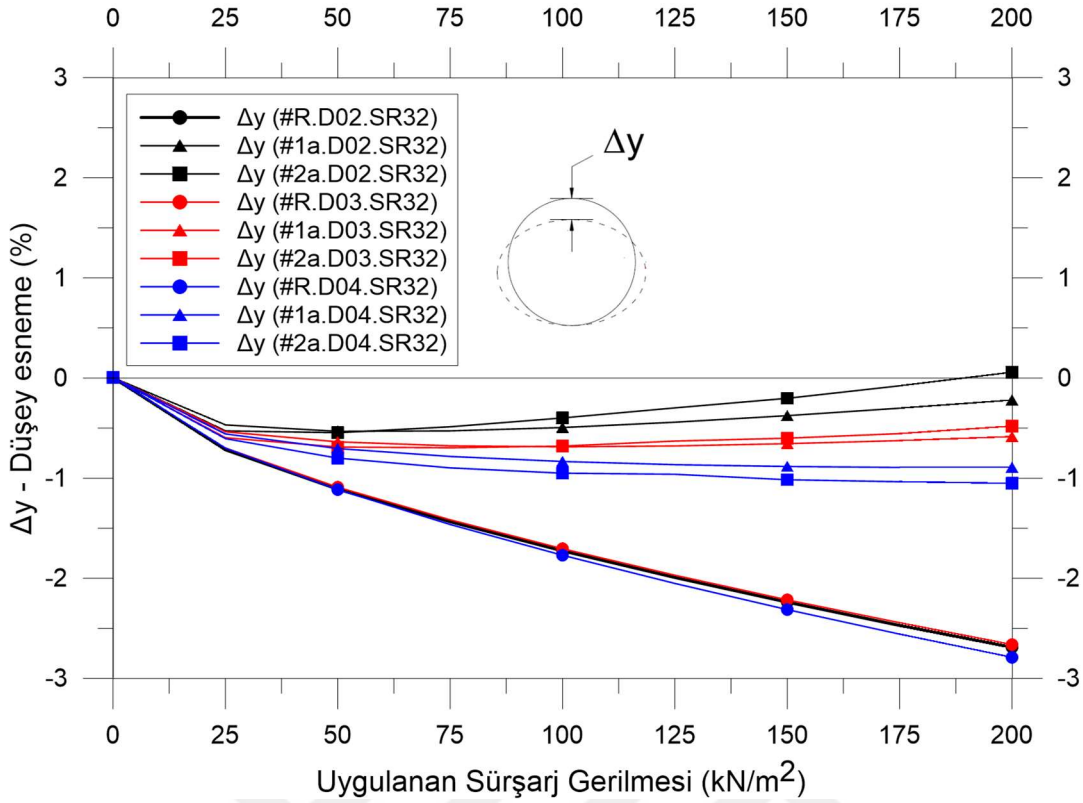
Şekil 3.18 SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 için farklı konfigürasyonlar ve çaplar için zemin içerisinde meydana gelen oturma değerleri

Analiz sonuçlarının esneme değerlerine göre karşılaştırılması Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde Ø200 mm, Ø300 mm ve Ø400 mm çaplı borular için sayısal analiz sonuçları sırasıyla siyah, kırmızı ve mavi renkleri ile gösterilmiştir. Çap değişiminin incelendiği analizler yalnızca EPS10 için yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre düşey esneme değerleri Şekil 3.19’da, yatay esneme değerleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen esneme değerinin yüzdesini verirken yatay eksen yükleme aşamalarını göstermektedir.

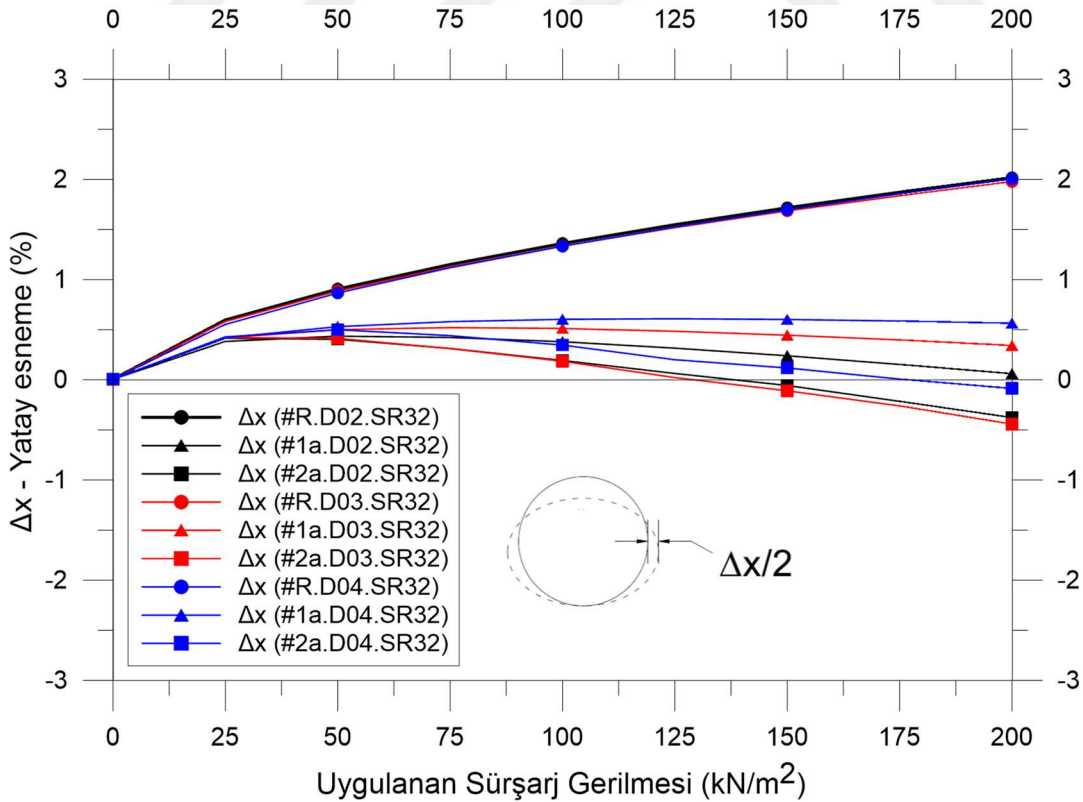
Öncelikle düşey esneme değerlerine bakıldığında referans analizlerde esnemenin değişen boru çapları için aynı ve yaklaşık -%2.70 (düşeyde kısalma) değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerler EPS Geofam kullanıldığında Ø200, Ø300 ve Ø400 mm borular için sırasıyla ortalama -%0.0, -%0.5 ve -%1 olarak belirlenmiştir. EPS Geofam malzeme kullanılan analizlerde düşey esneme değerleri Şekil 3.19’da da görüldüğü üzere farklı konfigürasyonlar için maksimum %0.2 değerine ulaşmıştır.

Farklı EPS konfigürasyonlarının yatay esnemeler üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. EPS Geofam malzemenin yalnızca borunun üstünde kullanıldığı durumlarda meydana gelen yatay esnemeler tüm çap değerlerinde pozitif sonuçlar vermektedir. Bunun yanı sıra borunun tamamen EPS Geofam malzeme ile sarılması durumunda esneme değerleri yatayda negatif sonuçlar vermekte olup borunun yatayda daraldığını göstermektedir. Konfigürasyon #1 için esneme yüzdelerinin Ø200, Ø300 ve Ø400 mm çaplı borular için sırasıyla %0.06, %0.34 ve %0.56 olduğu görülmüştür. Aynı değerler Konfigürasyon #2 için ise sırasıyla -%0.38, -%0.45 ve -%0.09 olarak elde edilmiştir.

Referans analizlere bakıldığında artan yükleme altında yatay esneme değerlerinde devamlı şekilde negatif olarak artış göze çarparken, yatay esneme değerlerinde ise pozitif olarak artış gözlemlenmektedir. Bu bilgi borunun yük altında EPS Geofam kullanılmadığı durumlarda düşeyde kısalma ve yatayda genişleme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Boru ile EPS Geofam malzeme kullanılarak yapılan analizlerde ise borunun önce düşeyde kısıлып yatayda uzama (referans deneyde olduğu gibi), belirli bir gerilme değerinden sonra ise bu davranışın tersi olan düşeyde uzama ve yatayda daralma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.19 SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde düşey esneme değerlerinin karşılaştırılması

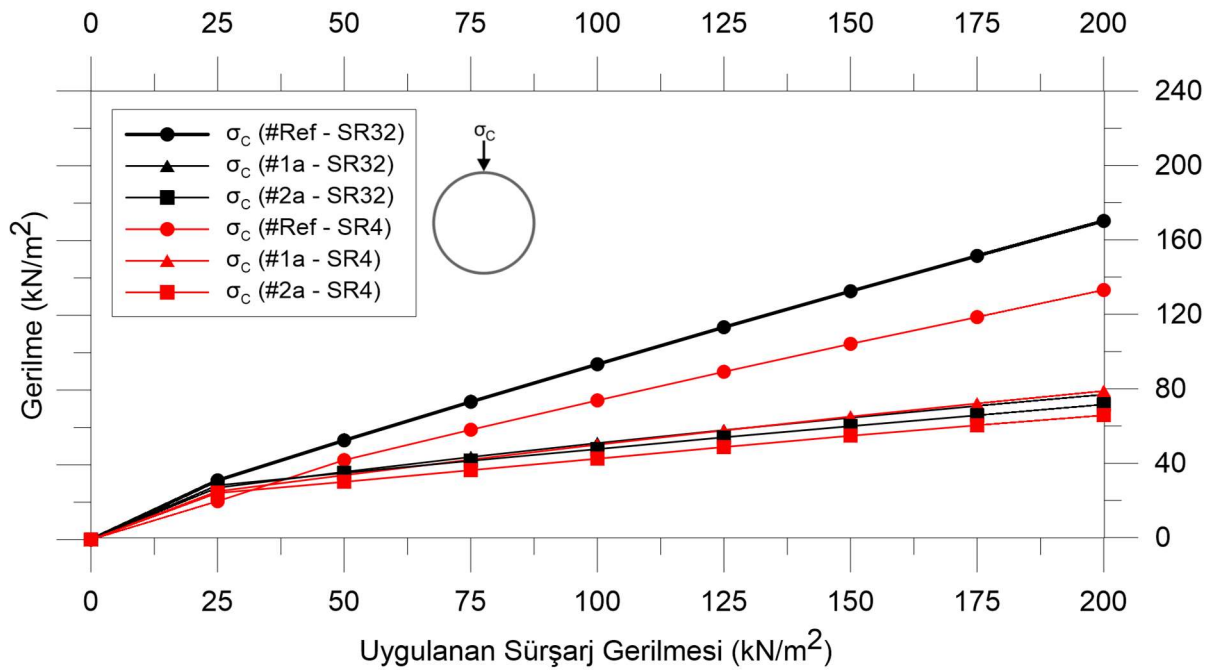


Şekil 3.20 SR32 rijitliğinde boru ve EPS10 malzeme kullanılan analizlerde yatay esneme değerlerinin karşılaştırılması

3.2.3 Boru rijitliğinin değişimi

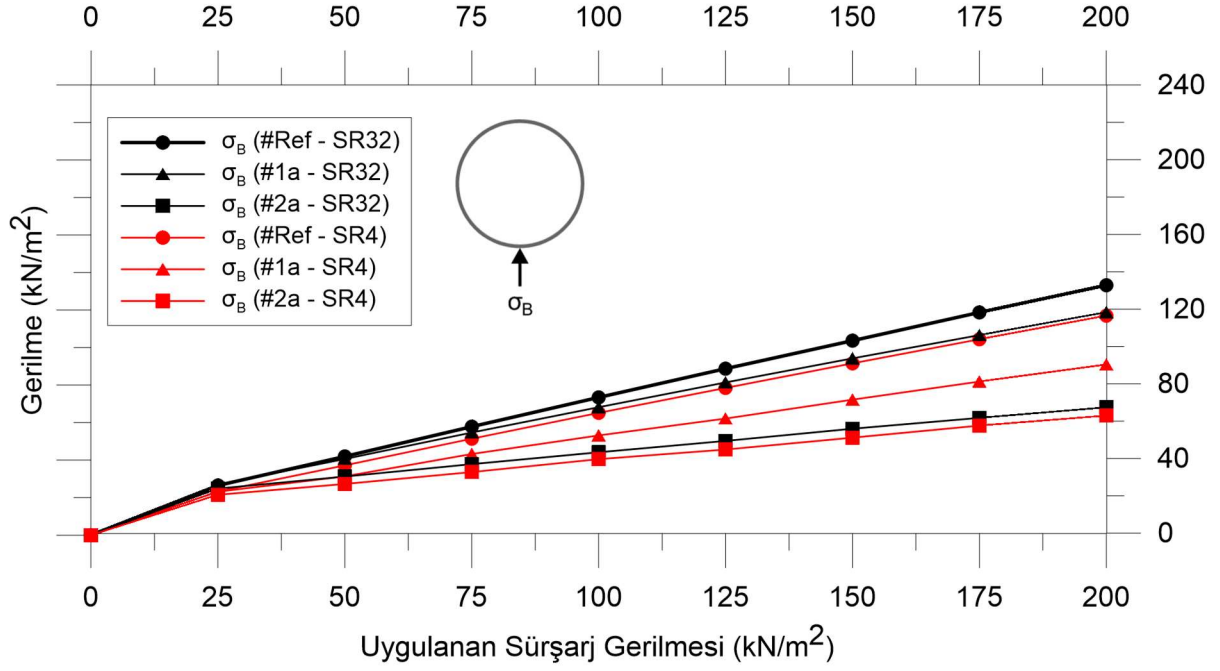
Laboratuvar deneylerinde ele alınmayan bir diğer parametre olan borunun rijitliği bu alt başlıkta değerlendirilmiştir. Boru rijitliği ekonomik olarak oldukça önemli olmakla birlikte EPS malzeme ile kullanıldığında boru üzerine gelen gerilmeleri bir miktar azalttığı gözlemlenmiştir. Boru rijitliğinin değişimi ile boru tacına gelen gerilme değişimleri Şekil 3.21’de, boru tabanına gelen gerilme değişimleri Şekil 3.22’de ve borunun yan duvarına gelen yanal gerilme değişimleri Şekil 3.23’de verilmiştir.

Öncelikle boru tacındaki düşey zemin gerilmelerine bakıldığında Şekil 3.21’de görüldüğü üzere SR32 rijitliğine sahip boru kullanımı (siyah çizgiler) ile birlikte elde edilen sonuçların SR4 rijitliğine sahip boru kullanımı (kırmızı çizgiler) ile elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu azalma referans analizlerde yaklaşık 25 kPa iken farklı konfigürasyonlar için 10 kPa değerini geçmemektedir.



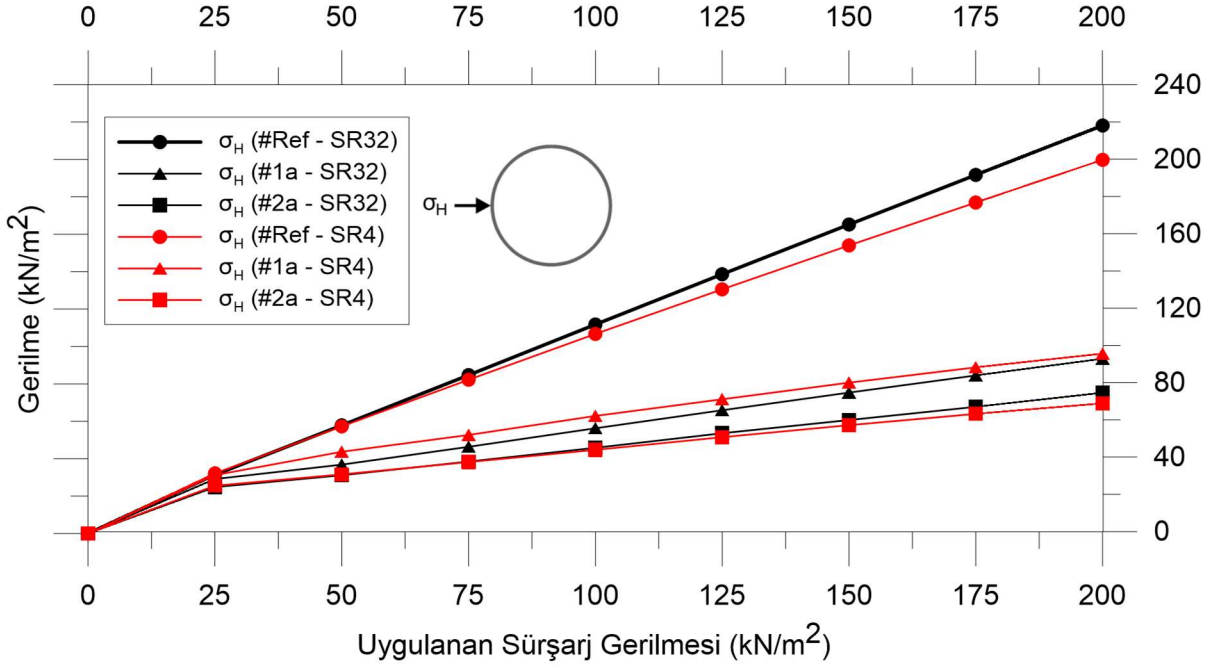
Şekil 3.21 Farklı boru rijitliklerine göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri

Boru tacında olduğu gibi boru tabanında da meydana gelen düşey zemin gerilmelerine bakıldığında (Şekil 3.22) boru rijitliğinin azalması ile etkiyen gerilmelerde bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma en fazla Konfigürasyon #1’de (yaklaşık 25 kPa) görülürken, Konfigürasyon #2 analizlerinde 10 kPa değerini geçmezken referans analizlerde 15 kPa değerine ulaşmaktadır.



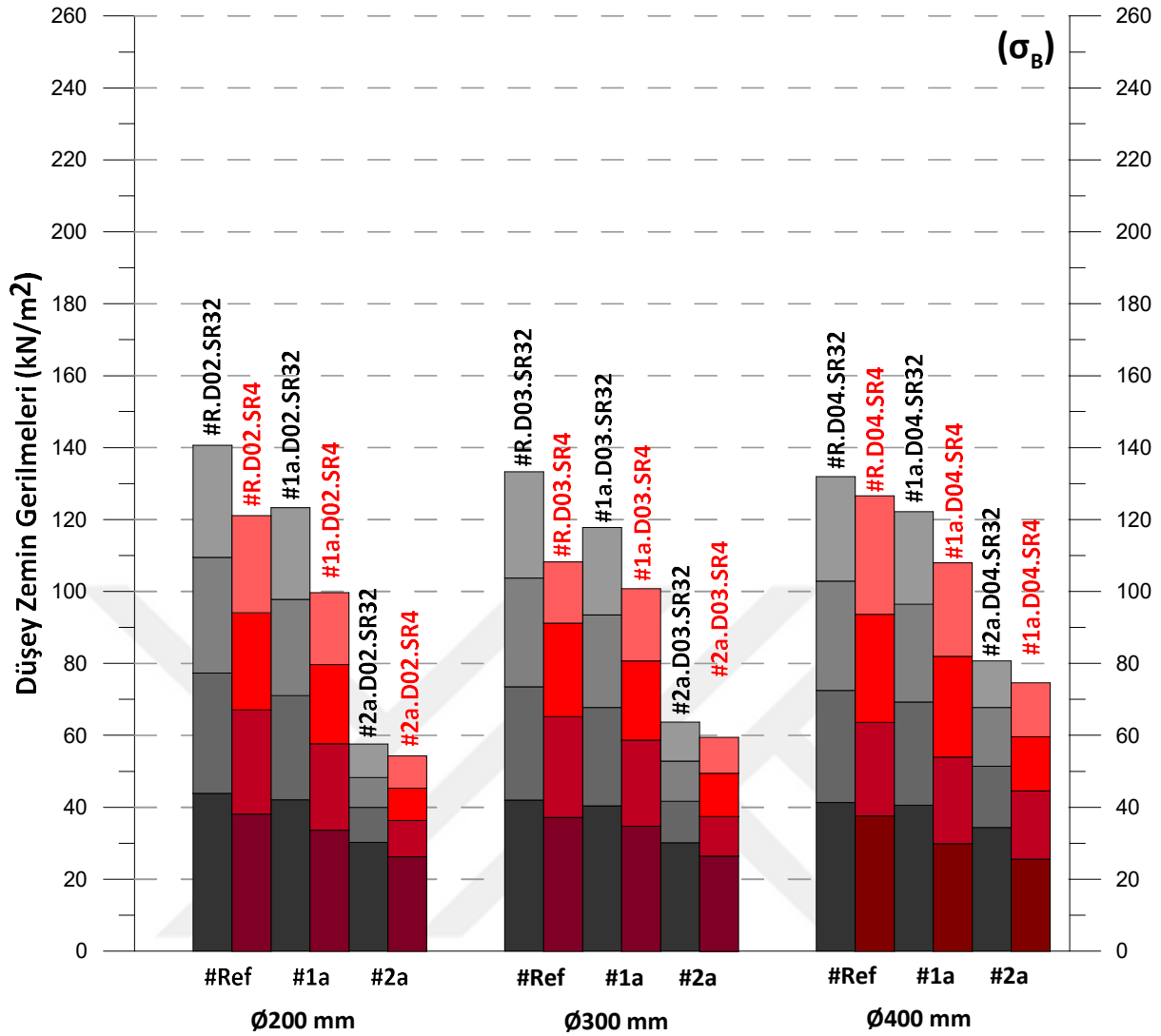
Şekil 3.22 Farklı boru rijitliklerine göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmeleri

Son olarak boru yanına etkiyen yanal zemin gerilmeleri cinsinden karşılaştırılan analiz sonuçları Şekil 3.23'de paylaşılmıştır. Bu grafiklerde görüldüğü üzere referans ve Konfigürasyon #2 analizleri için boru rijitliğinde meydana gelen azalmalar yanal zemin gerilmelerinde sırası ile 20 kPa ve 5 kPa azalmaya yol açmışken Konfigürasyon #1 analizlerinde boru rijitliğinin azalması gerilmelerde yaklaşık 5 kPa'lık bir artışa sebep olmuştur.



Şekil 3.23 Farklı boru rijitliklerine göre boru yan duvarındaki yatay zemin gerilmeleri Gerilmelerin boru rijitliği ile olan değişimleri ile boru çapı da ele alındığında ortaya çıkan sonuçlar Şekil 3.24 ve Şekil 3.25 ile paylaşılmıştır. Bu grafiklerde Şekil 3.2’de belirtilen şekilde bir gösterim ele alınmıştır. Grafiklerdeki siyah tonlar SR32 rijitlikteki boru analizlerini temsil ederken kırmızı tonları SR4 rijitlikteki boru analizlerini temsil etmektedir.

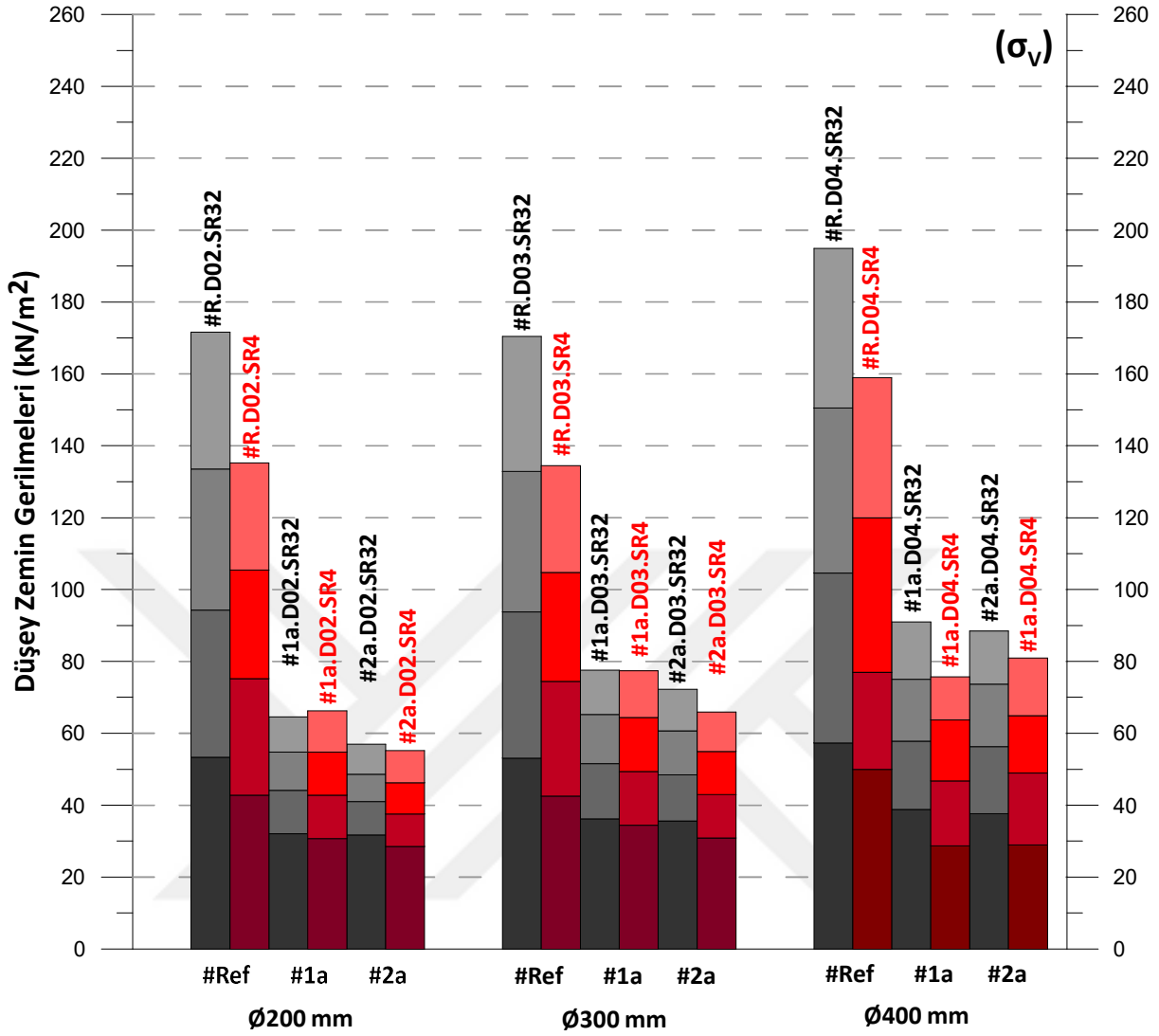
Öncelikle Şekil 3.24’e bakıldığında boru çapının değişmesi ile elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde boru rijitliğinin azalması ile tüm durumlarda boru tabanına etkileyen düşey zemin gerilmelerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu azalma en fazla Ø200 mm çapa sahip boru ile yapılan analizlerde meydana gelirken boru çapının artması ile giderek azalmaktadır. Özellikle Konfigürasyon #2’ye bakıldığında boru tabanındaki düşey zemin gerilmelerinin rijitlik değişiminden diğer konfigürasyonlara göre oldukça az etkilendiği görülmektedir.



Şekil 3.24 Farklı boru çapları, EPS konfigürasyonları ve rijitlik değişimlerinin boru tabanına etkileyen düşey zemin gerilmeleri için karşılaştırılması

Rijitlik ve çap parametrelerinin birlikte değişiminin boru tacına etkileyen düşey gerilmeler açısından karşılaştırılması ise Şekil 3.25 ile paylaşılmıştır. Bu grafikte görüldüğü üzere genel olarak boru rijitliğinin azalması boru tacına etkileyen düşey zemin gerilmelerinde bir azalmaya yol açarken Konfigürasyon #1 için Ø200 mm çaplı analizde bu gerilmelerin rijitlikteki azalma ile bir miktar arttığı görülmektedir.

Boru tabanında ve tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerine beraber bakıldığında iki konum için de EPS Gefoam kullanımının düşey zemin gerilmelerinde azalmaya yol açtığı gibi boru rijitliği azalmasının da bu gerilmelerde azalmaya yol açtığı gözlemlenmektedir. Bu azalmanın özellikle referans analizlerde oldukça fazla olduğu gibi diğer konfigürasyonlar için de farklı durumlarda 20 kPa değerinin üzerine çıkabilmektedir.

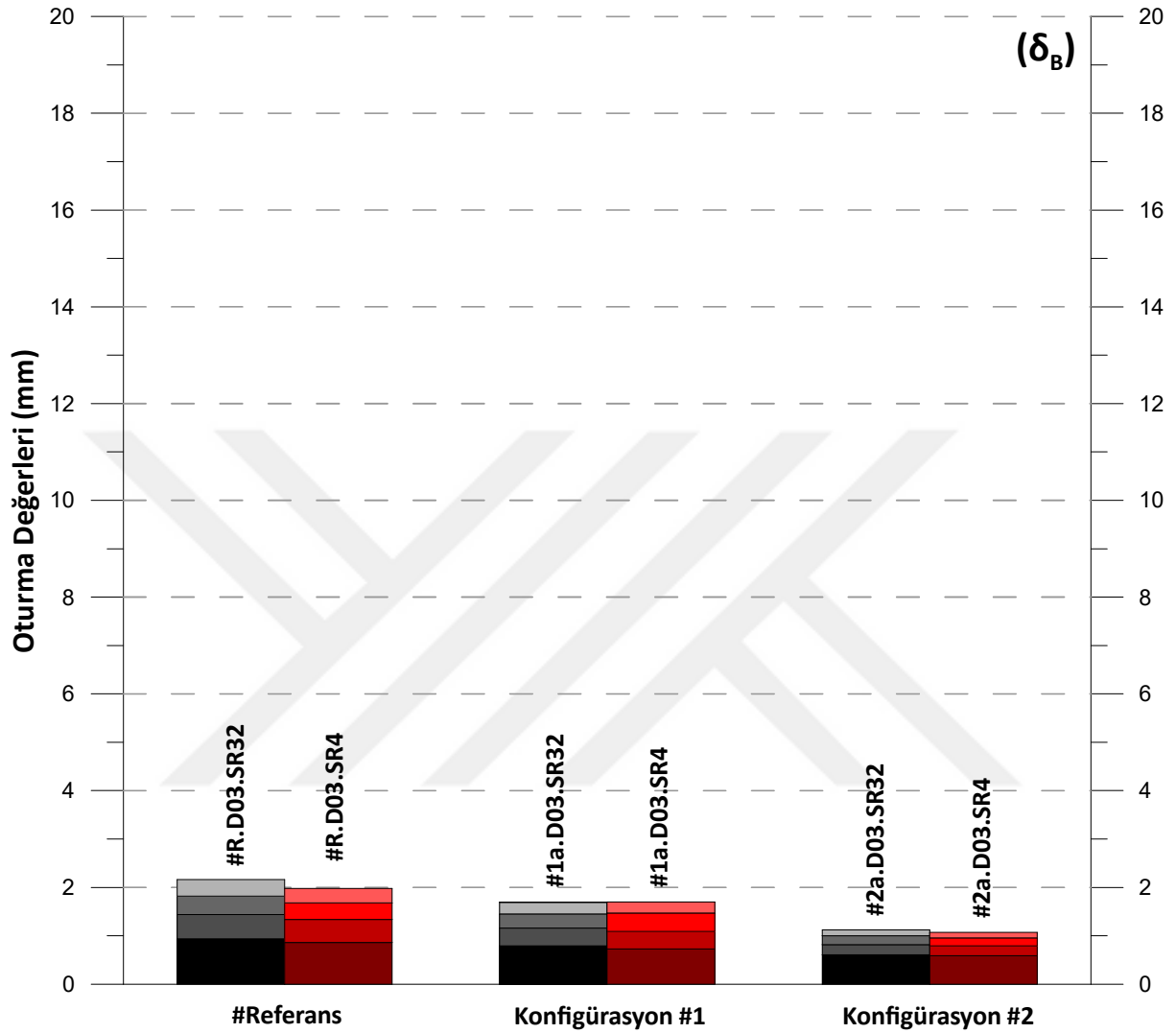


Şekil 3.25 Farklı boru çapları, EPS konfigürasyonları ve rijitlik değişimlerinin boru tacına etkileyen düşey zemin gerilmeleri için karşılaştırılması

Boru rijitliğinin azaltılması ile yapılan analizlerde elde edilen oturma değerleri grafikler yardımı ile taban oturması (δ_B) ve borunun merkezinden 35 cm kadar uzaklıkta bulunan zemin oturması (δ_w) olarak Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de paylaşılmıştır. Grafiklerde daha önce kullanıldığı üzere siyah tonlar SR32 rijitlikte ve kırmızı tonlar ise SR4 rijitlikteki boru için sayısal analiz sonuçlarını göstermektedir.

Boru tabanında meydana gelen oturmaların paylaşıldığı Şekil 3.26’ya bakıldığında boru rijitliğinin azalması ile meydana gelen oturmalarda büyük farklar gözlemlenmemektedir. Bu farklar referans analizlerde yaklaşık 0.1 mm iken Konfigürasyon #2’de 0.03 mm kadar düşük olduğu gözlemlenmektedir. Konfigürasyon #1 için ise boru tabanında borunun

rijitlik değerinin azalmasından kaynaklanan bir oturma farkı meydana gelmediği görülmektedir.

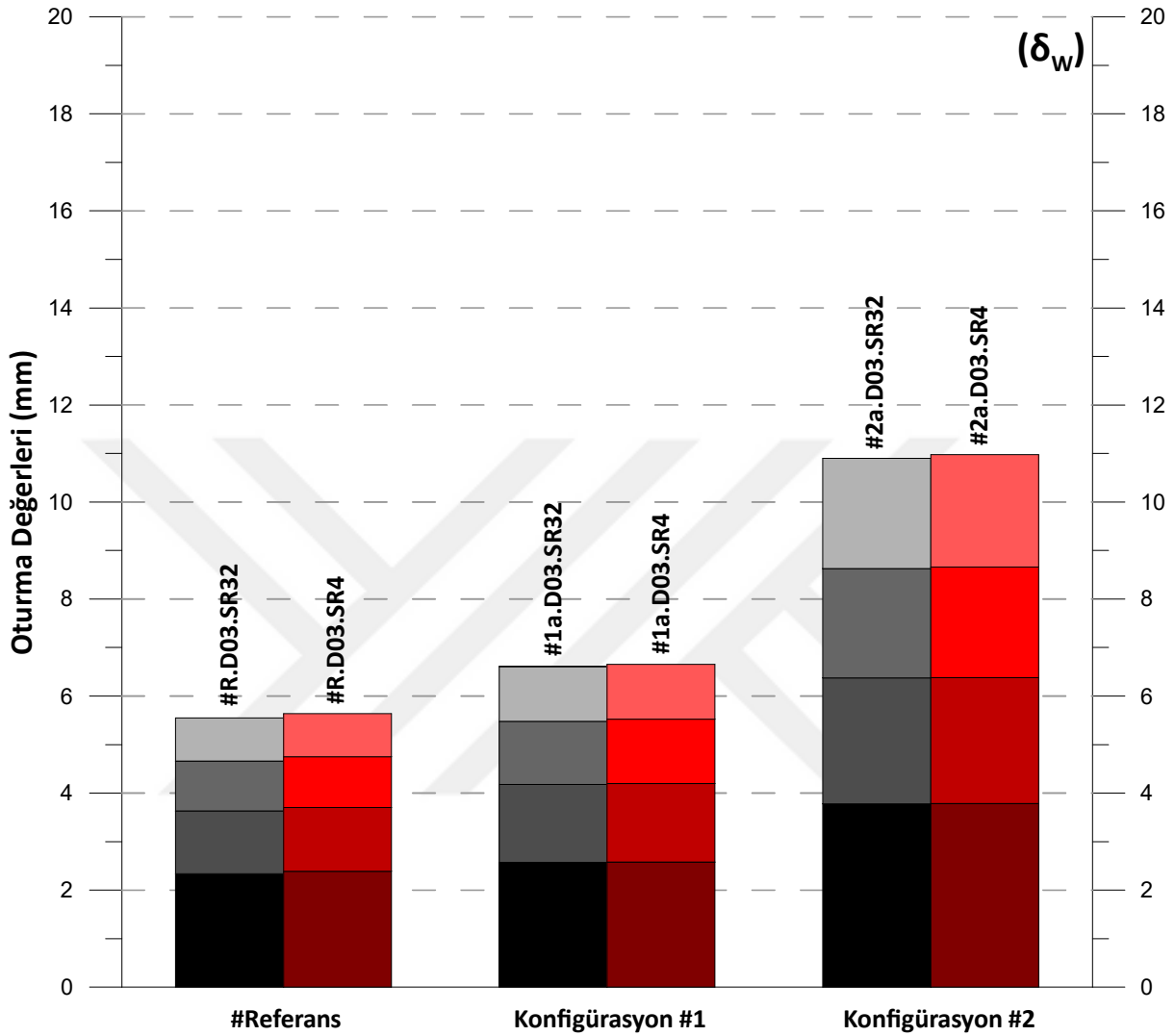


Şekil 3.26 Farklı boru rijitlikleri için boru tabanındaki düşey oturma değerleri

Borunun merkezinden 35 cm uzaklıktaki zemin içerisinde meydana gelen oturmaların ise zemin içerisindeki kemerlenme etkisinin bir ölçütü olarak değerlendirildiği daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu sayede rijitlik değişimi ile bu kemerlenme davranışını Şekil 3.27'de bulunan grafik yardımı ile incelenmiştir. Bu incelemede ise borunun rijitliğinin azalması ile çok az olmakla birlikte zemin içerisindeki oturmaların arttığı gözlemlenmektedir.

Zemin içerisinde meydana gelen oturmalar boru tabanında meydana gelen oturmalara nazaran oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu değerler SR32 rijitliğe sahip bir boru kullanıldığında referans, Konfigürasyon #1 ve Konfigürasyon #2 için sırası ile 5.55 mm,

6.61mm ve 10.90 mm iken; SR4 rijitliğe sahip bir boru kullanıldığında bir miktar artış göstererek sırası ile 5.64 mm, 6.65 mm ve 10.97 mm değerlerine ulaşmaktadır.



Şekil 3.27 Farklı boru rijitlikleri için zemin içerisindeki düşey oturma değerleri

Son olarak boru rijitliğinin azalmasının borunun düşey ve yatay esnemelerine olan etkileri sırası ile Şekil 3.28 ve Şekil 3.29 ile paylaşılmıştır. Bu grafiklerde daha önce olduğu gibi siyah çizgiler SR32 rijitlikteki boru ile yapılan analizleri gösterirken kırmızı çizgiler SR4 rijitlikteki boru için yapılan analizleri göstermektedir. Grafiklerde bulunan düşey eksenlerden sağdaki Ø300 mm çaplı boru için düşey şekil değiştirmesinin yüzde olarak ifadesini, soldaki ise esneme değerinin milimetre olarak ifadesini göstermektedir.

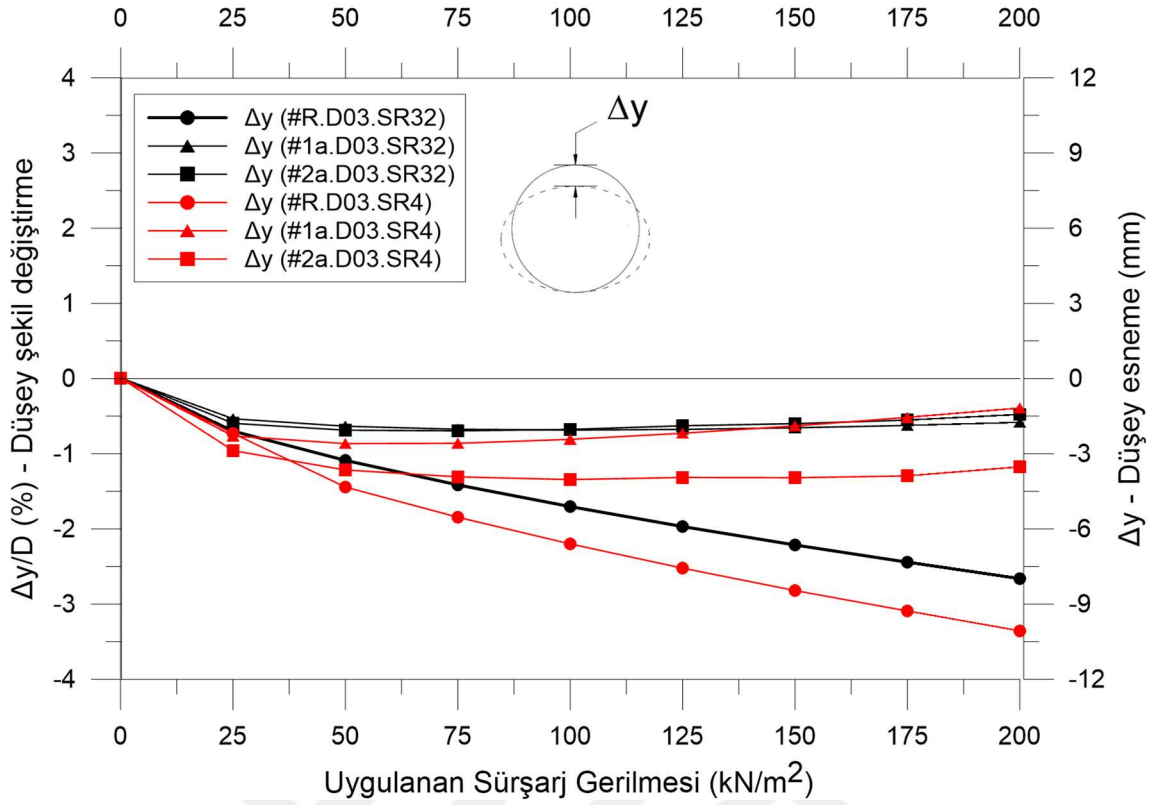
Düşey esneme değerlerine bakıldığında (Şekil 3.28) referans ve Konfigürasyon #2 analizleri için boru rijitliğinin azalması ile düşey esneme değerlerinin negatif yönde arttığı (düşeyde kısılma) görülmektedir. Buna rağmen Konfigürasyon #1 için bu değerde

önemsenecek bir fark gözlemlenmemektedir. Sayısal olarak ifade etmek gerekirse referans analizde boru rijitliğinin 4 kat azalması ile boru düşey yönde 2.90 mm daha esnerken, Konfigürasyon #2’de bu esneme değeri yaklaşık 1.00 mm olarak elde edilmiştir.

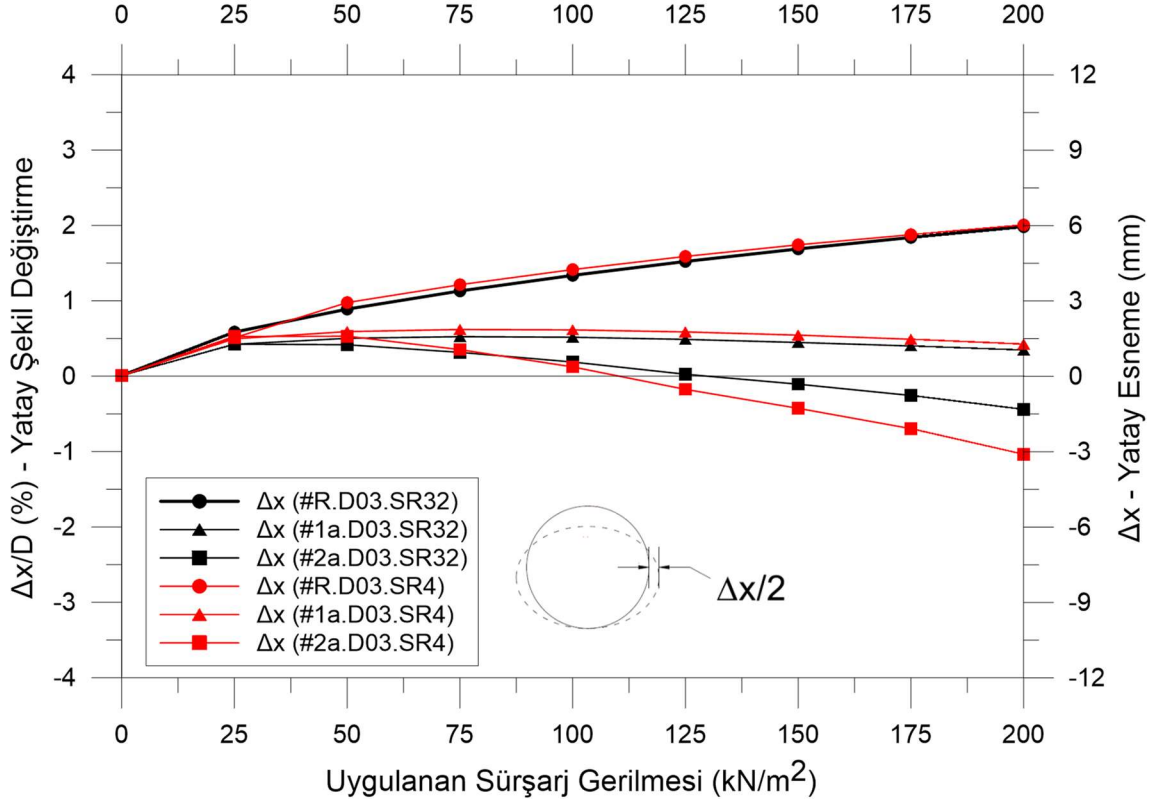
Yatay esneme sonuçları değerlendirildiğinde ise (Şekil 3.29) referans analizlerde bir fark görülmemekle birlikte Konfigürasyon #2’de boru rijitliğinin azalması ile borunun yataydaki esneme değerinin arttığı görülmektedir. Bu artış uzunluk olarak ifade edilirse yaklaşık 1.80 mm’ye denk gelmektedir. Düşey esneme sonuçlarında ise görüldüğü üzere Konfigürasyon #1 için elde edilen analiz sonuçları farklı boru rijitlikleri için yaklaşık aynı sonuçları vermektedir.

Yatay ve düşey esnemeler birlikte değerlendirildiğinde referans analizler için düşük rijitlikte boru kullanımının yalnızca boruda meydana gelen düşey esneme değerlerini bir miktar artırdığı söylenebilir. Aynı şekilde Konfigürasyon #2 için düşey esneme değerleri bir miktar artarken borunun yatayda bir miktar daha sıkıştığı sonucu elde edilmektedir. Konfigürasyon #1’e bakıldığında ise boru rijitliğinin SR32 değerinden SR4 değerine düşürülmesi ile yatay ve düşey esnemelerde büyük farklar meydana gelmediği gözlemlenmektedir.

Genel olarak düşük rijitliğe sahip boru parametreleri ile yapılan analizler sonucunda boru üzerine gelen düşey ve yatay zemin gerilmelerinde azalma gözlemlenirken boru tabanında ve zemin içerisinde meydana gelen oturmalarda büyük farklar gözlemlenmemiştir. Esneme değerlerinde ise meydana gelen farklar Ø300 mm çapa sahip boru için 2.00 mm’yi (%0.67) geçmemektedir.



Şekil 3.28 Farklı boru rijitlikleri için düşey esneme değerleri



Şekil 3.29 Farklı boru rijitlikleri için yatay esneme değerleri

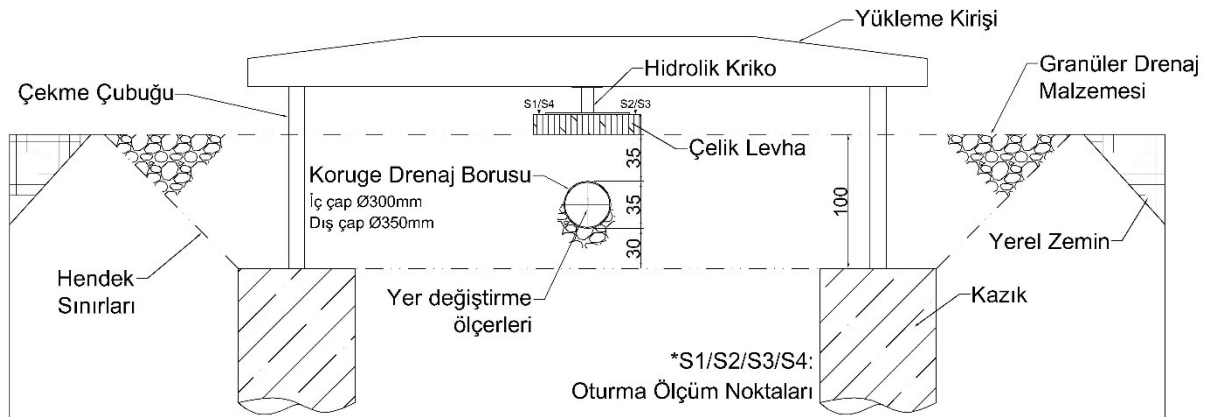
Ülkemizde genellikle HDPE boru kullanımında yüksek maliyetli olan yüksek rijitliğe sahip borular tercih edilmektedir. Bunun sebebinin literatürdeki bilgi eksikliği ve uygulama azlığı yüzünden boru inşa ve servis ömrü süresince güvenli bölgede kalmak için olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra yapılan tasarımlar ve analizler sonucunda görülmektedir ki boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanıldığı durumlarda boru rijitliğinin azaltılması borunun davranışında olumsuz sonuçlara yol açmamaktadır.

Bu bölümde elde edilen bilgiler doğrultusunda bir boru hattı projesinin tasarımında elastik boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanımının boru rijitliğinin azaltılmasına imkân verebileceği düşünülmektedir.



4.1 Arazi deneyi hakkında bilgiler

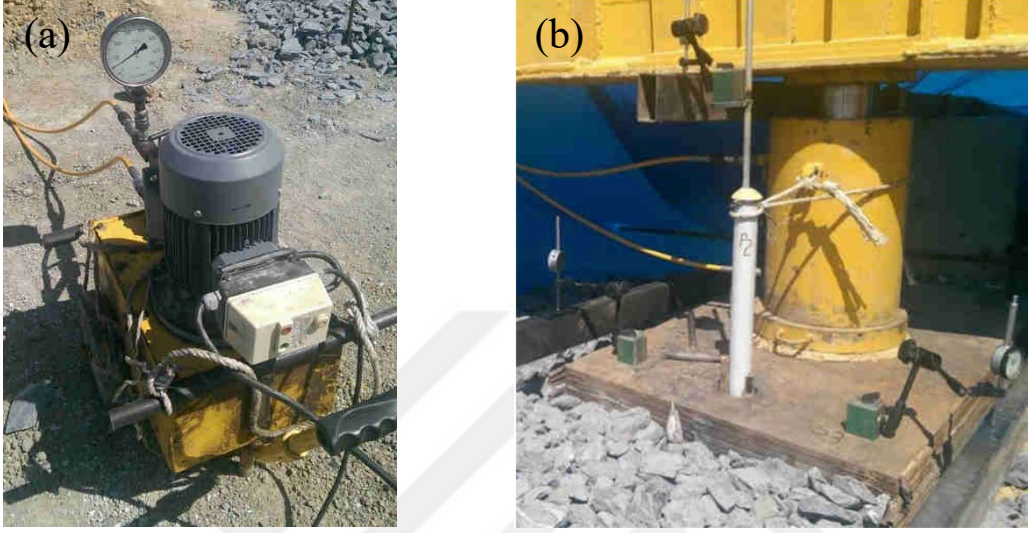
Yüksek dolgular altında kalacak HDPE drenaj borularının davranışını incelemek için arazide bir yükleme deneyi yapılmıştır (Şekil 4.1). Bu yüksek lisans tezi kapsamında arazi yükleme deneyi Plaxis 2D kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Yükleme deneyinde yükleme plakası üzerinden ve boru tacı ile tabanından uygulanan gerilmeye karşılık zeminin düşey yer değiştirmeleri ölçülmüştür. Ayrıca boru içerisinde kurulan bir kamera düzeneği ile boru davranışı gözlemlenmiş ve potansiyometrik yer değiştirme sensörleri ile boru çapında meydana gelen değişimler ölçülmüştür. Bunun yanı sıra ölçüm aletleri ile borunun üzerindeki ve tabanındaki zemin gerilmesi değerleri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.1 Arazide boru yükleme deneyi genel görünümü

Şekil 4.1'de gösterilen HDPE borunun içi çapı 300mm ve dış çapı 350 mm'dir. Bu drenaj borusu 1.0 m genişliğindeki drenaj hendeki içerisine yerleştirilerek boru tacı üzerine 35 cm kalınlığında kırmataş dolgu yapılmıştır. Boru, kırmataş tabakasının üst yüzeyinde bulunan yükleme plakası (Şekil 4.2b) vasıtası ile yüklenmiştir. Yükleme plakası 1.2 m x 0.8 m boyutlarındaki 6 çelik plaka ve aynı boyutlarda 1.5 cm kalınlığındaki başka bir çelik plakadan oluşmaktadır. Yük hidrolik bir kriko vasıtası ile plaka üzerine aktarılmaktadır (Şekil 4.2a). Reaksiyon sistemi, çapı 0.8 m ve uzunluğu 30 m olan 2 adet fore kazığa mesnetlenmiş çelik kiriş içermektedir.

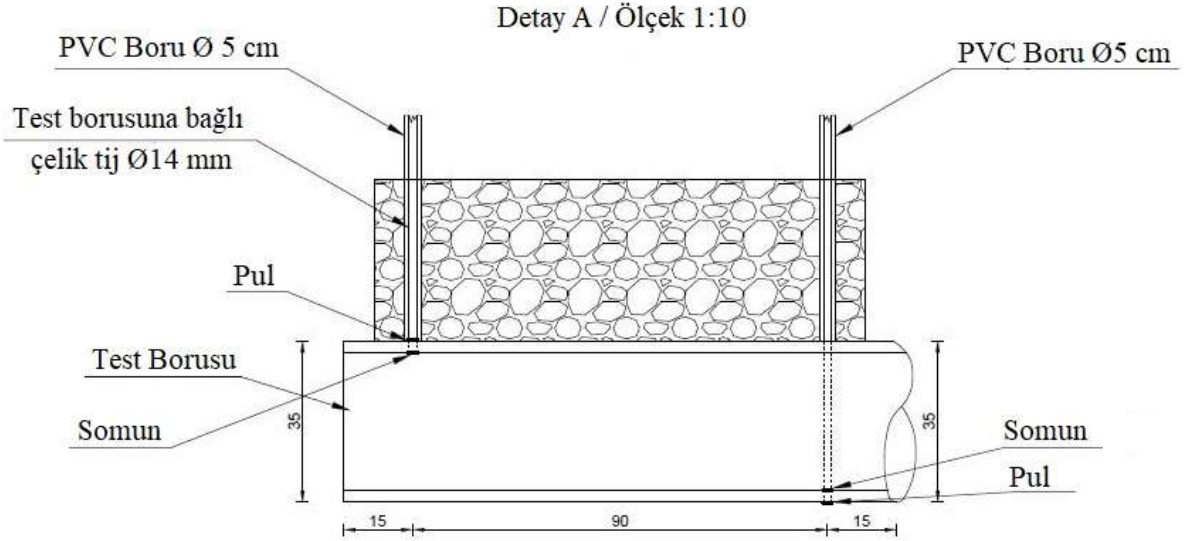
Deneyde kullanılan ölçüm aletleri ve bağlantı detayları ise Şekil 4.3 ile gösterilmiştir. Bu ölçüm aletlerine ait detay çizimi ise Şekil 4.4 ile paylaşılmıştır. Paylaşılan bu görselde borunun alt ve üst noktalarından alınan ölçümler sayesinde boru üzerinde meydana gelen düşey esneme hareketleri kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda bu değerler borunun alt ve üst oturumlarını ifade etmektedir.



Şekil 4.2 Deney elemanları: (a) Hidrolik kriko (b) Yükleme plakası



Şekil 4.3 Deneyde kullanılan ölçüm aletleri ve bağlantı detayları



Şekil 4.4 Oturma ölçümlerine ait görünüm

Deney esnasında yapılan yükleme-boşaltma işlemi toplam üç farklı devir içermektedir. İlk yükleme devrinde toplam 4 adımda 100 kN yükten 400 kN yüke kadar yükleme gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme devrinin ardından ulaşılan 400 kN yük önce 200 kN'a, ardından 50 kN'a düşürülmüştür. Son olarak ikinci yükleme devri yine 4 adımdan oluşmakla birlikte 200 kN aralıklarla toplamda 800 kN yüke ulaşmaktadır. Bu yükleme adımları Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Arazi deneyi yükleme adımları

Yük Adımı	İlk Yükleme Devri				Yük Boşaltma		İkinci Yükleme Devri			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yük (kN)	100	200	300	400	200	50	200	400	600	800
Zaman (dk.)	15	15	15	30	10	10	10	10	15	30

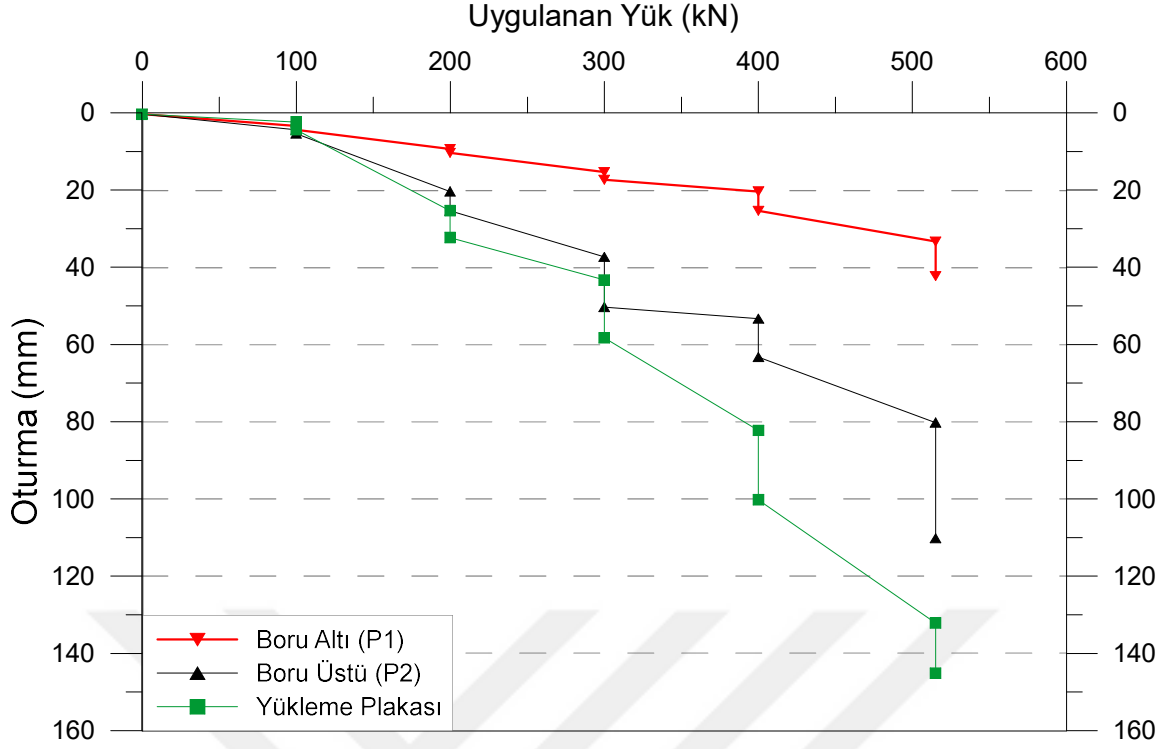
Deneyde ilk yükleme devri ve yük boşaltma işlemleri gerçekleştirilmiş olmasına karşın, ikinci yükleme devri boru üzerindeki deformasyonların 150 mm değerine ulaşmasından dolayı (aşırı deformasyon) 515 kN'da durdurulmuştur. Deney başlamadan hemen önce alınan görüntü ve 515 kN yük altındayken boru içerisinden alınan görüntü Şekil 4.5'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.5 Boru içerisinde alınan görüntüler (a) deney başlamadan önce alınan görüntü (b) Boru 515 kN yük altında olduğu anda alınan görüntü

4.2 Arazi deneyinden elde edilen sonuçlar

Arazi deneyinden elde edilen sonuçlar ile oluşturulan grafikler Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sunulmuştur. Deneyde uygulanan sürşarj gerilmesi altında meydana gelen oturmalar boru üzerinde, boru tabanında ve yükleme plakasında olmak üzere üç farklı konum için gösterilmiştir (Şekil 4.5). Uygulanan gerilmelere karşılık nihai yük kademesinde, yükleme plakasında yaklaşık 135 mm, boru üzerinde 80 mm ve boru tabanında 40 mm ölçülmüştür. Deney sonuçları Tablo 4.1'de gösterildiği üzere 800 kN yüke ulaşmamakla birlikte – ve daha önce de belirtildiği gibi boruda meydana gelen çok yüksek esneme değerlerinden dolayı – maksimum 515 kN yük altındaki değerlere kadar ele alınmıştır. Grafiklerde yalnızca yükleme değerleri kullanılırken yük boşaltma evrelerinde ortaya çıkan değerler gösterilmemiştir. Deney sonunda borunun neredeyse orijinal şeklini geri aldığı görülmektedir (Şekil 4.7). Bu durum borunun tam olarak lineer olmayan elastik davranış gösterdiğini işaret etmektedir.

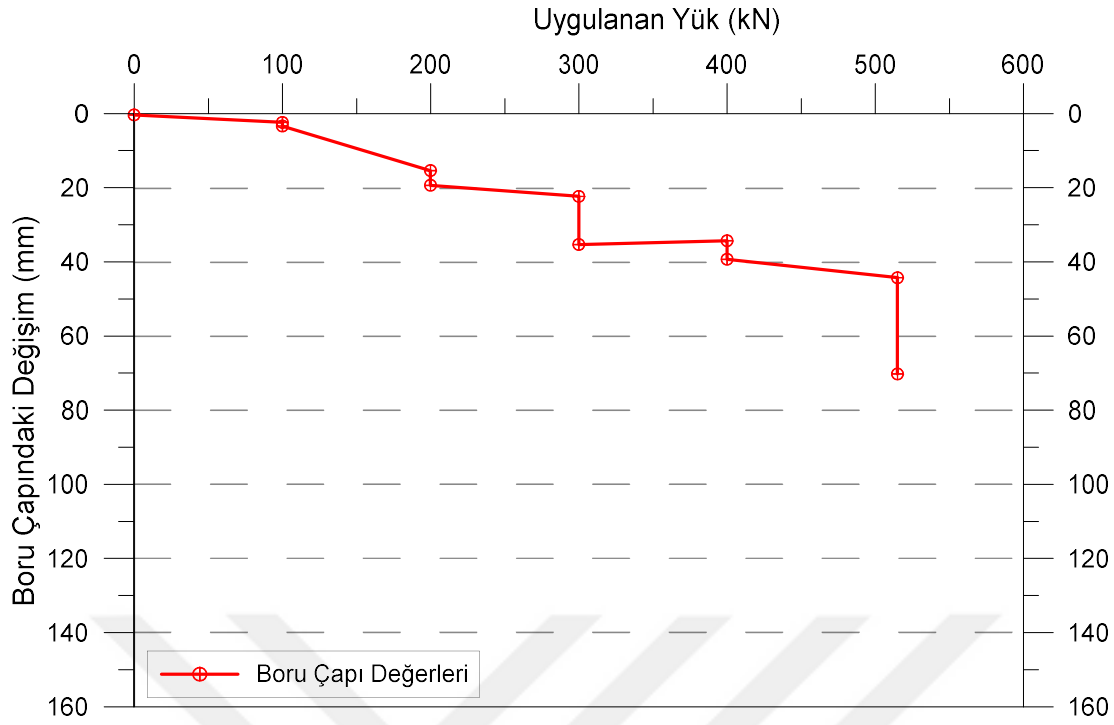


Şekil 4.6 Boru yükleme deneyinde gerilme-oturma ölçümleri



Şekil 4.7 Borunun deney sonrasında elde edilmiş görüntüsü

Oturma değerlerinin gösterildiği grafikte ele alınan, borunun altında ve üstünde meydana gelen oturma değerleri karşılaştırıldığında boruda meydana gelen düşey yöndeki çap değişimi Şekil 4.8 ile paylaşılmıştır. Bu grafikte görüldüğü üzere boruda meydana gelen çap değişimleri yükleme adımlarında 20 mm'yi aşmazken deney sonunda 515 kN yük altında 30 mm'ye yaklaşmıştır. Sonuca bakıldığında boruda meydana gelen düşey esneme değeri toplamda 70 mm'yi geçmiştir.

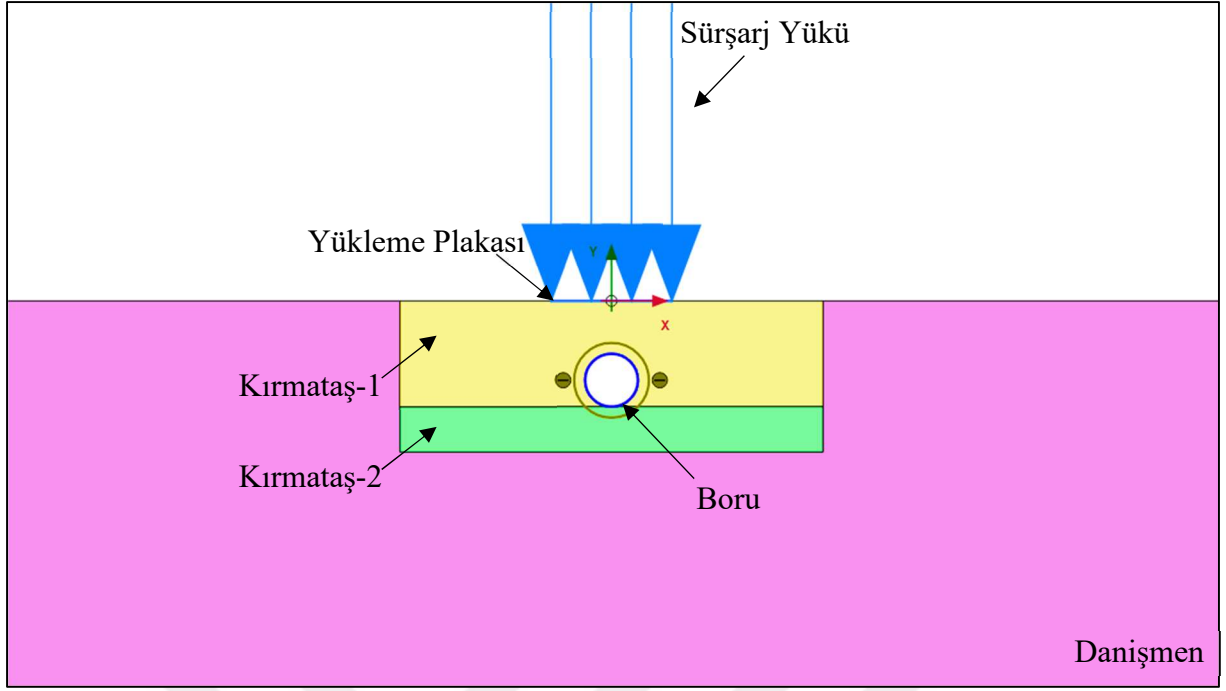


Şekil 4.8 Arazi deneyi sırasında boruda düşeyde meydana gelen değişimler

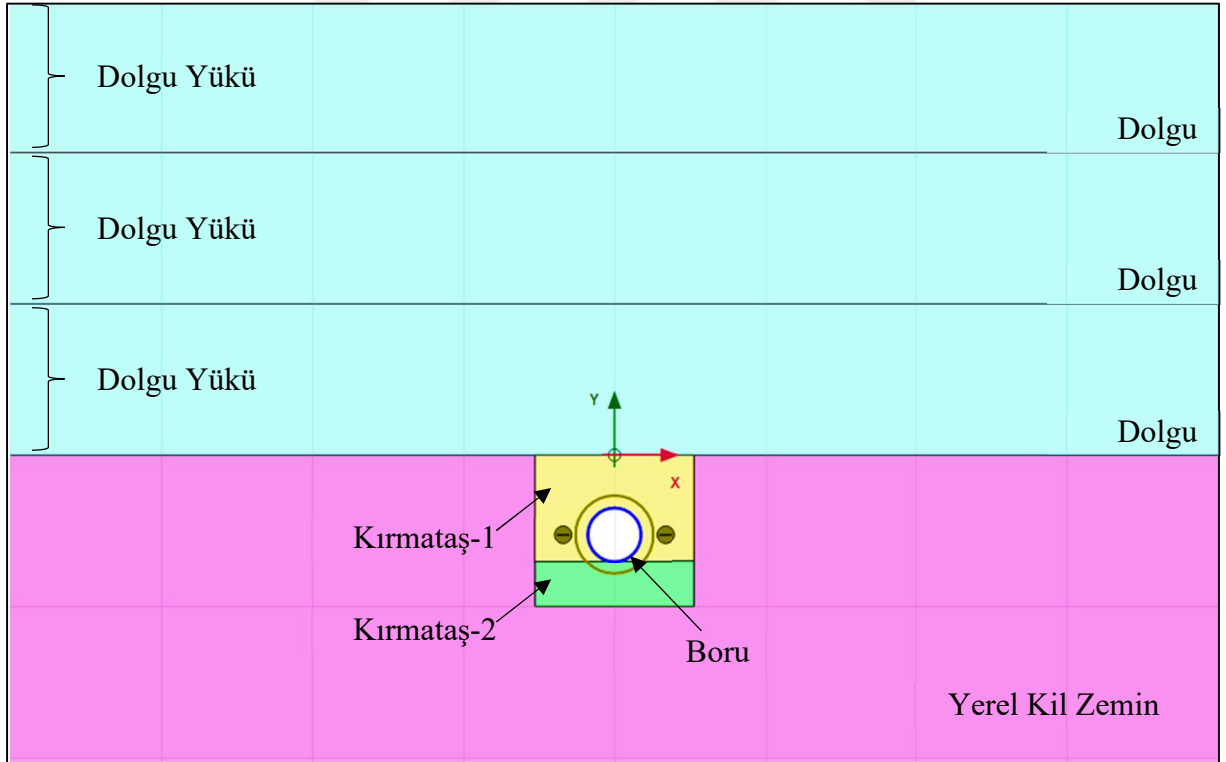
4.3 Arazi Deneyinin Plaxis 2D ile Modellenmesi

Arazide yapılan boru yükleme deneyi Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile modellenmiş ve elde edilen hesap değerli arazi ölçümleri ile karşılaştırıldıktan sonra parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tasarım sırasında 800 kN yükleme öngörülmesine rağmen, deneyde 515 kN değerine ulaşılmış, sayısal modelde ise maksimum yük olarak 400 kN değeri ele alınmıştır.

Arazi yükleme deneyinde, yükleme plakası üzerinden hidrolik yükleme sistemi ile sürşarj gerilmesi kademeli olarak arttırılmış, parametrik çalışmalarda ise boru üzerine dolgu tabakaları eklenerek yükleme gerçekleştirilmiştir. Arazi deneyinin modellenmesi için oluşturulan sayısal model Şekil 4.9'da, parametrik çalışmada kullanılan sayısal model ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Arazi boru yükleme deneyinin sayısal analizleri için kullanılan model



Şekil 4.10 Parametrik çalışmada kullanılan sayısal analiz modeli

4.3.1 Boru Yükleme Deneyinde ve Sayısal Modelde Kullanılan Malzeme Parametreleri

Arazi deneyinde yerel zemin ve 2 farklı kırmataş olmak üzere 3 farklı zemin bulunmaktadır. Yerel zemin ve bu zemin içerisinde açılan hendek içerisinde geri dolgu olarak “kırmataş” yer almaktadır. Deney borusu ise SR32 rijitliğine sahip kıvrımlı HDPE borudur. Bu iki zemin türüne ve HDPE boruya ait parametreler hem kalibrasyon hem de parametrik çalışmada kullanılmıştır. Bunun yanı sıra parametrik çalışma sırasında deneyde bulunmayan bir malzeme olan EPS Geofom malzeme dikkate alınmıştır. Bu malzeme 3 farklı yoğunluk ve çeşitli geometrik özellikler ile analizlere dahil edilmiştir.

4.3.1.1 Zemin Parametreleri

Arazi deneyinde, yerel kil zemin içerisinde 1 m derinliğinde bir kazı yapılmış ve boru yerleştirildikten sonra hendek içi sıkıştırılmamış kırmataş ile doldurulmuştur. Bu zeminlerin birim hacim ağırlıkları, kohezyon değerleri ve içsel sürtünme açıları Tablo 4.2’de verilmiştir. Deneyin sayısal olarak modellenmesinde kullanılan parametreler ise Tablo 4.3’te detaylı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 4.2 Deney zeminlerine ait parametreler

Malzeme tanımı	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Yerel zemin	19	60	15
Geri Dolgu	22	0	45

Tablo 4.3 Sayısal analizlerde kullanılan zemin parametreleri

Parametre	Hendek Geri Dolgusu	Yerel Zemin	Dolgu
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m ³)	22	19	20
Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet, m (-)	0.8	0.8	0.5
Kayma dayanımı açısı, ϕ (°)	40	15	30
Genleşme açısı, ψ (°)	5	-	-
Kohezyon, c (kN/m ²)	-	60	10
Referans ortalama sekant modülü, E_{50}^{ref} (MN/m ²)	18	45	25
Referans tanjant ödometre modülü, E_{oed}^{ref} (MN/m ²)	18	45	25
Referans yük boşaltma-geri yükleme modülü, E_{ur}^{ref} (MN/m ²)	36	135	75

4.3.1.2 Boru Parametreleri

Sayısal analizlerde, boru tünel olarak ve malzeme davranışı elastik olarak dikkate alınmıştır. Raporda borunun anlık yüklemeler altındaki elastisite modülü için $E_{HDPE(Ani)} = 800$ MN/m² ve uzun süreli elastisite modülü için $E_{HDPE(Uzun)} = 150$ MN/m² olarak belirtilmiştir. Böylece borunun 24 saatlik elastisite modülü $E_{HDPE(24)} = 390$ MN/m² olarak ele alınmıştır. HDPE borunun Poisson oranı için ise $\nu_{HDPE} = 0.38$ değeri dikkate alınmıştır. Boru modellemesinde kullanılan diğer parametreler Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Boru duvarı için girilen “Elastik Model” parametreleri (Akınay, 2017)

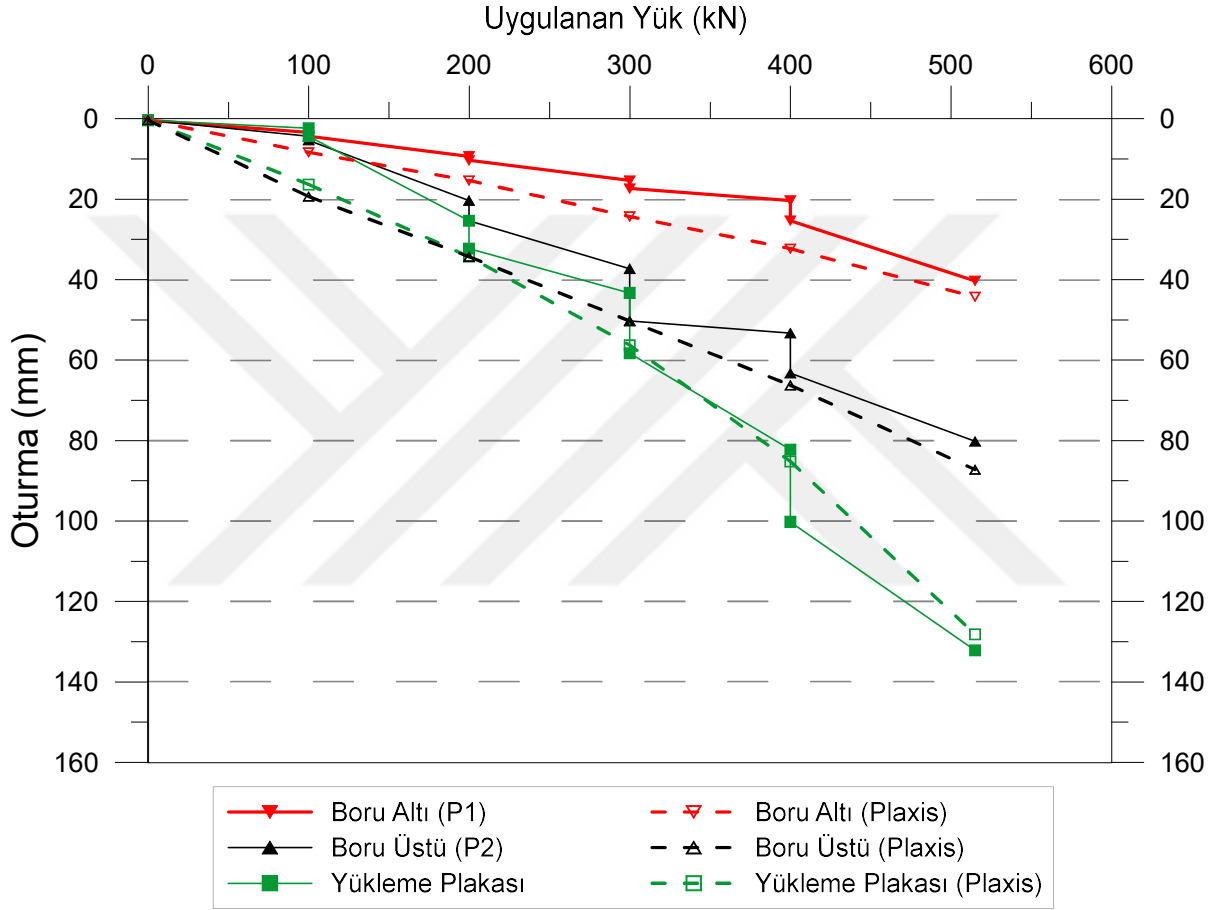
Parametre	Değer
Boru anma çapı (mm)	300
Boru tipi	SR32
Elastisite Modülü, E_{HDPE} (MN/m ²)	390
Malzeme yoğunluğu (kN/m ³)	9.4
Poisson Oranı, ν_{HDPE} (-)	0.38
Boru duvarının birim uzunlukta ağırlığı, w_{boru} (kN/m/m)	0
Boru duvarının birim uzunlukta eylemsizlik momenti, I_{boru} (m ⁴ /m)	1.03×10^{-6}
Boru duvarının birim uzunlukta kesit alanı, A_{boru} (m ² /m)	3.08×10^{-2}
Boru duvarının birim uzunlukta eğilme rijitliği, $E_{HDPE}I_{boru}$ (kNm ² /m)	4.02×10^{-1}
Boru duvarının birim uzunlukta normal rijitliği, $E_{HDPE}A_{boru}$ (kN/m)	12000

4.3.1.3 EPS Parametreleri

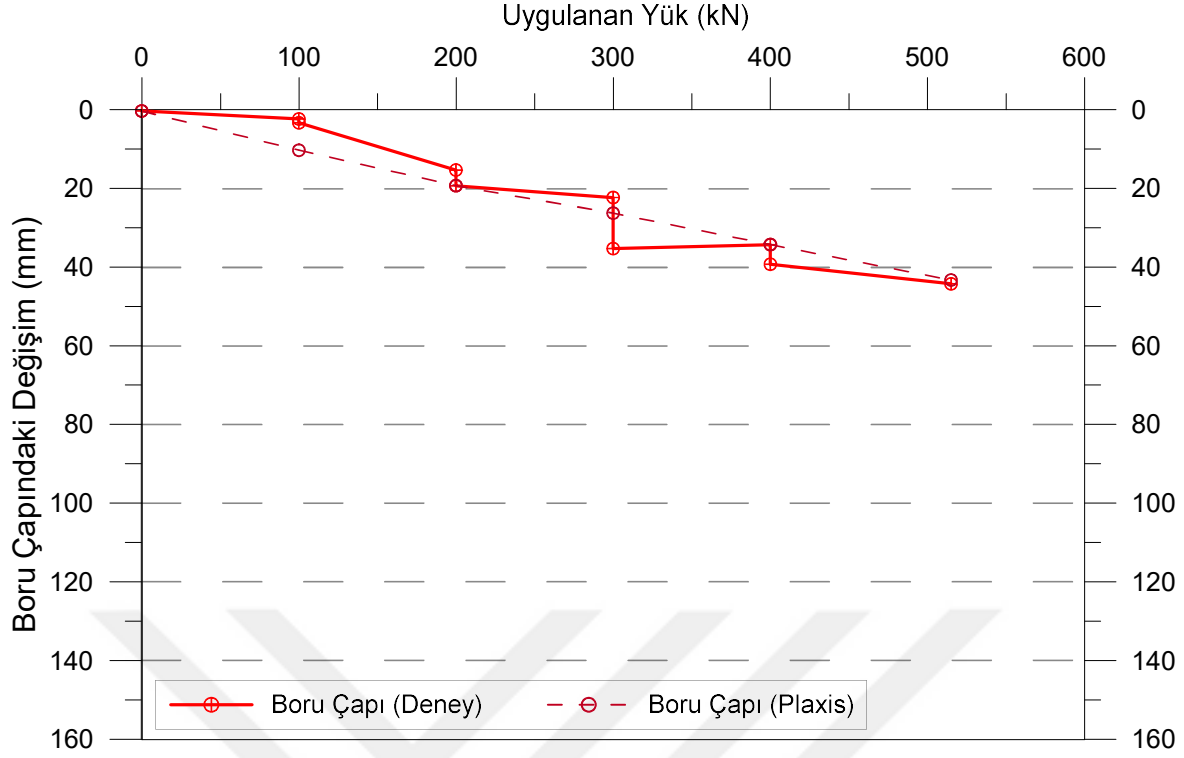
Arazi boru yükleme deneyinin sayısal analizi tamamlandıktan sonra HDPE boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanılması parametrik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda kullanılan EPS Geofom malzeme parametreleri “2.2.1.3 – EPS Geofom malzeme parametreleri” başlığı altında belirtilen Tefera vd. (2010)’den alınmıştır. Bu araştırmada belirlenen EPS Geofom malzeme yoğunlukları sırası ile 20 kg/m³, 30 kg/m³ ve 40 kg/m³ olup; EPS20, EPS30 ve EPS40 olarak isimlendirilmiştir. Bu üç farklı EPS Geofom malzemenin gerilme – şekil değiştirme davranışları ise aynı alt başlık içerisinde bulunan “Şekil 2.14 – EPS Geofom malzemeler için gerilme – şekil değiştirme grafiği (Tefera, 2010)” ile gösterilmiştir. Kullanılan diğer parametreler ise aynı bölümde bulunan Tablo 2.8 ile paylaşılmıştır.

4.4 Kalibre Edilmiş Verilerin Karşılaştırılması

Arazi boru yükleme deneyi Plaxis 2D programı ile modellenmiş ve daha önce deneyde ölçülen (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) oturma ve esneme değerleri sayısal analiz hesap sonuçları ile Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda oturma ve esneme değerlerinin birbirine oldukça yakın olmasının yanı sıra davranış olarak arazi deneyine yakın sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.11 Boru altında, boru üstünde ve yükleme plakasında meydana gelen oturmaların karşılaştırılması



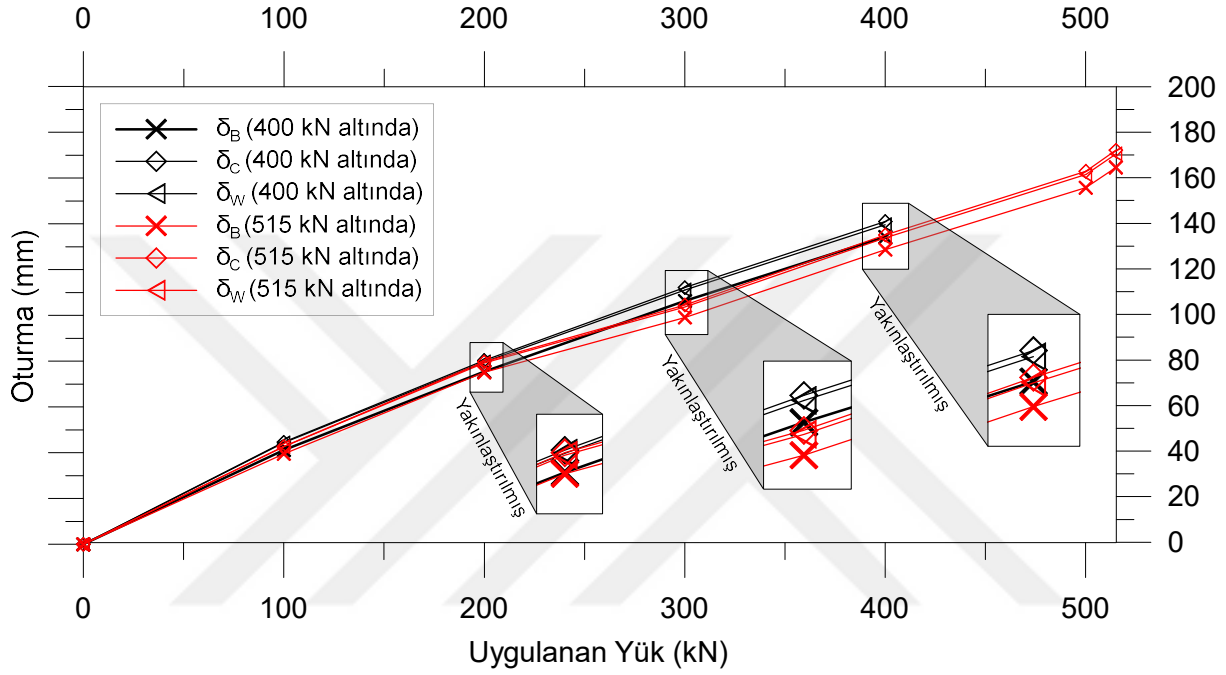
Şekil 4.12 Boru çapında meydana gelen değişimlerin karşılaştırılması

Borunun üzerinde ve altında meydana gelen oturma değerleri yükleme plakasından aktarılan yük 515 kN olduğu anda sırasıyla yaklaşık olarak 132 mm ve 40 mm olarak ölçülmüştür. Aynı yük altında meydana gelen oturmalar ise sayısal analizlerde sırası ile 130 mm ve 43 mm olarak hesaplanmıştır. Boru iç çapı $\text{Ø}300$ mm olduğundan, oturma değerleri arasındaki fark boru çapının %1'ini geçmemektedir. Deneyde ölçülen ve sayısal analizden hesaplanan değerlerin birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

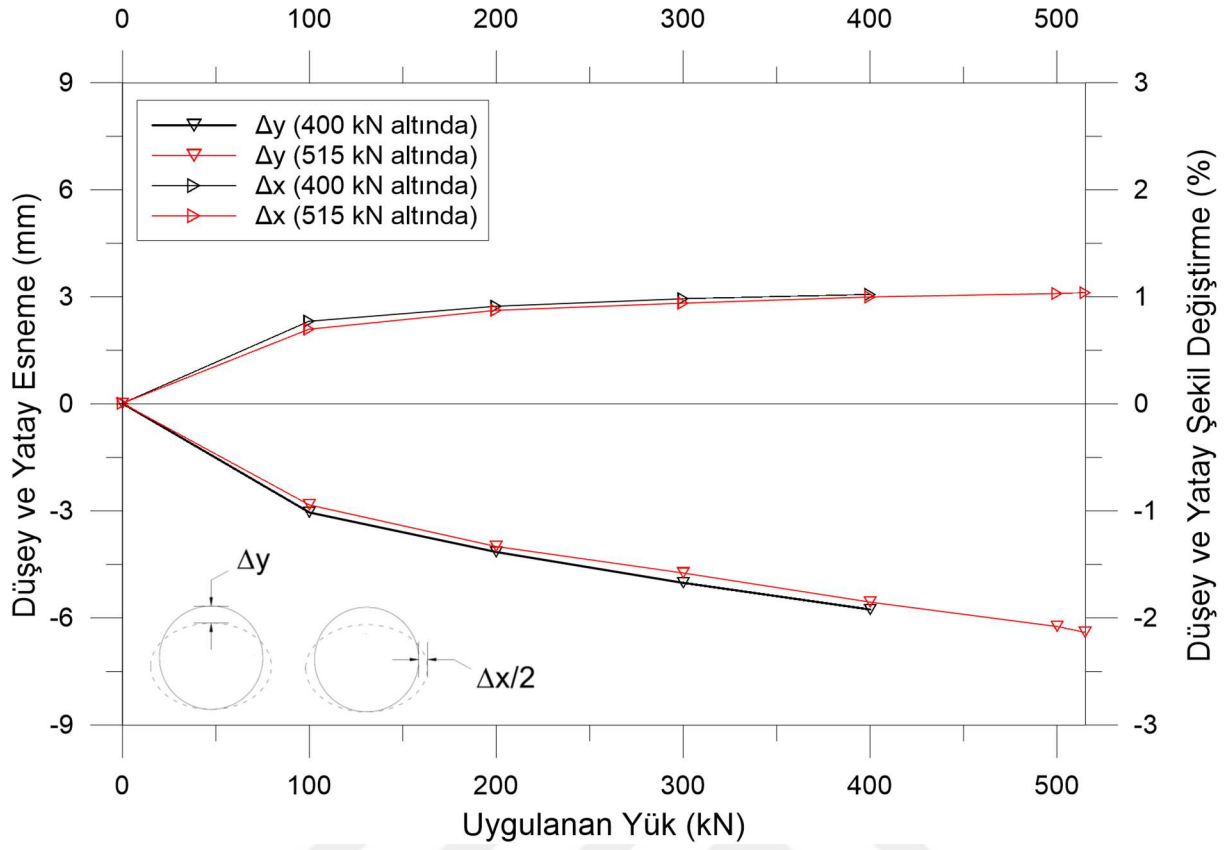
Yüksek dolgu gerilmelerine maruz kalan uygulamaları dikkate alabilmek için Şekil 4.10'da gösterilen modelde boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanılması durumunda boru davranışı incelenmiştir. Bu araştırma yapılırken deneyde ulaşılan 515 kN yük yerine toplamda 400 kN yük altında bir tasarım yapılmasına karar verilmiştir. Bu yük, deney modelinde olduğu gibi yükleme plakası yerine doğrudan 1m kalınlığında dolgu katmanları ile boru üzerine aktarılmıştır. Kullanılan dolgu zemine ait parametreler ise Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Yapılan analizlerde maksimum yükleme değeri olarak 515 kN ve 400 kN değerinin kullanıldığı durumlardaki sonuçlar hem oturma hem de esneme değerleri sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. Analizlerde 400 kN yükleme yapılırken dolgu yükü her kademedede 1 m (20 kN) olarak ele alınırken, 515 kN yükleme yapılırken her kademedede 5

m (100 kN) olarak ele alınmıştır. Yükleme hassasiyeti ile ortaya çıkan farklar ise oturma değerlerinde 6 mm'yi geçmezken, yatay esneme değerlerinde %0.02 ve düşey esneme değerlerinde %0.09 olarak hesaplanmıştır. Oturma grafiğinin paylaşıldığı Şekil 4.13'te birbirine çok yakın olan noktalar yakınlaştırılmış olarak grafiğin içerisinde detaylandırılmıştır. Bu sayede yükleme hassasiyetinin farklı olduğu durumlarda bile değerleri birbirine ne ölçüde yakın olduğu ortaya konmuştur.



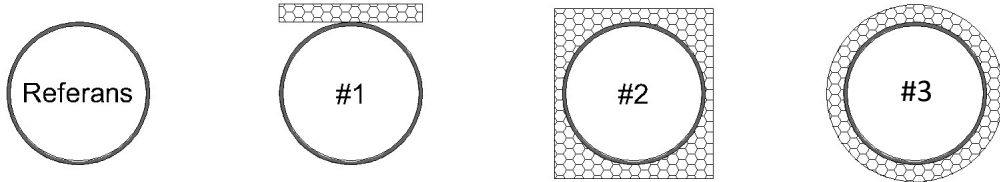
Şekil 4.13 Sayısal analizler ile elde edilen oturma değerlerinin 400 kN ve 515 kN yük altında karşılaştırılması



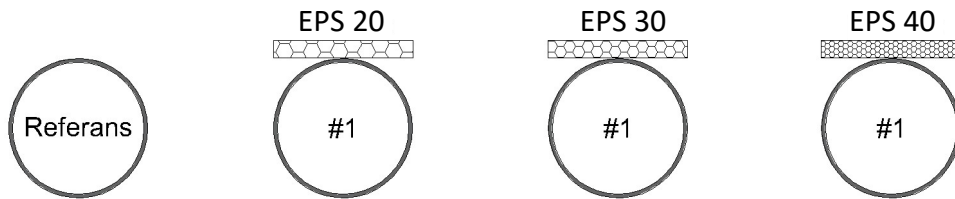
Şekil 4.14 Sayısal analizler ile elde edilen esneme değerlerinin 400 kN ve 515 kN yük altında karşılaştırılması

5.1 İncelenen Parametreler ve Değerlendirme Yöntemleri

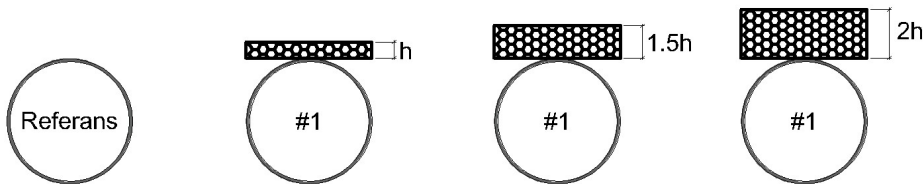
Arazide yapılan boru yükleme deneyinden yararlanılarak oluşturulan Şekil 4.9'da gösterilen model dikkate alınarak parametrik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, EPS Geofom malzemenin geometrik özellikleri ve yoğunluk değişimi incelenmiştir. Ayrıca, EPS Geofom malzemenin boruyu çepeçevre sarması durumunda köşeli bir geometri yerine dairesel bir geometri kullanımının farkları araştırılmıştır. Kullanılan bu geometriler sırası ile referans (EPS kullanılmaması), Konfigürasyon #1 (EPS'nin borunun üzerinde olması), Konfigürasyon #2 (EPS'nin köşeli şekilde çepeçevre boruyu sarması) ve Konfigürasyon #3 (EPS'nin dairesel olarak boruyu sarması) olarak belirtilmiştir (Şekil 5.1). Bu değişimlerin yanı sıra EPS Geofom malzemenin değişimi (Şekil 5.2), kalınlığı değişimi (Şekil 5.3) ve genişliğinin değişimi (Şekil 5.4) incelenmiştir.



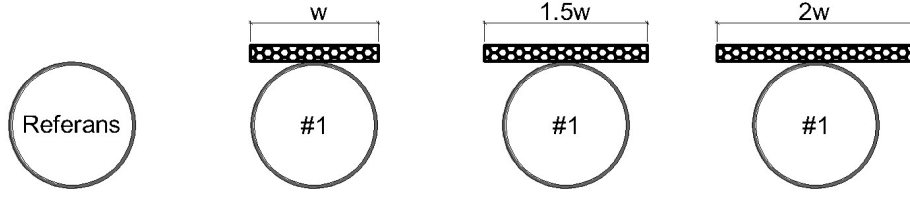
Şekil 5.1 Farklı geometriler için EPS konfigürasyonları



Şekil 5.2 EPS malzemenin yoğunluğunun artması durumu



Şekil 5.3 EPS malzeme kalınlığı değişimi



Şekil 5.4 EPS malzemenin genişliğinin değişimi

EPS Geofom malzeme üzerindeki bu değişimlerin dışında içerisine boru yerleştirilen hendek dolgusunun (kırıntı) elastisite modülü değerinin değişimi ele alınmıştır. Elastisite modülü yüksek ve düşük bir malzeme içerisinde EPS Geofom ile borunun birlikte davranışı incelenmiştir. Hendek dolgusu olarak granüler bir malzeme olan kırıntı kullanılması yanı sıra kohezyonlu bir zemin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son olarak boru rijitliği azaltıldığında, boruya etkileyen gerilmeler ve kemerlenme faktörlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

5.1.1 Yatay ve düşey kemerlenme faktörü

Boru üzerine etkileyen yatay ve düşey zemin gerilmelerini hesaplamak için kullanılan geleneksel yöntemlerden biri yatay ve düşey kemerlenme faktörlerini belirlemektir. Bu faktörler boyutsuz olmakla birlikte borunun yük altında zemin ile etkileşimi sonucunda meydana gelen kemerlenme davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır. Sırası ile düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) aşağıda belirtilen denklemler ile hesaplanmıştır:

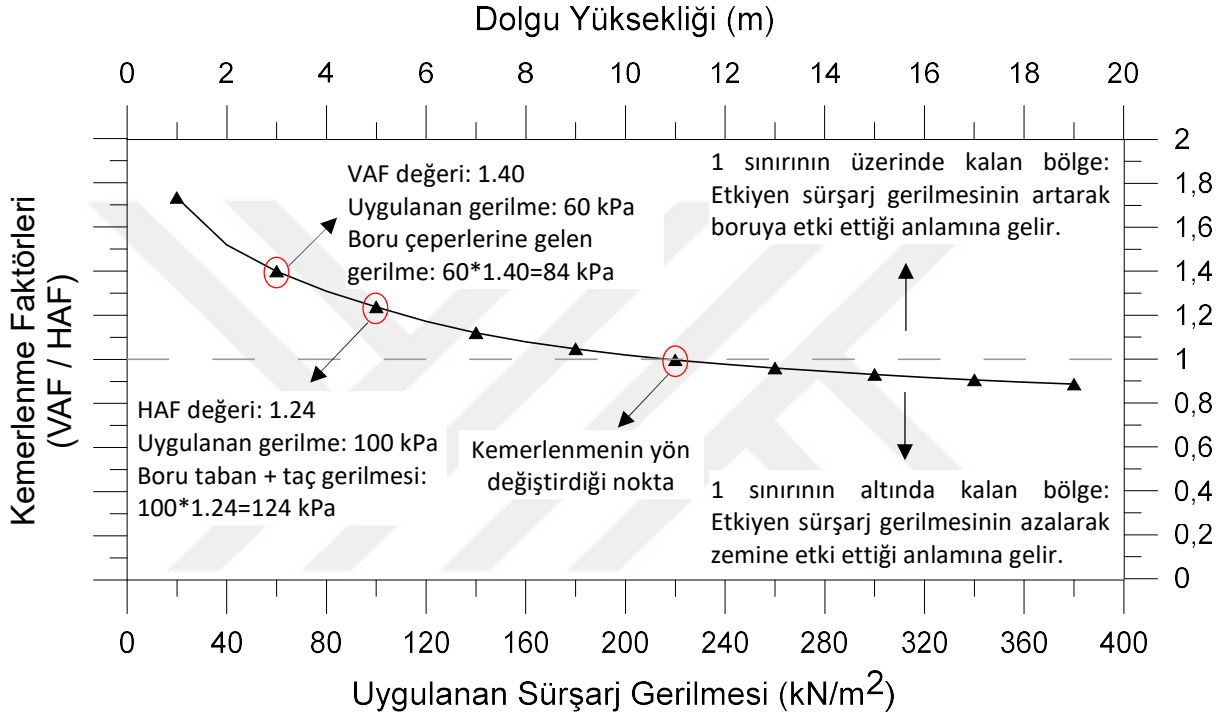
$$VAF = \frac{W_e}{PL} = \frac{2N_{sp}}{PL} \quad (5.1)$$

$$HAF = \frac{W_h}{PL} = \frac{N_c + N_i}{PL} \quad (5.2)$$

Denklemler 5.1 ve 5.2'de bulunan değerler W_e = düşeydeki toplam zemin yükünü, W_h = yataydaki toplam zemin yükünü, PL = Prizma yükünü (dolgu yüksekliği x birim hacim ağırlık), N_{sp} = boru yatay eksenine gelen zemin gerilmesini, N_c = boru tacındaki toplam zemin gerilmesini ve N_i = boru tabanındaki toplam zemin gerilmesini ifade etmektedir.

Bu denklemlerden yararlanılarak elde edilen kemerlenme faktörleri EPS Geofom malzeme, zemin ve boru parametrelerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesinde önemli rol oynamıştır. Bu sayede her bir parametre değişiminde gerilme, oturma ve

esneme değerlerini vermek yerine doğrudan kemerlenme faktörlerinin değişimi incelenmiş ve değişen bu parametrelerin sebep olduğu davranışlar grafikler yardımı ile sunulmuştur. Bu grafiklerde belirtilen değerlerin anlaşılması için örnek bir grafik Şekil 5.5 ile paylaşılmıştır. Bu örnek üzerinden düşey kemerlenme faktörünün sayısal değeri ile boru çeperlerine gelen toplam gerilmeler arasındaki ilişki ve yatay kemerlenme faktörünün sayısal değeri ile boru tacı ve tabanına gelen toplam gerilmeler arasındaki ilişki sayısal olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Kemerlenme faktörünün değişimini gösteren örnek grafik üzerinden açıklamalar

5.2 Parametre Değişimlerinin İncelenmesi

Parametre değişimleri incelenirken öncelikle EPS Geofom malzemenin yoğunluğu ve geometrisi ele alınmıştır. Ardından kalınlığının ve genişliğinin de boru üzerindeki gerilmelere etkisi araştırılıp, hendek malzemesi üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Bu parametrik çalışma sonucunda deneyde kullanılan kırmataşın daha yüksek ve daha düşük elastisite modülüne sahip olduğu durumlarda sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ardından hendek tamamen kil ve kumlu silt malzeme ile doldurulup borunun bu zemin içindeki davranışı incelenmiştir. Son olarak borunun rijitliği azaltıldığında davranış değerlendirilmiştir.

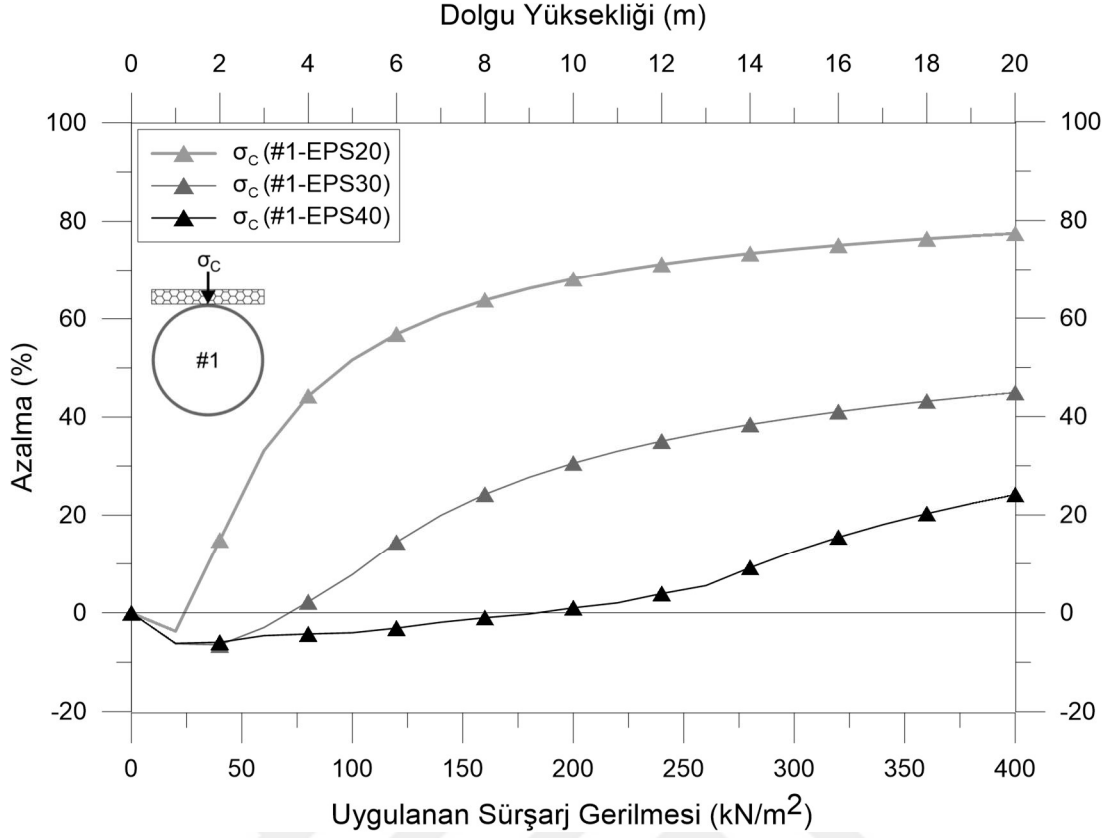
5.2.1 EPS Malzemenin Yoğunluğunun ve Geometrisinin Değişimi

EPS Geofom malzeme Bölüm 4'te belirtildiği üzere EPS20, EPS30 ve EPS40 olarak üç farklı yoğunluk değeri yalnızca borunun üzerinde EPS olması durumu için EPS'siz referans deney verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerler borunun üzerinde, altında ve yanında meydana gelen düşey ve yatay zemin gerilmelerinin yüzde azalmaları olarak grafikler ile sunulmuştur. Bu azalma değerlerinin yanı sıra yoğunluk değişiminin kemerlenme faktörlerine olan etkileri de incelenmiştir.

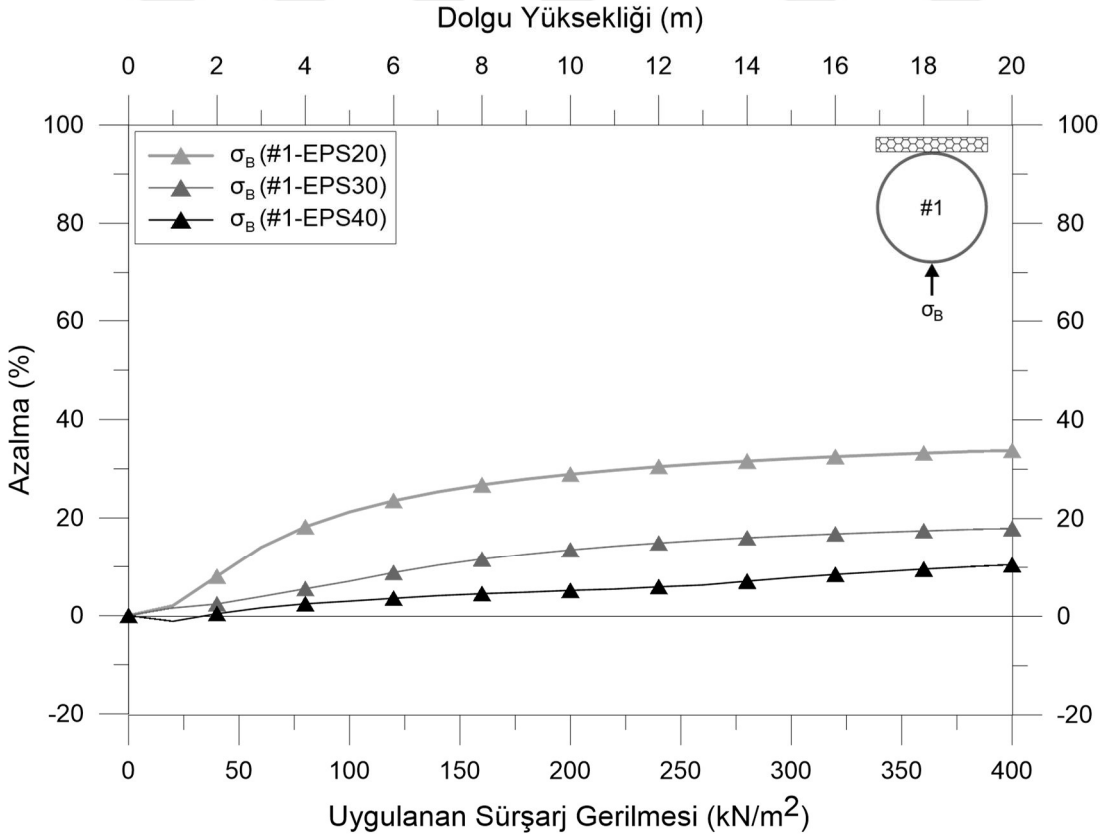
EPS Geofom malzemenin yoğunluğunun değiştirilmesi ile boru tacında, tabanında ve yan çeperinde meydana gelen düşey ve yatay zemin gerilmelerindeki azalmalar sırası ile Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 ile gösterilmiştir. Bu grafiklerde referans durum göz önünde bulundurularak EPS Geofom malzemenin farklı yoğunlukları için gerilmelerdeki azalmalar yüzde (%) olarak ifade edilmiştir. Grafiklerde düşey eksen bu yüzdelerdeki azalmaları temsil ederken grafiğin üstünde bulunan yatay eksen zemin üzerindeki dolgunun yüksekliğini, grafiğin altında bulunan yatay eksen dolgu yükünden kaynaklanan sürşarj gerilmesini temsil etmektedir.

Boru tacındaki gerilmelere bakıldığında (Şekil 5.6) EPS yoğunluğunun azalması ile meydana gelen düşey zemin gerilmelerinde azalma gözlemlenmektedir. Bu azalma EPS20 için yaklaşık %78 değerine ulaşırken EPS30 için %45, EPS40 için ise %24 değerinde olmuştur. Ayrıca EPS40 kullanılan sayısal analizlerde, dolgu yüksekliği 10m'den az olduğunda boru tacı gerilmelerinde artış meydana geldiği görülmüştür.

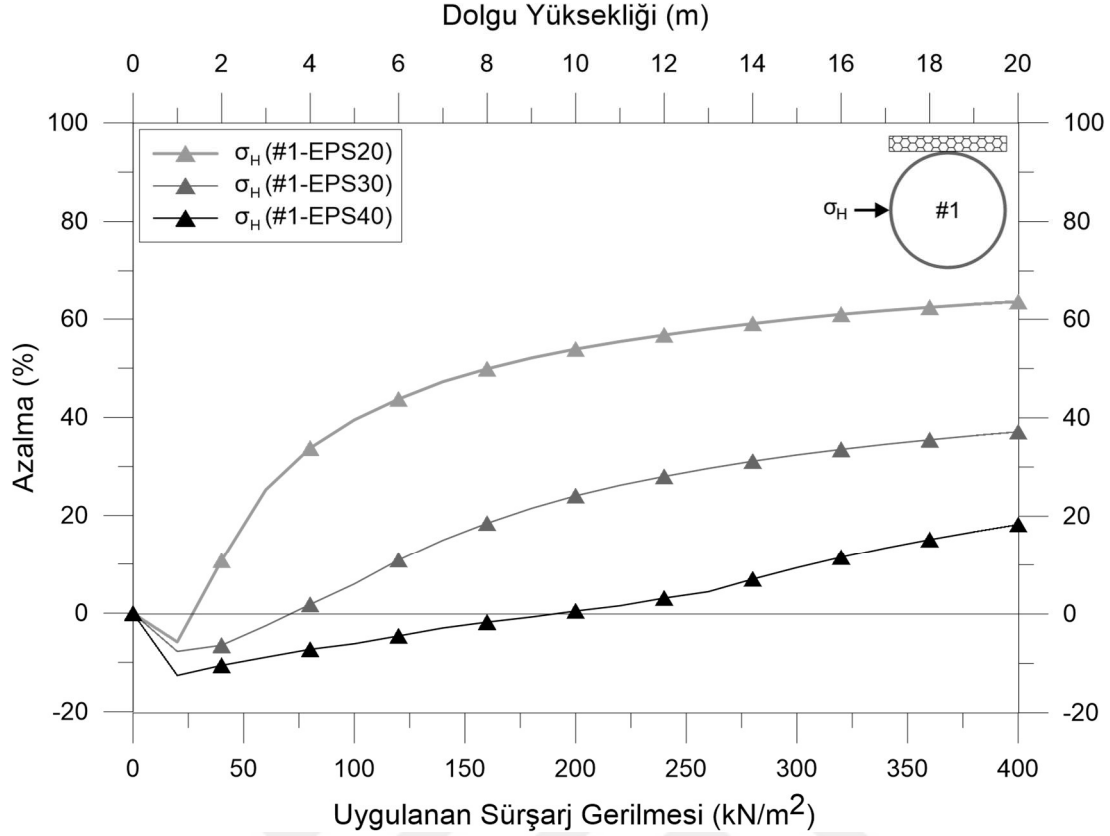
Boru tabanındaki düşey zemin gerilmeleri ve boru yan çeperindeki yatay zemin gerilmelerinde de aynı davranışın ortaya çıktığı Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de görülmektedir. EPS20 kullanımında boru tabanındaki gerilmeler %30'un üzerinde azalma gösterirken boru yanında bu azalma değeri %63'e kadar ulaşmaktadır. EPS30 için aynı noktalardaki azalmaların sırası ile %19 ve %38 olduğu görülürken, EPS40 için %10 ve %19 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6 EPS malzeme yoğunluğunun boru tacındaki düşey gerilmelere etkisi



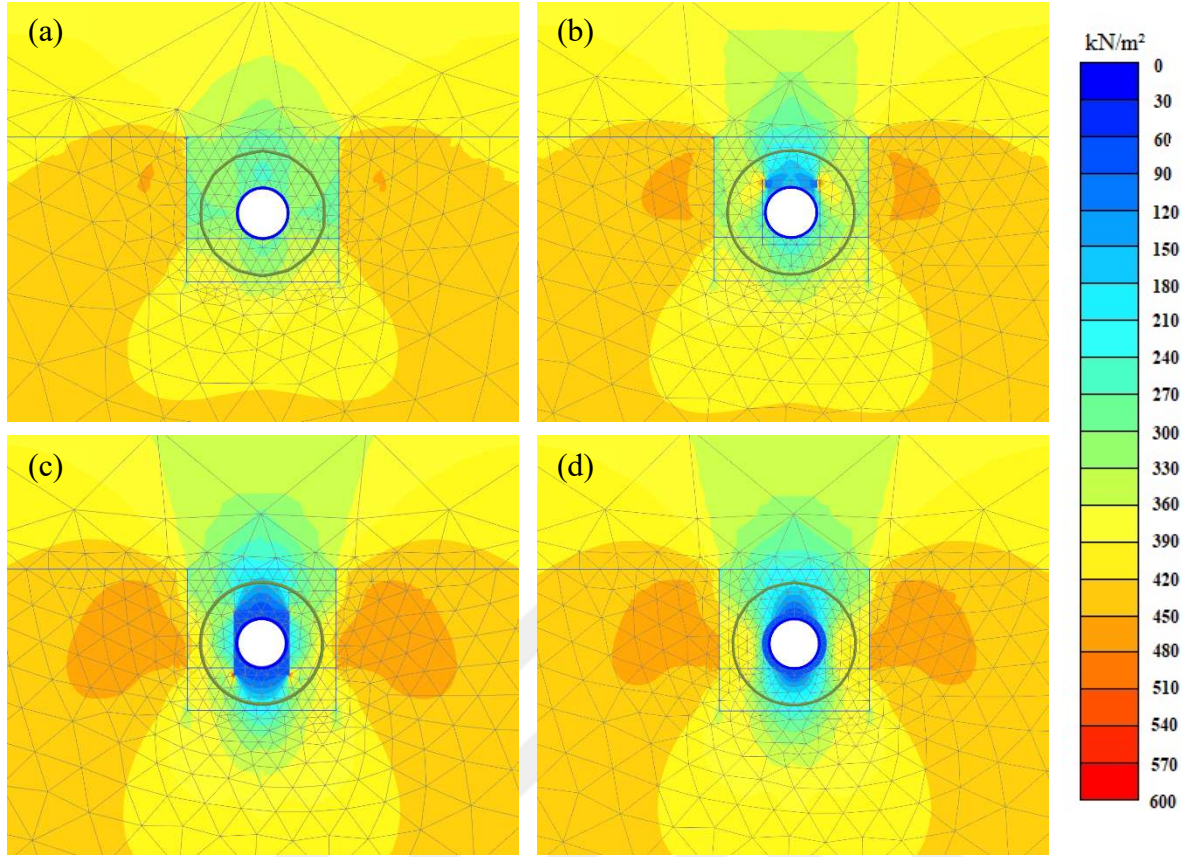
Şekil 5.7 EPS malzeme yoğunluğunun boru tabanındaki düşey gerilmelere etkisi



Şekil 5.8 EPS malzeme yoğunluğunun boru yanındaki yatay gerilmelere etkisi

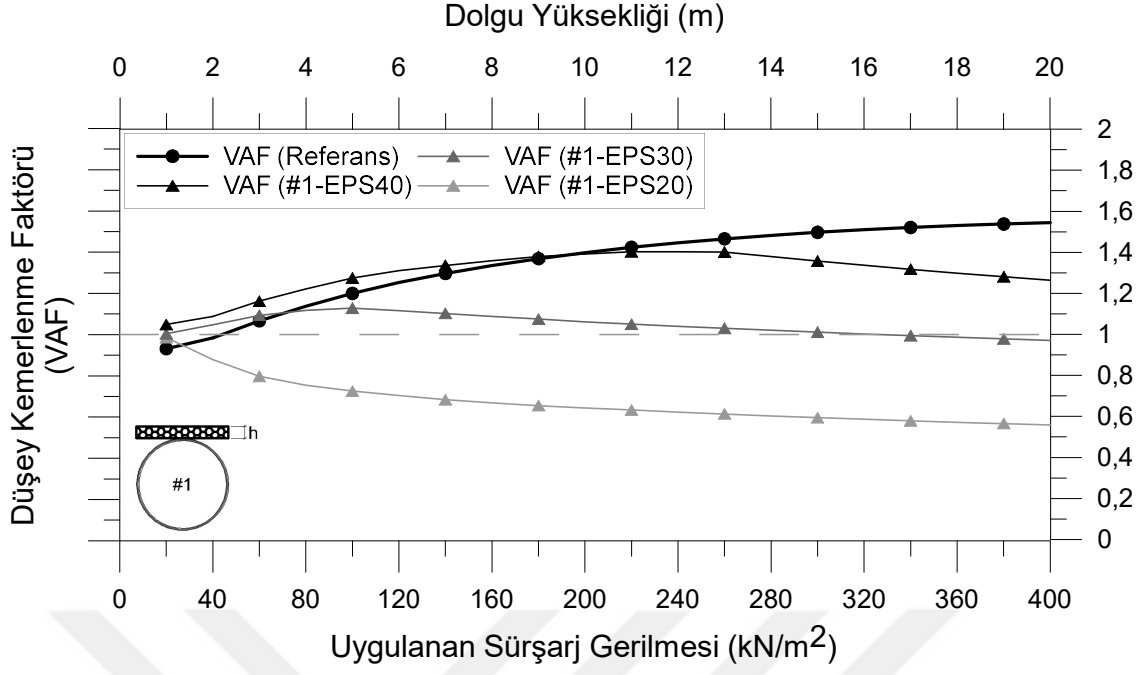
Zemin içerisinde meydana gelen düşey zemin gerilmelerinin bu konfigürasyonlara göre şematik olarak gösterimi ise Şekil 5.9'da sunulmuştur. Bu şekil içerisinde referans analiz ve farklı konfigürasyonlar için düşey zemin gerilmelerin dağılımı görülmektedir. EPS Geofom kullanımı ile boru etrafında düşey zemin gerilmeleri azalmış, konfigürasyona bağlı olarak ise zemin içerisinde artış göstermektedir. Özellikle Konfigürasyon #2 ve #3 durumunda boruya etkileyen gerilmelerin oldukça azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen düşey ve yatay kemerlenme faktörleri hem borunun hem zeminin davranışını değerlendirmek için Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Düşey kemerlenme faktörü, kemerlenme sayesinde düşeyde meydana gelen gerilmelerin hangi oranda zemine geri aktarıldığını ve yatay zemin gerilmelerine dönüştüğünü gösterirken, yatay kemerlenme faktörü buna zıt olarak boru tacında ve tabanında meydana gelen gerilmelerdeki değişiminin prizma yüküne oranını göstermektedir. Bu oran 1 değerinin üzerinde olması uygulanan yükün artarak boruya iletildiğini, 1 değerinin altında olması ise uygulanan yükün azalarak boruya etki ettiği anlamına gelmektedir.



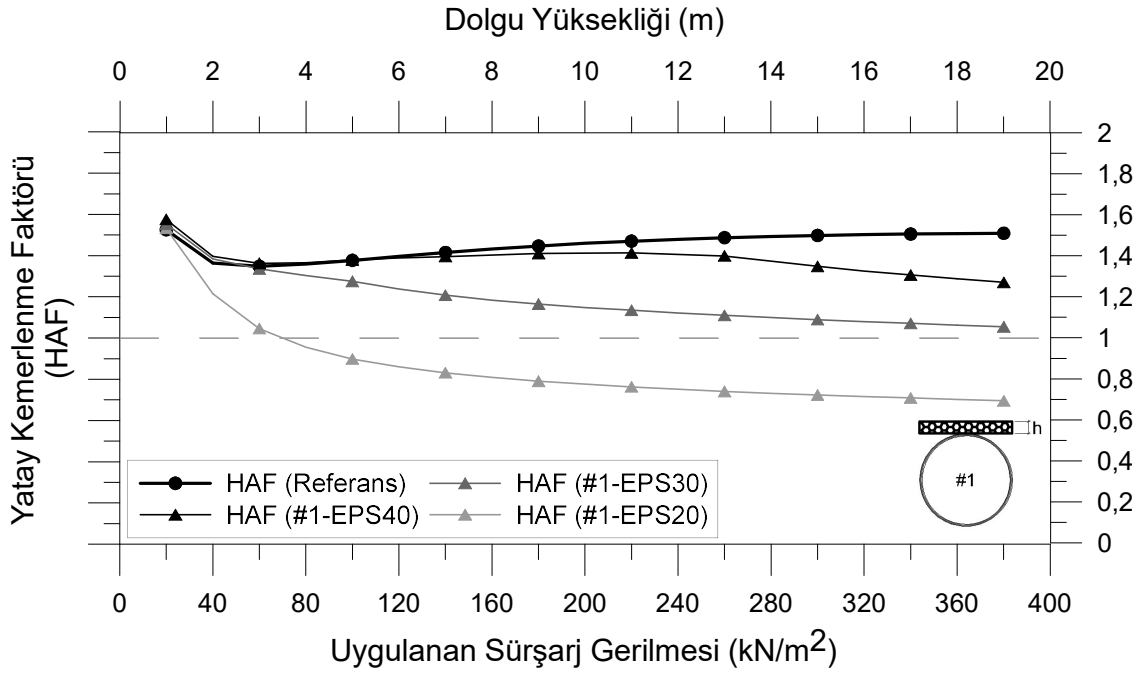
Şekil 5.9 Plaxis 2D programı ile modellenmiş Ø300 mm çapa sahip SR32 rijitliğindeki bir borunun farklı EPS geometrileri ile 400 kPa yük altındaki düşey gerilme dağılımları: (a) Referans (b) Konfigürasyon #1 (c) Konfigürasyon #2 (d) Konfigürasyon #3

Boru üzerinde EPS bulunması (Konfigürasyon #1) durumunda farklı EPS yoğunlukları için yapılan analizlerden elde edilen düşey kemerlenme faktörlerinin gerilme ile değişimi Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi referans konfigürasyonda düşey kemerlenme faktörü 20 metrelik dolgu altında 1.5 değerini aşarken farklı EPS yoğunlukları için bu değer 1.27 ile 0.58 arasında değişmiştir. Boru çeperine aktarılan düşey zemin gerilmeleri EPS40 kullanıldığı durumda toplam dolgu yükünün 1.27 katına çıkarken, EPS20 kullanıldığı durumda toplam dolgu yükünün yalnızca %58'i boru çeperine etki etmektedir. EPS30 kullanıldığı durumda ise yaklaşık 10 metre dolgu yüksekliğinden itibaren düşey kemerlenme etkisi 1 değerine yakın sonuçlar göstermektedir.



Şekil 5.10 Konfigurasyon #1'de farklı EPS yoğunlukları için VAF değişimleri

Yatay kemerlenme faktörü de yaklaşık olarak düşey kemerlenme faktörü ile paralel sonuçlar göstermektedir. Referans durumda 1.5 değerine ulaşan HAF değeri EPS20 kullanımı ile 0.7 değerine kadar azalabilmektedir. EPS Geofom malzemenin yoğunluğunun artması ile birlikte bu değer EPS30 için 1, EPS40 için ise yaklaşık 1.25 değerine ulaşmaktadır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Konfigurasyon #1'de farklı EPS yoğunlukları için HAF değişimleri

Kemerlenme faktörlerinin farklı EPS yoğunluğu ile değişimi incelendiğinde, düşük yoğunluklu EPS Geofom malzeme kullanımı ile kemerlenme etkisi zemin içerisinde aktif şekilde ortaya çıkmaktadır. Yoğunluğu yüksek EPS malzemelerde yeterli sıkışma gerçekleşmediği için kemerlenme etkisi referans duruma göre daha aktif olsa bile, zemin üzerinde bulunan dolgu yüklerinin azaltılarak boruya iletilmesine imkân vermemektedir.

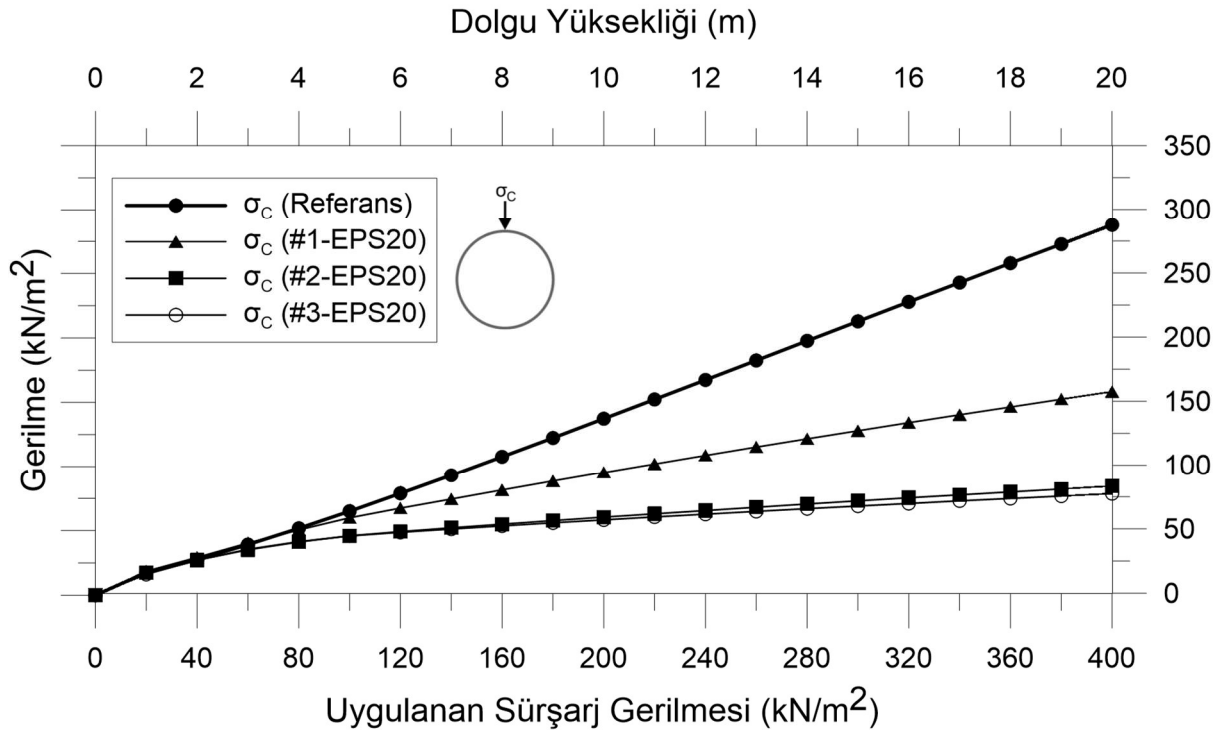
Bunun yanı sıra kemerlenme faktörleri boruya gelen yanal ve düşey zemin gerilmeleri ile doğrudan alakalı olduğu için yalnızca kemerlenme faktörlerine bakarak gerilmeler hakkında bilgi edinilebilir. Bu bilgilerden ise boru altında, üstünde ve zemin içerisinde meydana gelen oturmalarla ilişkilendirilebilir. Örnek olarak EPS20 malzeme kullanımında kemerlenme faktörleri diğer yoğunluk değerlerine göre daha düşük değerlere ulaşabildiği için boru çeperine gelen gerilmeler daha düşük olacaktır. Bu nedenle EPS20 kullanımında boru tabanında ve boru üzerinde meydana gelen gerilmeler daha düşük, zemin içerisinde meydana gelen oturmalar ise daha yüksek olacaktır. Aynı nedenle çap değişimleri de sırasıyla küçükten büyüğe EPS20, EPS30 ve EPS40 kullanımında meydana gelecektir. Bu bilgilerin karşılaştırması için elde edilen oturma ve esneme verileri kemerlenme faktörüne bağlı olarak Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Dolgu yüksekliğinin 10 metre (200 kPa) ve 20 metre (400 kPa) olduğu durumda meydana gelen oturmaların ve esnemelerin kemerlenme faktörleri ile ilişkisi

		VAF	HAF	δ_c (mm)	δ_b (mm)	δ_w (mm)	Δx (%)	Δy (%)
200 kPa	REF	1.40	1.46	80.32	75.46	79.61	0.91%	-1.39%
	EPS40	1.39	1.41	80.98	75.59	79.89	1.04%	-1.54%
	EPS30	1.06	1.15	78.64	75.22	79.83	0.65%	-0.98%
	EPS20	0.64	0.78	74.87	74.49	79.97	-0.04%	-0.11%
400 kPa	REF	1.54	1.51	141.05	134.28	139.66	1.02%	-1.93%
	EPS40	1.26	1.25	139.85	134.20	139.96	0.90%	-1.62%
	EPS30	0.97	1.05	136.51	133.56	139.88	0.36%	-0.84%
	EPS20	0.56	0.69	130.34	132.24	140.06	-0.72%	0.54%

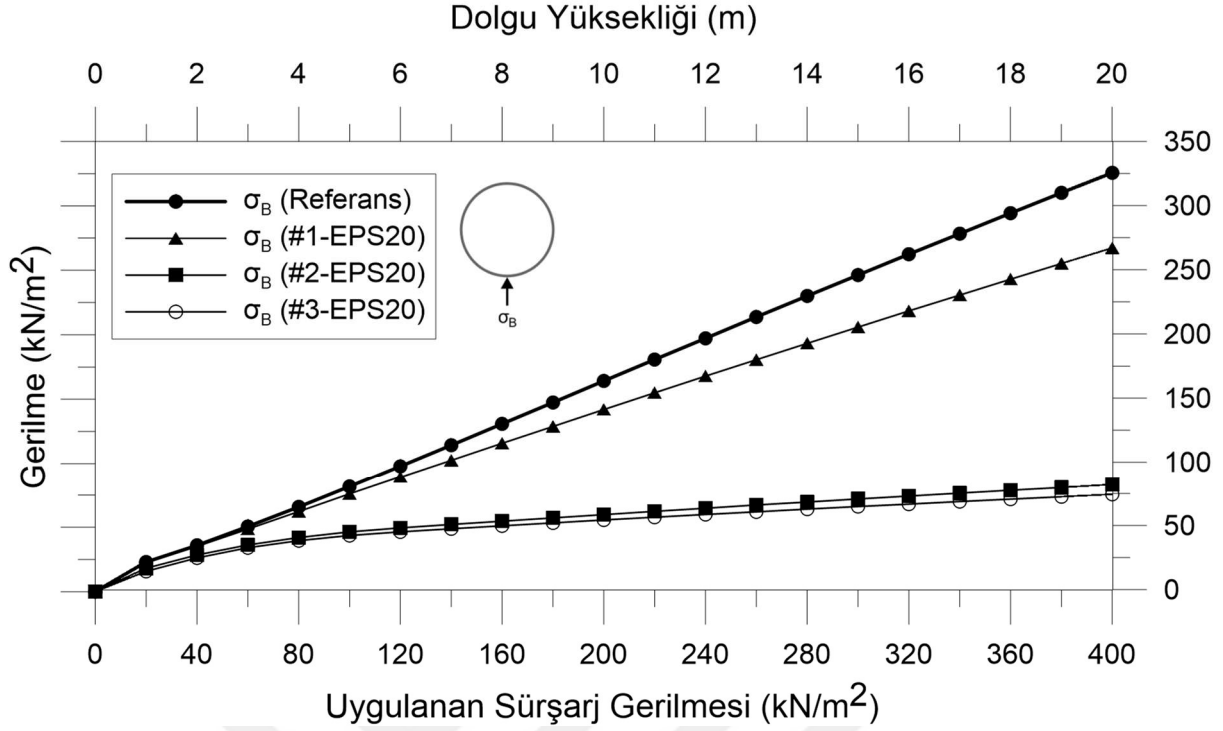
EPS Geofoam malzeme Şekil 5.1'de gösterilen geometrilerde boru ile birlikte kullanılarak, boru davranışı incelenmiştir. Belirtilen geometrik koşullar altında boru tabanında, tacında ve yanında meydana gelen zemin gerilmelerinin yanı sıra zeminde meydana gelen düşey ve yatay kemerlenme faktörleri de incelenmiştir. Yapılan analizlerde tüm geometriler için EPS20 yoğunluğunda Geofoam malzeme kullanımı araştırılmıştır.

Öncelikle boru tacında meydana gelen gerilmelere bakıldığında (Şekil 5.12) EPS malzeme olmayan durumda düşey zemin gerilmelerinin 275 kPa değerine ulaştığı görülürken boru üzerine EPS konulduğu durumda (#1-EPS20) gerilmelerin yaklaşık 150 kPa değerine kadar azaldığı görülmektedir. Aynı noktadaki gerilmeler borunun dikdörtgen (#2-EPS20) ve dairesel (#3-EPS20) şekilde çepeçevre sarılması durumunda ise birbirine oldukça yakın ve yaklaşık 75 kPa değerine kadar düştüğü görülmektedir.



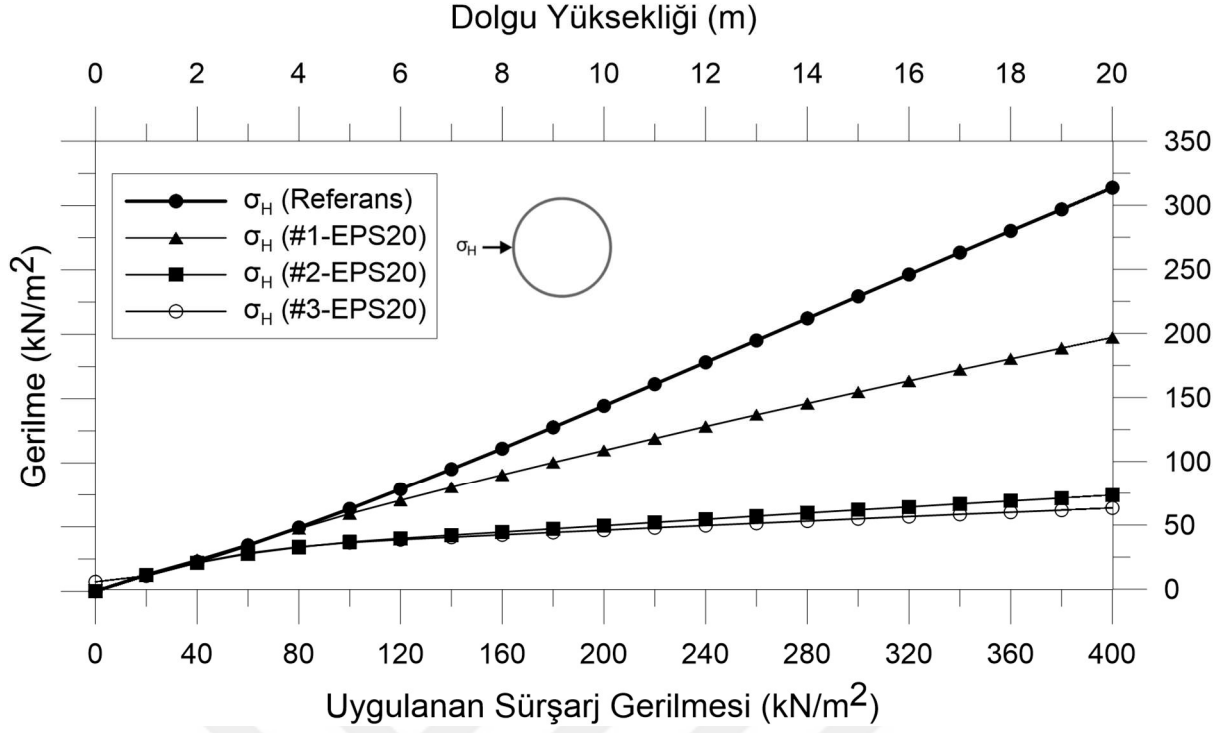
Şekil 5.12 EPS konfigürasyonlarına göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri

Boru tabanına gelen düşey zemin gerilmelerinde ise Konfigürasyon #1 durumunda azalmalar yalnızca 60-70 kPa arasında olmakla birlikte yaklaşık 260 kPa değerine kadar azalmıştır. Borunun çepeçevre EPS Geofoam malzeme ile sarıldığı durumlarda ise bu gerilmelerde %75'in üzerinde azalma meydana geldiği ve gerilme değerlerinin 75 kPa'a kadar düştüğü görülmektedir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 EPS konfigürasyonlarına göre boru tabanındaki düşey zemin gerilmeleri

Boru yan çeperine gelen yanal zemin gerilmeleri ise tabanda meydana gelen gerilme değişimleri ile paralellik göstermektedir. Boru üzerinde EPS bulunması durumunda zeminde meydana gelen kemerlenme sayesinde yanal gerilmeler azalarak yaklaşık 200 kPa değerine kadar gerilemiştir. Buna rağmen EPS malzemenin borunun etrafında çepeçevre sarılması durumunda gerilmeler EPS malzeme tarafından bir miktar daha sönümlenerek referans deneye göre yanal zemin gerilmelerinde %75'in üzerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Bu sayede referans analizde elde edilen yaklaşık 320 kPa değeri #2-EPS20 2 ve #3-EPS20 analizlerinde 75 kPa değerinin altına kadar düşmüştür. Boru yan çeperinde meydana gelen bu gerilmeler Şekil 5.14'de gösterilmiştir.

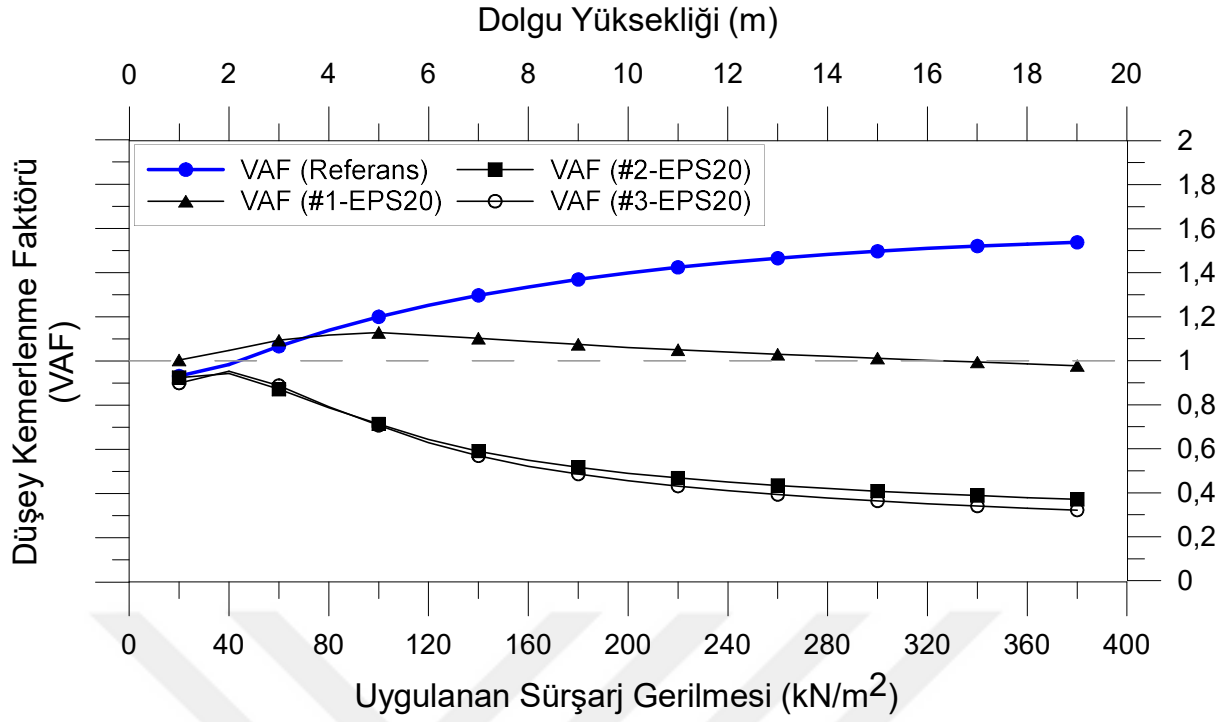


Şekil 5.14 EPS konfigürasyonlarına göre boru çevresine gelen yanal zemin gerilmeleri

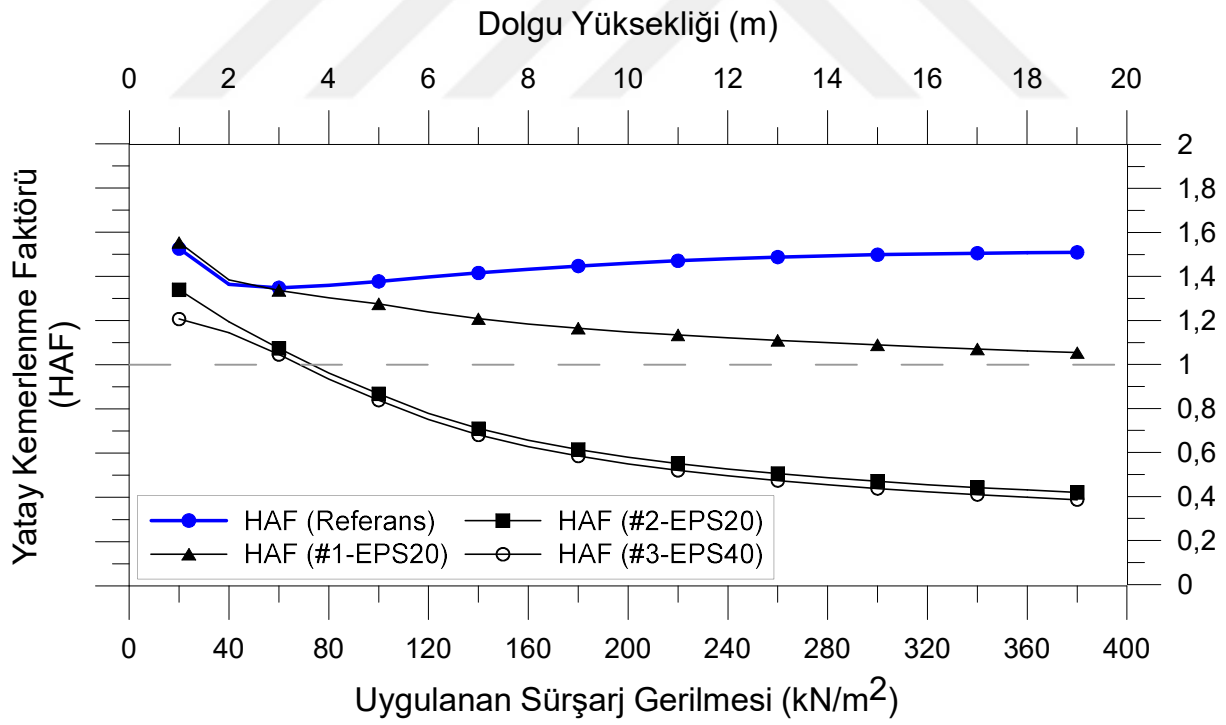
Elde edilen gerilme değişimlerinin ardından boru çevresinde meydana gelen oturmalar ve boru esneme değerleri hakkında bilgi verebilmek için Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sırasıyla düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin değişimleri sunulmuştur.

Öncelikle düşey kemerlenme faktörüne bakıldığında (Şekil 5.15) referans analizde VAF değeri 1.5 üzerindedir. Boru üzerinde EPS Geofom malzeme kullanıldığında yüksek dolgu yükleri altında VAF değeri yaklaşık 1'dir. Ancak borunun çevre EPS ile sarılması durumlarında, her yükleme aşaması için azalım göstererek 0.4 ve 0.3 değerlerine kadar azaldığı görülmüştür.

Şekil 5.16'ya bakıldığında ise HAF referans analiz için yüksek dolgu yükleri altında artarak 1.5 değerine ulaşırken Konfigürasyon #1 durumunda bu değer artan yüklemeler altında 1 değerine yaklaşmaktadır. Borunun dairesel ve dikdörtgen olarak çevre EPS Geofom malzeme ile sarılı olması durumlarında ise HAF gerilme artışıyla birlikte logaritmik olarak azalarak 0.4 değerine kadar azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.15 EPS konfigürasyonlarına göre VAF değişimleri



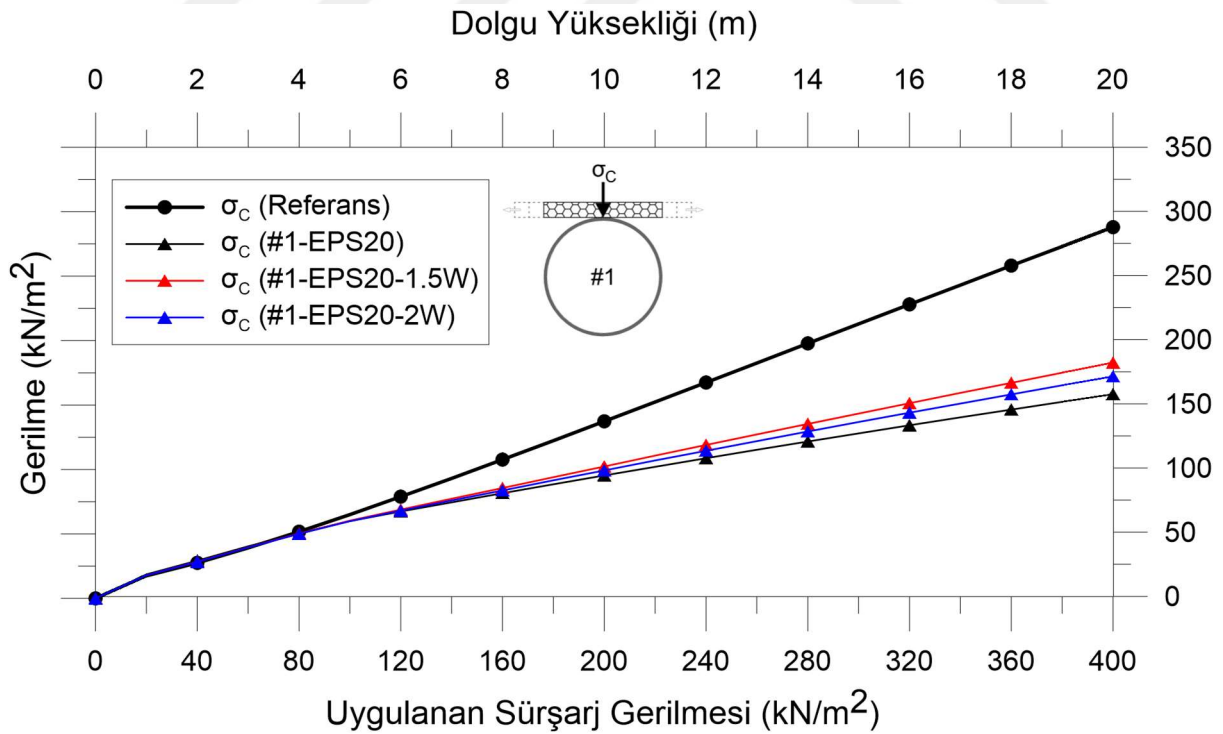
Şekil 5.16 EPS konfigürasyonlarına göre HAF değişimleri

5.2.2 EPS Malzemenin Kalınlığının ve Genişliğinin Değişimi

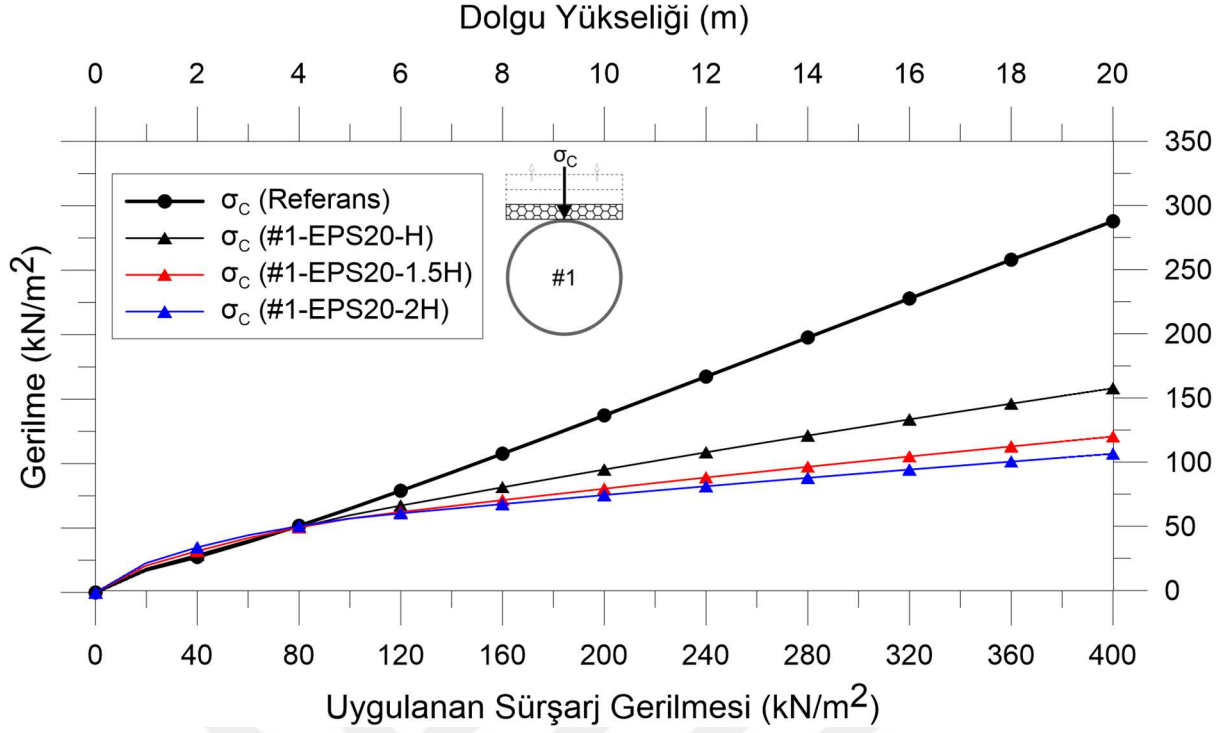
EPS Geofoam malzemenin boru uzerinde konumlandırılması ile yapılan analizlerde genişlik ve kalınlık değerlerinin değişimlerinin boru uzerindeki gerilme, oturma ve esneme değerlerindeki etkileri incelenmiştir. Bu değerimler için boru tacına gelen gerilmeler grafikler yardımı ile Şekil 5.17 ve 5.18 ile, ardından değerimlerin kemerlenme faktörleri uzerindeki etkisi Şekil 5.19 ve 5.20 ile paylaşılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda EPS Geofoam malzemenin genişliğinin 1.5 katına çıkması durumunda (#1-EPS20-1.5W) ta gerilmeleri yaklaşık 25 kPa artarken 2 katına çıkması durumunda yalnızca 15 kPa kadar artış göstermiştir (Şekil 5.17). Aynı Şekilde boru yan duvarında meydana gelen gerilmeler ise sırasıyla genişliğin 1.5 ve 2 kat artması durumunda 15 kPa ve 6 kPa artış gösterirken; boru tabanında 15 kPa ve 10 kPa azalış göstermiştir.

EPS malzemenin kalınlığının 1.5 ve 2 kat artması ile boru tacında meydana gelen gerilmeler sırasıyla 30 kPa ve 50 kPa azalırken (Şekil 5.18), boru tabanında meydana gelen gerilmeler 15 kPa ve 18 kPa kadar azalmıştır. Aynı Şekilde boru yan duvarına gelen gerilmelerde ise sırasıyla 32 kPa ve 43 kPa azalım gözlemlenmiştir.



Şekil 5.17 EPS malzemenin genişliğine göre boru tacındaki dişey zemin gerilmeleri

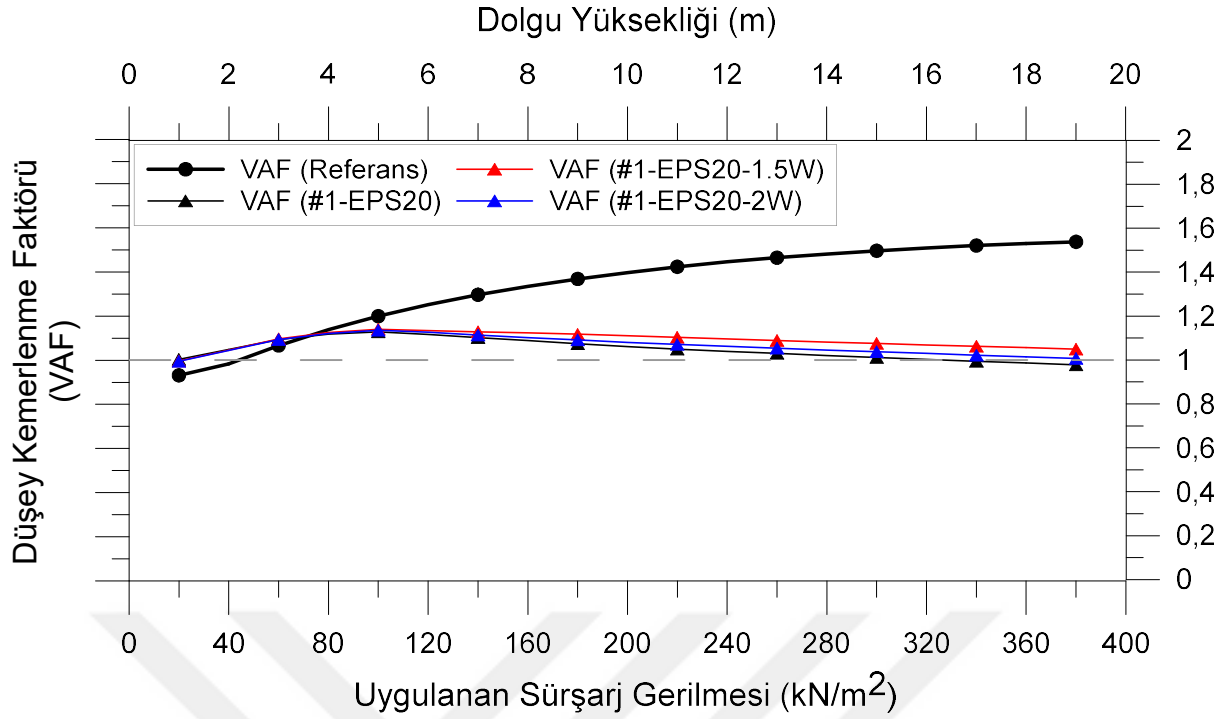


Şekil 5.18 EPS malzemenin kalınlığına göre boru tacındaki düşey zemin gerilmeleri

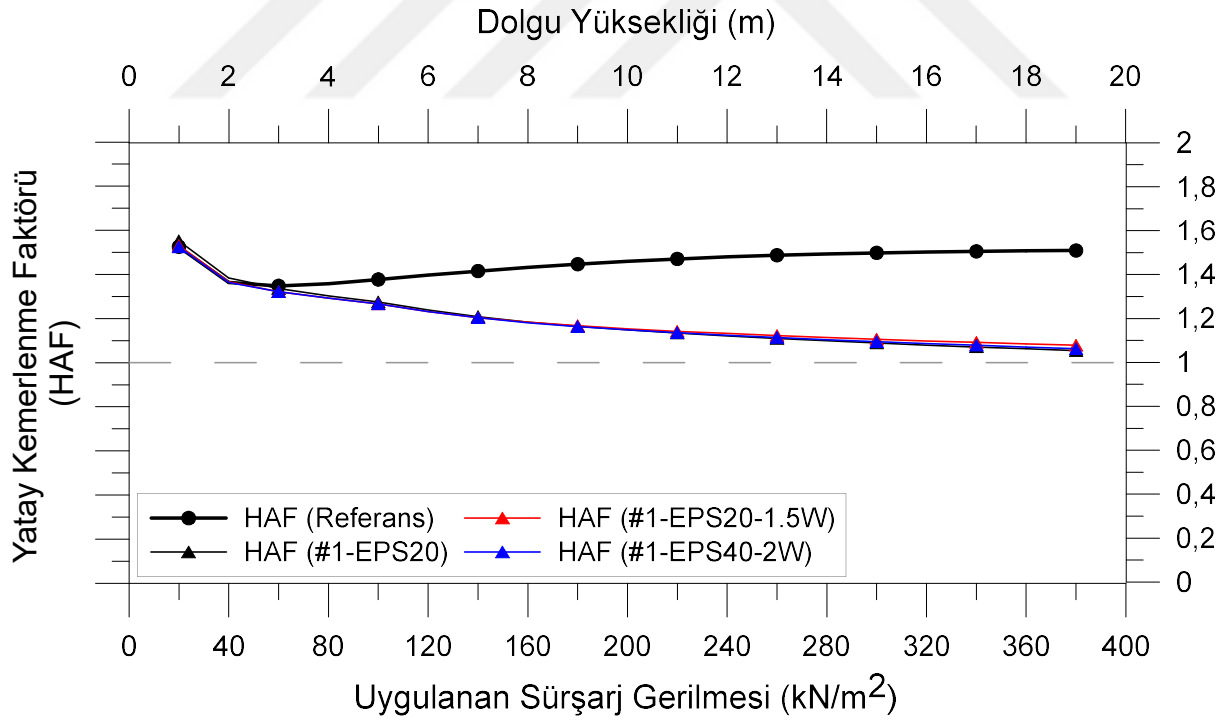
EPS genişliğinin 1.5 katına çıkması durumunda düşey kemerlenme faktörü artış göstererek 0.98 değerinden 1.05 değerine çıkarken (Şekil 5.19), yatay kemerlenme faktörü yaklaşık olarak aynı değerlerde kalmıştır (Şekil 5.20). Genişliğin artarak 2 katına ulaşması durumunda ise düşey kemerlenme faktörü bir miktar azalmış ve 1 değerine ulaşmıştır. Aynı durumda yatay kemerlenme faktörü ise diğer iki analiz sonucu ile benzer değerlerde kalmıştır.

EPS kalınlığına bakıldığında ise kalınlık değerinin artması hem yatay hem de düşey kemerlenme faktörlerinde düzenli bir azalmaya sebep olmuştur. Bu azalma sonucunda değiştirilmemiş EPS kalınlığına sahip analiz sonucunda 0.97 olan düşey kemerlenme faktörü EPS kalınlığının 1.5 ve 2 katına çıkması durumlarında sırası ile 0.81 ve 0.76 değerine kadar azalma göstermiştir (Şekil 5.21). Aynı şekilde yatay kemerlenme faktörüne bakıldığında standart EPS kalınlığına sahip HAF değeri 1.05 iken, kalınlığın 1.5 katına çıkması durumunda bu değer 0.92'ye kadar düşüş göstermiştir. Kalınlığın 2 katına çıktığı durumda ise ortaya çıkan HAF değeri 0.88'e ulaşmıştır (Şekil 5.22).

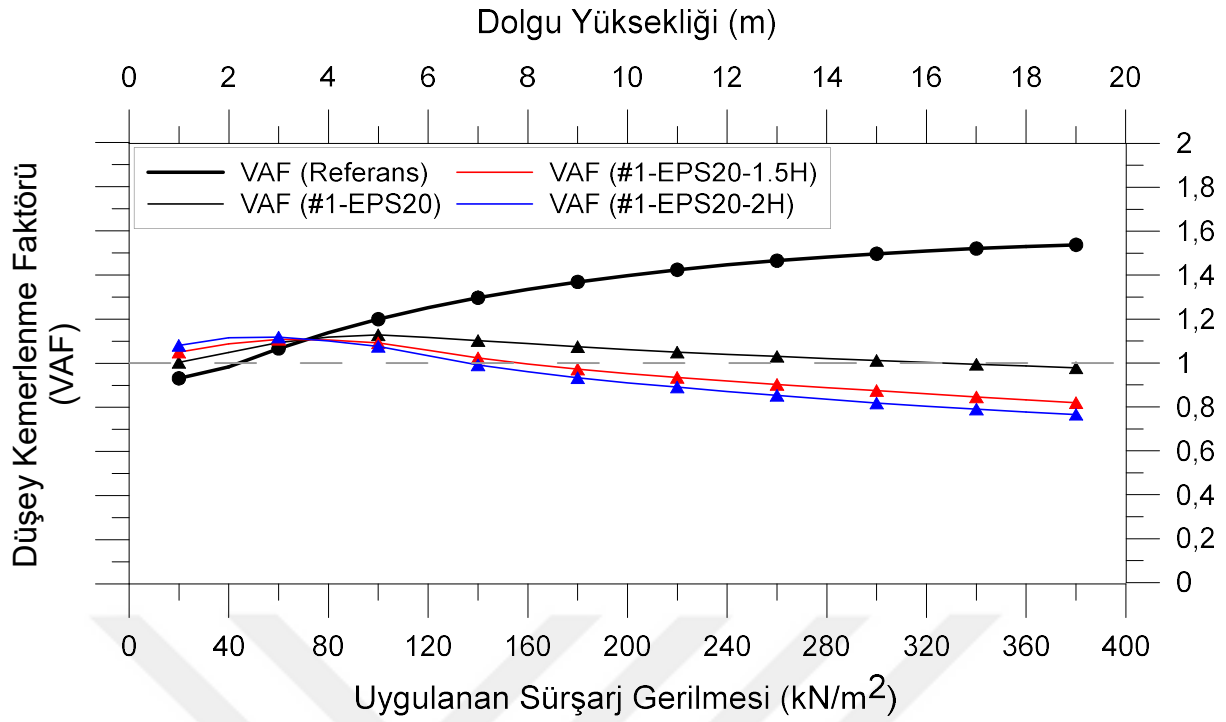
Bu kapsamda yapılan analizler sonucunda EPS genişliğinin artması kemerlenme değerlerini sayısal olarak artırarak olumsuz sonuçlara yol açmıştır. Bunun aksine EPS kalınlığının artması ile hem düşey hem de yatay kemerlenme değerleri azalmıştır.



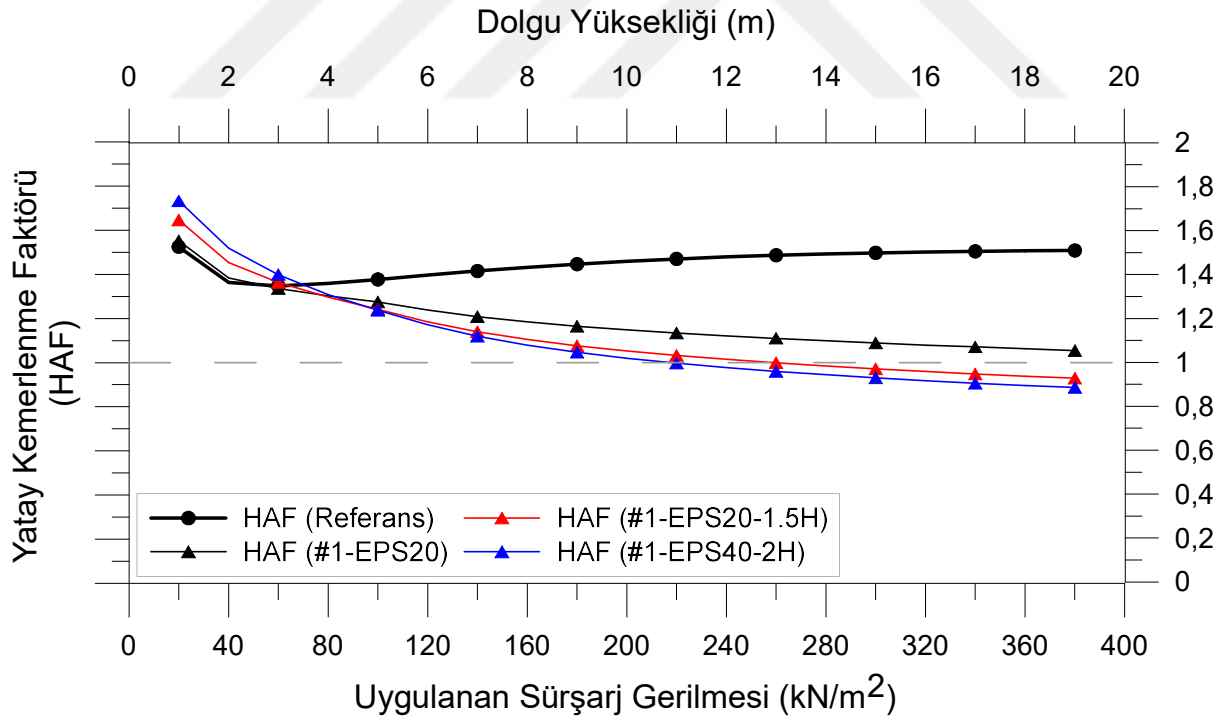
Şekil 5.19 EPS malzemenin genişliğine göre VAF değişimleri



Şekil 5.20 EPS malzemenin genişliğine göre HAF değişimleri



Şekil 5.21 EPS malzemenin kalınlığına göre VAF değişimleri



Şekil 5.22 EPS malzemenin kalınlığına göre HAF değişimleri

5.2.3 Kırmataş Malzemenin Elastisite Modülü Değişimi

Hendek zemini için kullanılan kırmataş malzemenin elastisite modülünde meydana gelen değişimlerin kemerlenme faktörleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 5.2’de sunulmuştur. Yüksek elastisite modülüne sahip kırmataş ile yapılan analizlerin sonuçları “Y” ile gösterilirken, düşük elastisite modülü kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları “D” ile gösterilmiştir. Elastisite modülü değişiminin incelendiği analizlerde Referans, Konfigürasyon #1 ve Konfigürasyon #2 geometrileri kullanılırken EPS Geofom malzeme için 20 kg/m³ yoğunluk (EPS20) seçilmiştir.

Tablo 5.2 Kırmataş malzemenin farklı elastisite değerleri için kullanılan parametreler

Parametre	Kırmataş	Kırmataş Yüksek Elastisite Modülü	Kırmataş Düşük Elastisite Modülü
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m ³)	22	22	22
Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet, m (-)	0.8	0.8	0.8
Kayma dayanımı açısı, ϕ (°)	40	40	40
Genleşme açısı, ψ (°)	5	5	5
Kohezyon, c (kN/m ²)	-	-	-
Referans ortalama sekant modülü, E_{50}^{ref} (MN/m ²)	18	36	9
Referans tanjant ödometre modülü, E_{oed}^{ref} (MN/m ²)	18	36	9
Referans yük boşaltma-geri yükleme modülü, E_{ur}^{ref} (MN/m ²)	54	108	27

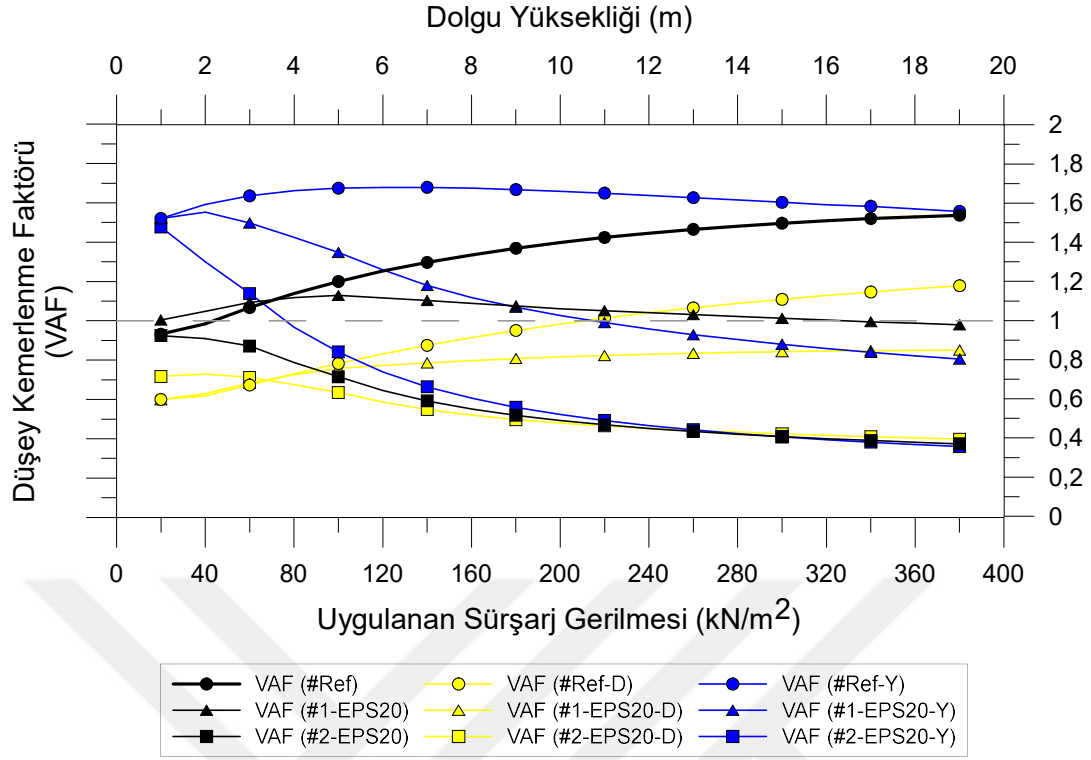
Öncelikle yatay ve düşey kemerlenme faktörleri hendek malzemesinin elastisite değerinin artması ve azalması durumuna göre analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar düşey ve yatay kemerlenme faktörleri olarak sırasıyla Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’te sunulmuştur. Bu grafiklerde görülen siyah renkli değerler deneyde kullanılan elastisite modülü, sarı renkli

değerler düşük elastisite modülü ve mavi renkli değerler yüksek elastisite modülü kullanılması durumlarını temsil etmektedir.

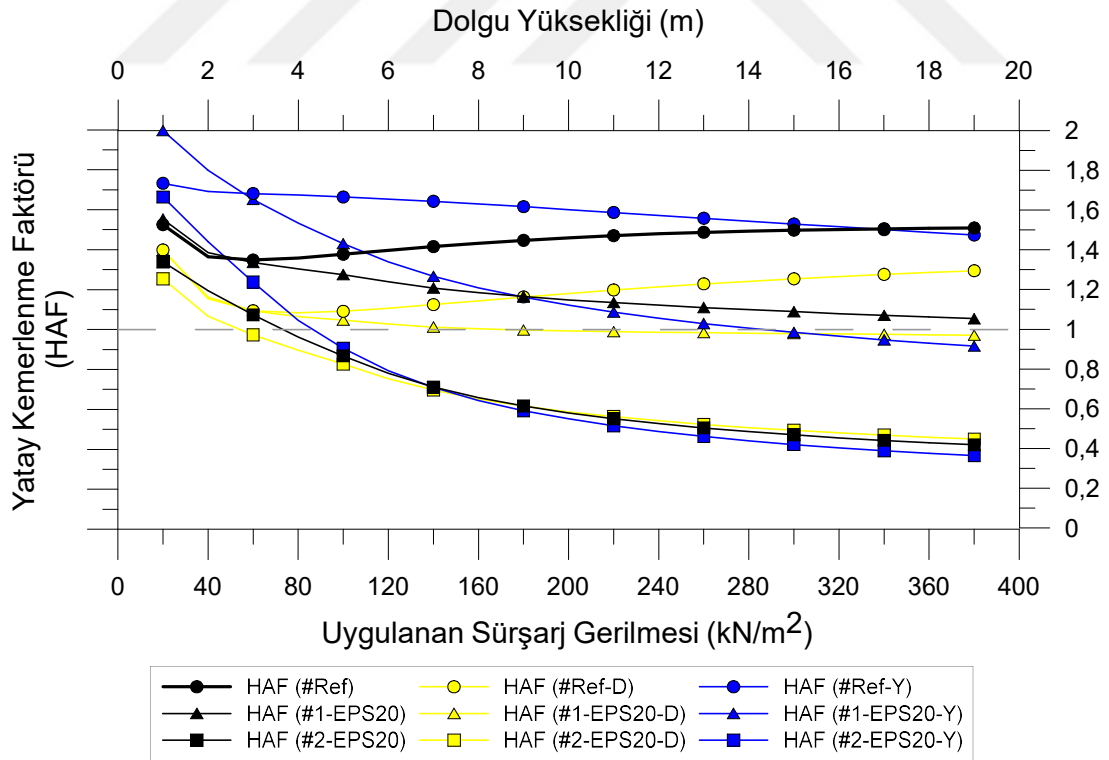
Referans (EPS olmayan) duruma bakıldığında elastisite modülünün azalması ile her iki kemerlenme faktörünün de dolgu yüksekliği boyunca standart değerlerin altında olduğu görülmektedir. Bununla beraber standart değerleri tanımlayan siyah çizgi ile düşük elastisiteyi tanımlayan sarı çizginin Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de birbirine paralel olarak ilerlediği, yani aralarında belirli bir oran olduğu görülmektedir. Aynı geometrik koşullar altında elastisite modülünün artması ile hem yatay hem de düşey kemerlenme faktörlerinin genellikle standart değerlerin üzerine çıktığı belirlenmiştir. Sayısal olarak ifade etmek gerekirse düşey kemerlenme faktörü için standart değerler yaklaşık 0.9'dan başlayarak 1.55 değerine kadar artarken düşük elastisite modülü kullanarak yapılan analizlerde bu değerler 0.6'dan başlayarak 1.2 değerine ulaşmaktadır. Hendek malzemesi olarak kullanılan kırmataşın elastisite modülü değeri artırıldığında ise aynı değerler 1.5'ten başlayarak standart değerler aynı noktada (1.55) sona ermiştir. Yatay kemerlenme faktöründe ise düşük elastisite modüllü kırmataş ile standart değerler arasında daima 0.2 değerinde bir fark oluşmuşken, yüksek elastisite modüllü durumda bu fark en fazla 0.5 değerine kadar ulaşmaktadır.

EPS malzemenin boru üzerinde kullanılması ile başlangıç değerler referans deneye benzer şekilde düşük elastisite modülü durumunda düşük, yüksek elastisite modülü durumunda yüksek değerler olacak şekilde elde edilmiştir. Fakat bu değerler artan dolgu yükleri altında her kademede artış veya azalış göstererek VAF için 0.8 – 1.0 arasında, HAF için 0.9 – 1.1 arasında değişmiştir.

Borunun EPS ile çepeçevre sarıldığı Konfigürasyon #2 durumunda ise ilk iki konfigürasyonda olduğu gibi başlangıç değerleri farklıyken sonuç değerleri hem düşey kemerlenme faktörü için hem de yatay kemerlenme faktörü için birbirine çok yakın sayısal değerlere ulaşmaktadır. Üç elastisite modülü değeri içinde kemerlenme faktörleri dolgu yüksekliğinin (uygulanan yükün) artması ile azalış göstermektedir. Bu azalış yüksek elastisite modülü ile yapılan analizlerde en yüksek sayısal değere ulaşırken, tam tersi olarak düşük elastisite modülü ile yapılan analizlerde en düşük değerlere ulaşmaktadır. Sonuç olarak Konfigürasyon #2 için elastisite modülü değerinin değişmesi yüksek dolgu yükleri için etkili olmazken, her iki kemerlenme faktörünün nihai değerleri 0.4 sayısal değerine yaklaşmaktadır.



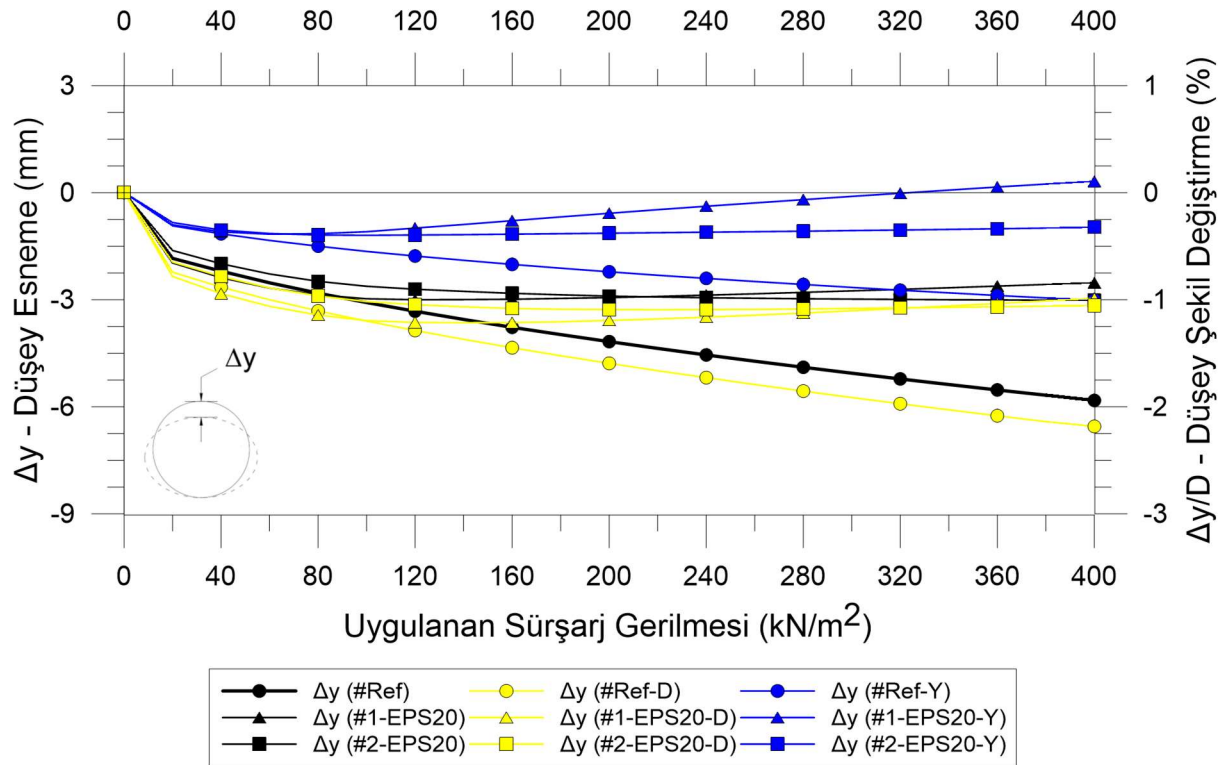
Şekil 5.23 Kırmataş malzemenin elastisite modülü değerlerine göre VAF değerleri



Şekil 5.24 Kırmataş malzemenin elastisite modülü değerlerine göre HAF değerleri

Borunun EPS ile çepeçevre sarıldığı Konfigürasyon #2 durumunda ise ilk iki konfigürasyonda olduğu gibi başlangıç değerleri farklıyken sonuç değerleri hem düşey kemerlenme faktörü için hem de yatay kemerlenme faktörü için birbirine çok yakın sayısal değerlere ulaşmaktadır. Üç elastisite modülü değeri içinde kemerlenme faktörleri dolgu yüksekliğinin (uygulanan yükün) artması ile azalım göstermektedir. Bu azalım yüksek elastisite modülü ile yapılan analizlerde en yüksek sayısal değere ulaşırken, tam tersi olarak düşük elastisite modülü ile yapılan analizlerde en düşük değerlere ulaşmaktadır. Sonuç olarak Konfigürasyon #2 için elastisite modülü değerinin değişmesi yüksek dolgu yükleri için etkili olmazken, her iki kemerlenme faktörünün nihai değerleri 0.4 sayısal değerine yaklaşmaktadır.

Esneleme değerleri karşılaştırıldığında, yüksek elastisite modülüne sahip kırmataş kullanımı ile hem yatay hem de düşey esnemelerin sifıra daha yakın değerler aldığı Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da görülmektedir. Kırmataş malzeme elastisite modülünün azalması durumunda ise bu değerler düşeyde referansa göre daha yüksek, yatayda ise daha düşük olarak hesaplanmıştır. Özellikle en düşük esneleme değerlerinin Konfigürasyon #2'de görüldüğü ve yüksek kırmataş elastisite modülüne sahip Konfigürasyon #1 analizlerinde esnemelerin diğer analizlere göre yön değiştirdiği dikkat çeken noktalar arasındadır.



Şekil 5.25 Kırmataş elastisite modülündeki değişime göre düşey esneleme değerleri

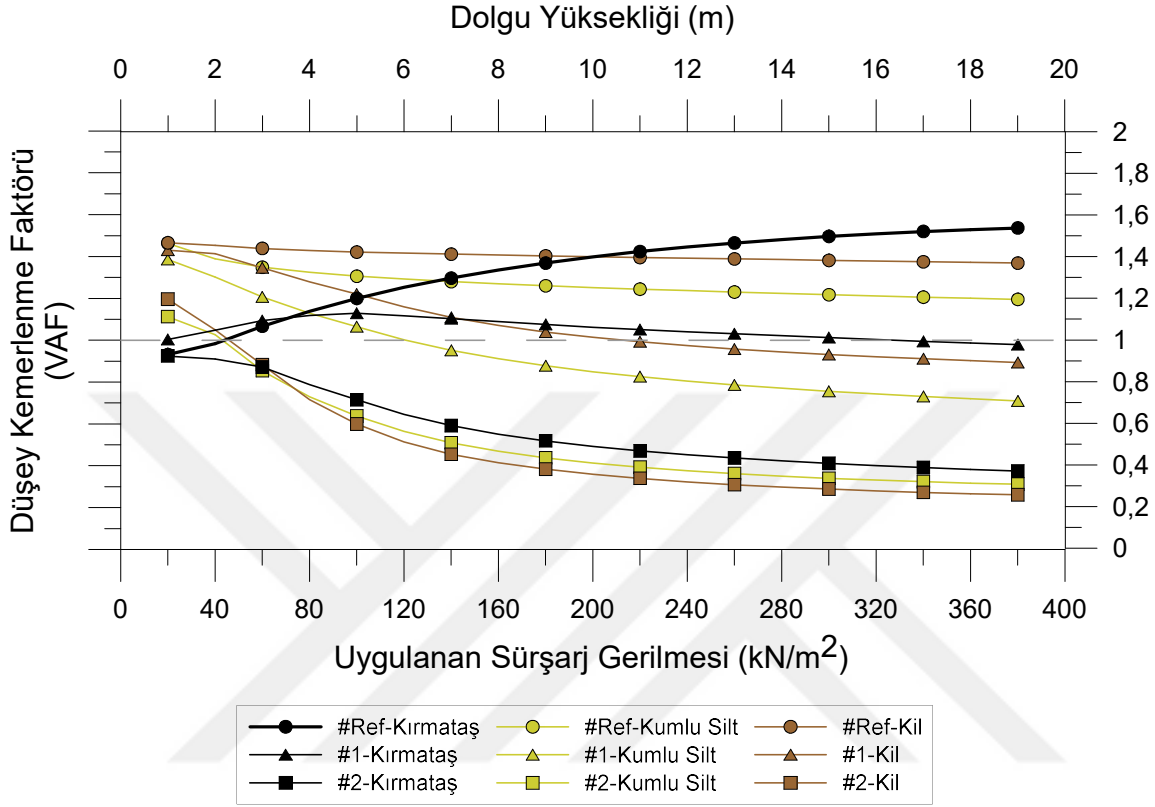
Tablo 5.3 Farklı hendek malzemesi için kullanılan parametreler

Parametre	Kırmataş	Kil	Kumlu Silt
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m ³)	22	19	20
Gerilmeye bağıllığı sağlayan üstel kuvvet, m (-)	0.8	0.5	0.5
Kayma dayanımı açısı, ϕ (°)	40	15	34
Genleşme açısı, ψ (°)	5	-	-
Kohezyon, c (kN/m ²)	-	15	28
Referans ortalama sekant modülü, E_{50}^{ref} (MN/m ²)	18	13	24
Referans tanjant ödometre modülü, E_{oed}^{ref} (MN/m ²)	18	13	24
Referans yük boşaltma-geri yükleme modülü, E_{ur}^{ref} (MN/m ²)	54	39	72

Öncelikle düşey kemerlenme faktörüne bakıldığında (Şekil 5.26) yaklaşık 4 metrelik (80 kPa) bir dolgu yüksekliğine kadar kemerlenme faktörü değerinin kırmataş zeminde daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat artan dolgu yüksekliği ile kumlu silt ve kil zeminlere ait VAF değerleri azalma göstermiş ve tüm konfigürasyonlar için sayısal olarak kırmataş zeminin altında kalmıştır.

Sayısal olarak incelendiğinde, referans konfigürasyonu için VAF değerleri kırmataş kullanıldığında 1 değerinin altında başlayıp 1.5 değerinin üzerine kadar çıkarken, kil için bu değerler 1.5'te başlayıp 1.38'e kadar düşmüştür. Kumlu silt için ise aynı değerler kilde olduğu üzere 1.5'te başlayıp 1.2'ye kadar azalmıştır. Konfigürasyon #1 durumunda kil ve kumlu silt yaklaşık 1.4 değerinden başlarken kırmataş tam olarak 1 değerinden başlamaktadır. Artan dolgu yüksekliği ile kil zeminde VAF değeri 0.9'a, kumlu silt zeminde 0.7'ye kadar azalırken; kırmataş zeminde bu değerde fazla değişim gözlemlenmemiştir. Konfigürasyon #2 durumunda ise kil zemin kullanımı ile ortaya çıkan VAF değerinin kumlu silt ve kırmataş kullanımından düşük olduğu görülmektedir. Kırmataş zeminin

hendek malzemesi olarak kullanılması ile VAF değeri 0.9'dan 0.4'e kadar düşerken, siltli kum kullanımı ile bu değer 1.1'den 0.32'ye düşmektedir. Aynı koşullarda kil kullanılması ile ise VAF değeri 1.2'den 0.25'e kadar azalma göstermektedir.

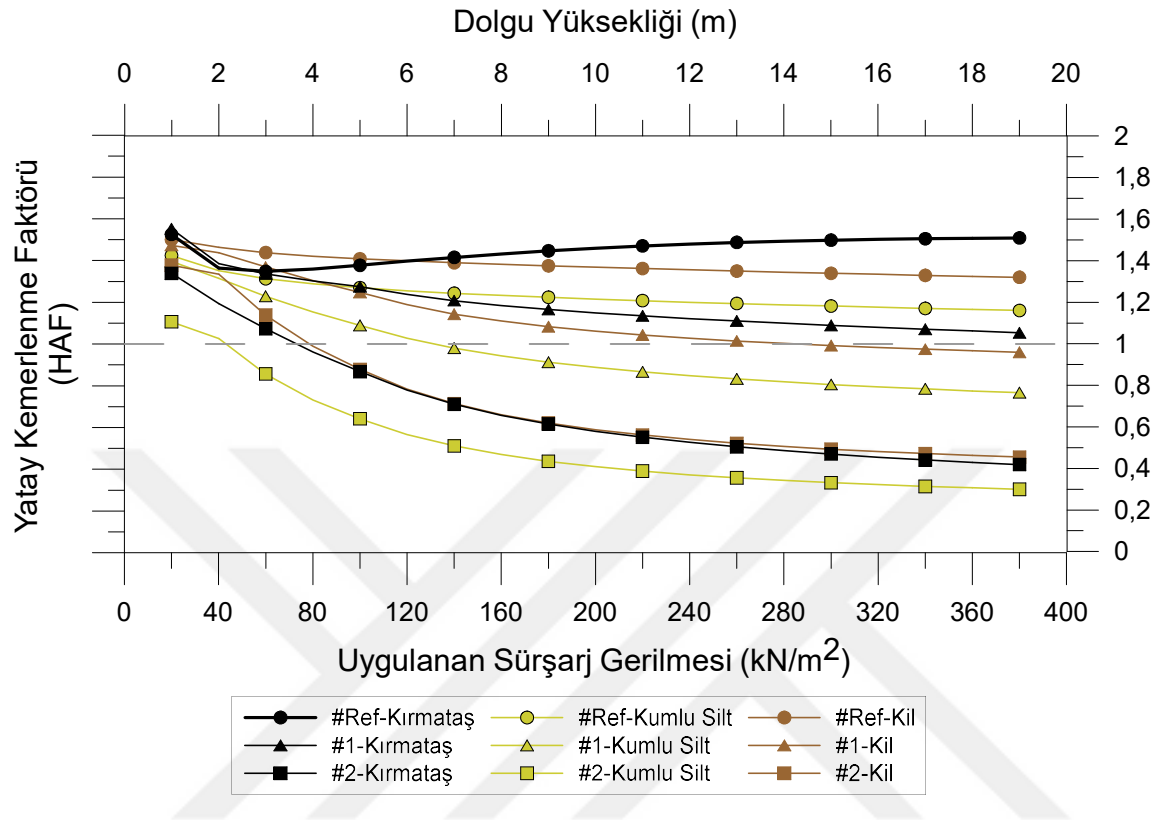


Şekil 5.27 EPS Konfigürasyonları ve farklı hendek geri dolgusu için VAF değerleri

Yatay kemerlenme faktörüne bakıldığında ise genel olarak düşey kemerlenme faktörüne yakın bir davranış görüldüğü söylenebilmektedir (Şekil 5.28). Referans konfigürasyonu durumunda ve maksimum yük altında en yüksek HAF değeri yaklaşık 1.5 ile kırmataş zemine aitken, kil için aynı noktada bu değer 1.3 ve kumlu silt için 1.15 olarak elde edilmiştir. Boru üzerinde EPS malzeme bulunması durumunda ise hendek içerisinde kil zemin kullanımı kırmataşa göre HAF değerinde 0.1'lik, kumlu silt kullanımı ise 0.4'lük bir azalma meydana getirmiştir.

Borunun çepeçevre EPS Geofom malzeme ile sarıldığı durumda ve yüksek dolgu yükleri altında yatay kemerlenme faktörü kil zemin için en yüksek sayısal değere 0.46 ile ulaşmıştır. Diğer iki zemin türü ile modellenen hendek koşullarında kil zemin ile arasında çok büyük farklar olmamasına rağmen kumlu silt değeri ise aynı noktada 0.3 iken, kırmataş değeri 0.42'dir. Başlangıç koşullarına bakıldığında düşük dolgu yükü altında

yaklaşık 0.3 – 0.4 arasında olan bu farklar artan dolgu yükü ile birlikte 0.16 değerine kadar düşüş göstermiştir.

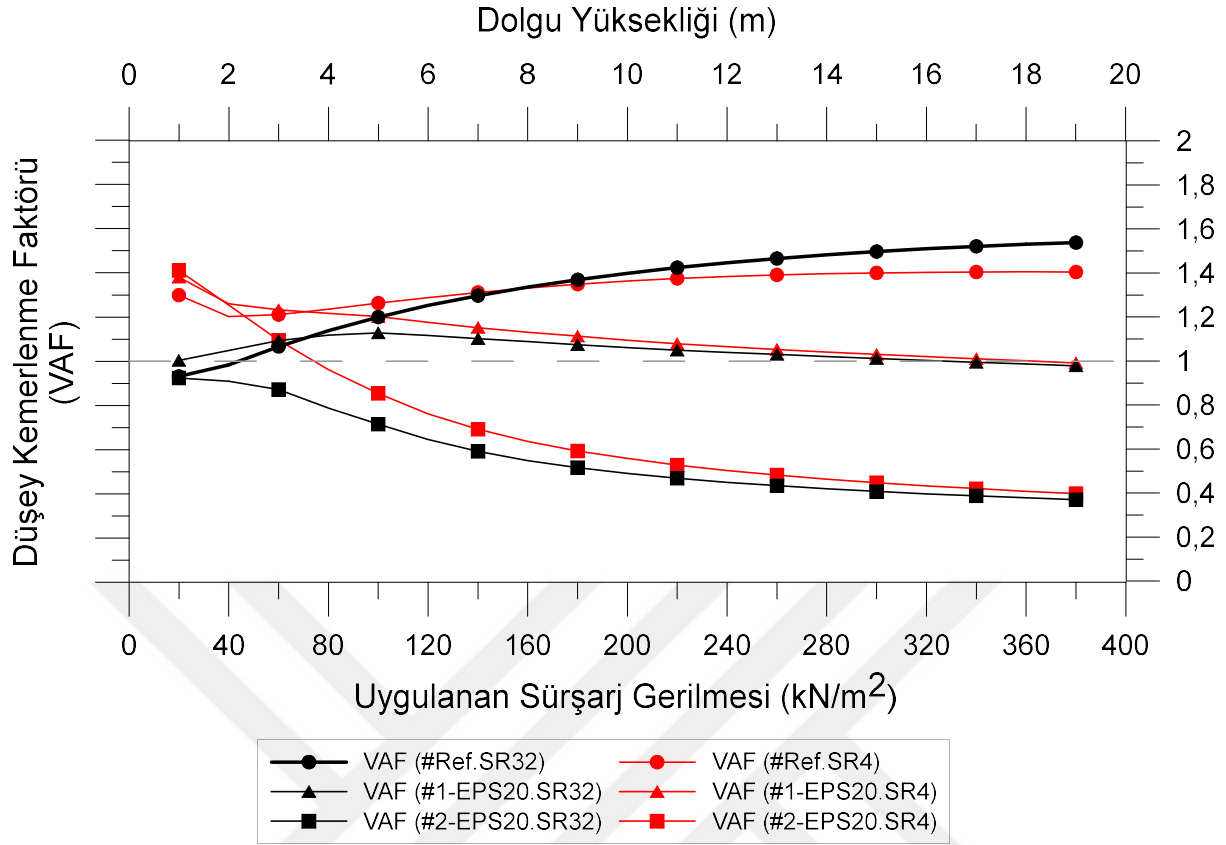


Şekil 5.28 EPS Konfigürasyonları ve farklı hendek geri dolgusu için HAF değerleri

5.2.5 Boru rijitliği değişimi

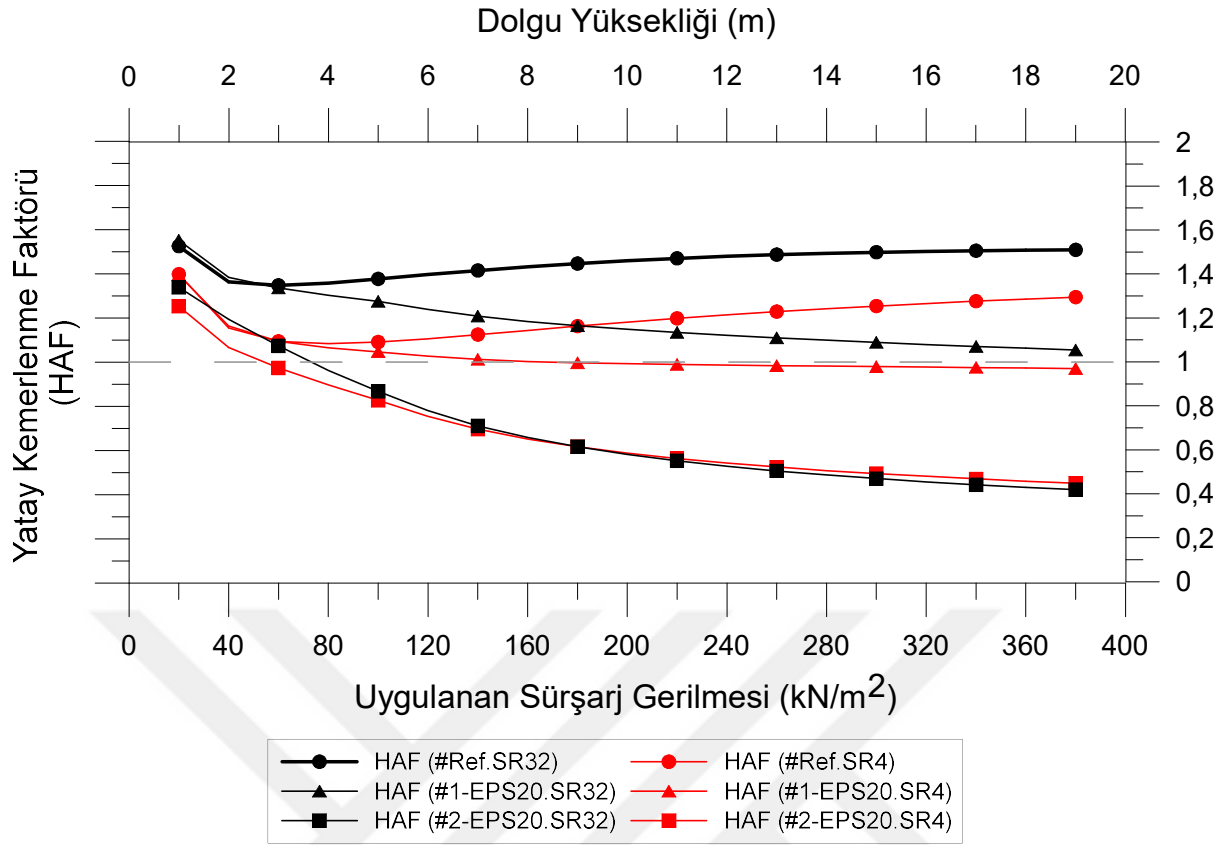
Arazi deneyinde kullanılan SR32 rijitliğine sahip HDPE korige borunun yanı sıra sayısal analizlerde SR4 rijitliğine sahip boru ile farklı geometriler için analizler yapılmıştır. Öncelikle referans deneyde borunun EPS Geofom malzeme olmadan davranışı incelenmiş, ardından borunun üzerinde ve çepeçevre etrafında EPS Geofom kullanılması ile kemerlenme faktörlerindeki değişimler sunulmuştur.

Öncelikle düşey kemerlenme faktörüne bakıldığında düşük dolgu gerilmelerinde kemerlenme faktörünün boru rijitliğine göre değişiklik gösterdiği Şekil 5.29'da görülmektedir. Tüm geometrik koşullarda artan dolgu yükü ile VAF değerlerindeki bu farkın zamanla azaldığı, Konfigürasyon #1 durumunda ise farkın tamamen ortadan kalktığı söylenebilir. Farklı rijitlikteki borular kullanıldığında ortaya çıkan davranışın düşük dolgu gerilmelerinde bir miktar farklı olmasının yanı sıra yaklaşık olarak 100 kPa değerinden sonra neredeyse aynı trendi izlediği görülmektedir.



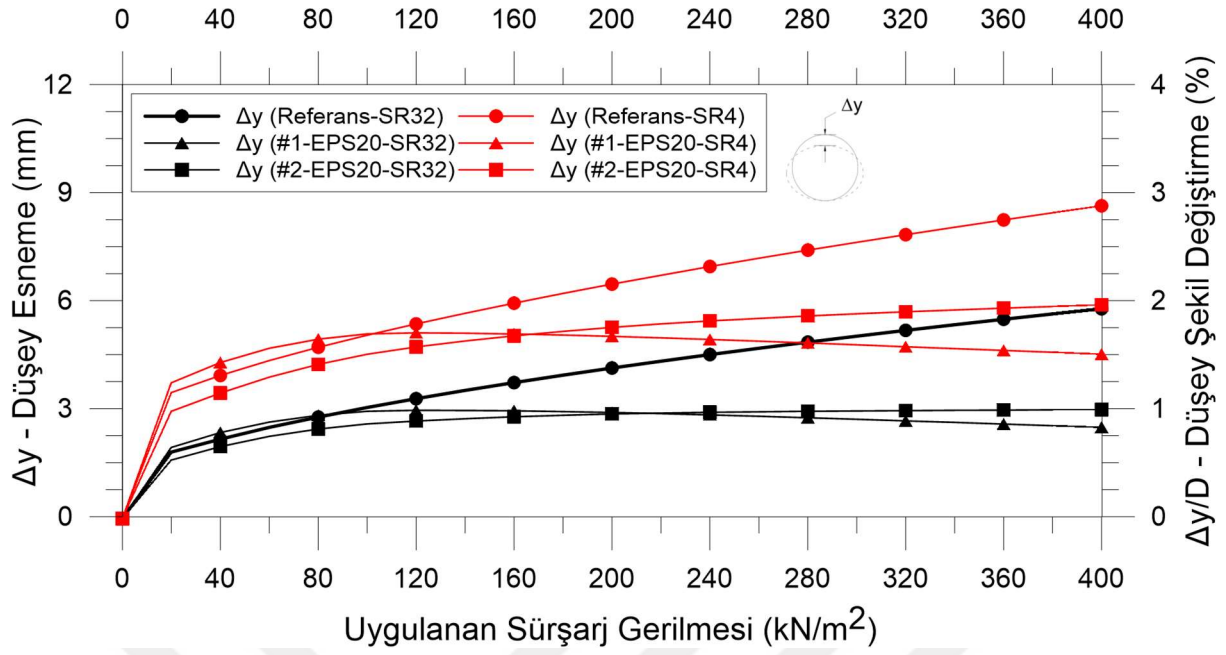
Şekil 5.29 Boru rijitliği değişiminde VAF değerleri

Yatay kemerlenme faktörüne bakıldığında, Referans ve Konfigürasyon #1 durumunda elde edilen HAF değerleri SR4 rijitlikteki boru ile yapılan analizlerde daima ilk duruma göre düşük çıkmaktadır (Şekil 5.30). Yalnızca borunun EPS ile çepeçevre sarıldığı durumda yaklaşık 200 kPa'dan daha büyük sürşarj gerilmesi uygulandığında tersine bir eğilim göstermektedir. Fakat genel olarak Konfigürasyon #2 geometrik koşulları altında boru rijitliğinin azalmasının yatay kemerlenme faktörünü çok fazla etkilemediği sonucuna varılmıştır. Referans ve Konfigürasyon #1 durumlarında ise yük altında HAF değerleri aynı artış ve azalış trendini sergilerken sayısal değerlerin daha düşük olması, boru rijitliğindeki azalmanın kemerlenmeyi bir miktar daha arttırdığını göstermektedir.

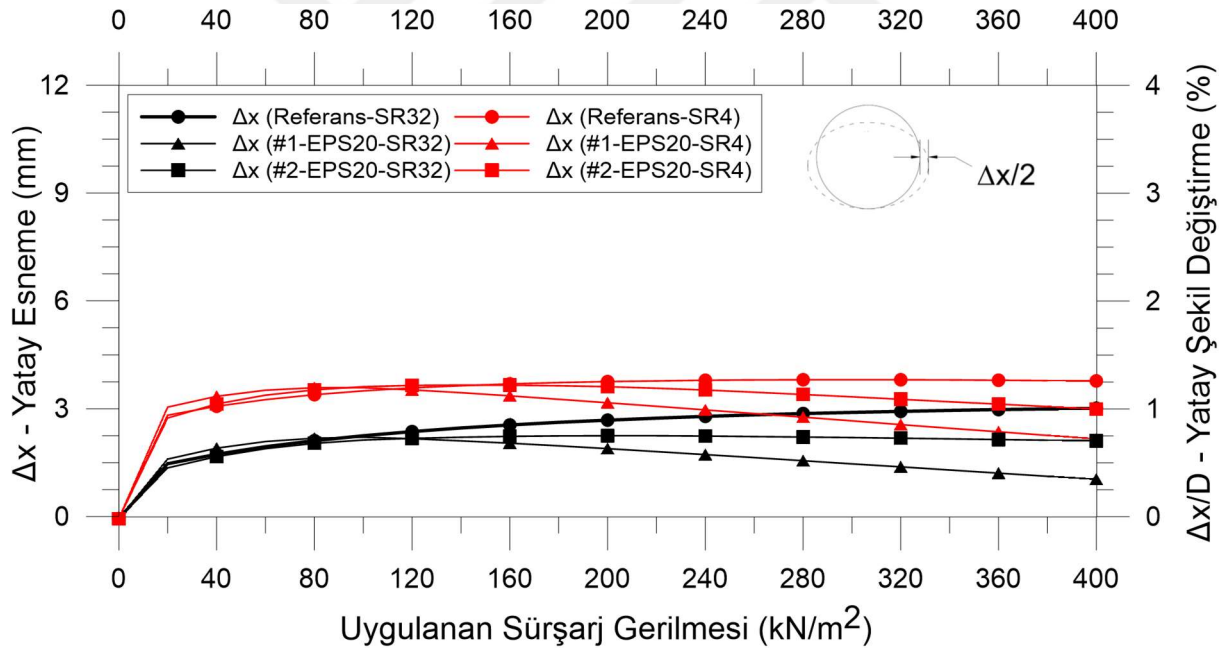


Şekil 5.30 Boru rijitliği değişiminde HAF değerleri

Kemerlenme faktörlerinin yanı sıra boru geometrisinin korunması da rijitlik değişimi incelenirken ele alınması gereken önemli parametrelerden biridir. Azalan rijitlik ile borunun belirlenen sınırların dışındaki esneme değerlerine ulaşması servis ömrünü doğrudan etkilemekte veya hizmet veremeyecek duruma getirmektedir. Bu noktada Şekil 5.31 ve Şekil 5.32 ile azalan rijitliğin borunun esneme değerlerinde büyük değişikliklere yol açmadığı gösterilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere esneme değerleri dikey ekseninde en fazla boru çapının %1'i (3 mm) kadar artarken yatay ekseninde %0.4'ü (1.2 mm) kadar artmaktadır. Bu artış değerleri en fazla referans konfigürasyonunda meydana gelirken Konfigürasyon #1 ve #2'de daha düşük değerlerde kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.31 Boru rijitliği değişiminde düşey esneme değerleri



Şekil 5.32 Boru rijitliği değişiminde yatay esneme değerleri

5.2.6 Maliyet Analizi

Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak yapılan maliyet analizi Tablo 5.4'te paylaşılmıştır. Maliyet analizi yapılırken Ø700 mm boru çapı ve 20 kg/m³ yoğunluklu EPS dikkate alınmıştır. Bu analiz çelik boru yerine HPDE boruların EPS ile kullanımının ekonomik

olarak faydalarını hem farklı boru rijitlikleri için hem de farklı EPS konfigürasyonları için ortaya koymaktadır. Tabloda belirtilen maliyet değerleri 1 kilometre uzunluk için çeşitli yerli firmalardan elde edilen fiyat listelerine göre düzenlenmiş ve döviz kurları 3 Ekim 2020 tarihine göre baz alınmıştır (1 \$ = 7.76 ₺). Bunun yanı sıra Konfigürasyon #1 ile Konfigürasyon #2 kullanımı ile oluşan EPS malzeme maliyeti farkı tabloda göze çarpan değerler arasında yer almaktadır. İkinci konfigürasyonda EPS malzemenin kapladığı alan Konfigürasyon #1'e göre yaklaşık 2 kat artıyor iken maliyetin neredeyse 9 katın üzerine çıkmasının sebebi EPS malzemenin üretilirken içi boşluklu şekilde değil, tamamen kapalı dikdörtgenel şekilde üretilmesidir. Konfigürasyon #2'de görüldüğü şekilde bir EPS üretimi günümüz şartlarında mümkün olmamakla birlikte bu konfigürasyon için elde edilen EPS'nin içinin boru yerleştirilecek şekilde oyulması gerekmektedir. Bu noktada EPS maliyeti tabloda görüldüğü üzere oldukça değişkenlik göstermektedir.

Tablo 5.4 Kilometre başına Ø700 mm çapa sahip borular için maliyet hesabı

Ø700 mm Çaplı borular için maliyet	Dolgu Hacmi	Dolgu Maliyeti	Boru Maliyeti	EPS20 Maliyeti	1 km için Toplam Maliyet
Çelik Boru	4025 m ³	263.475 ₺	1.203.199₺	-	1.471.772 ₺
SR32 HDPE Boru #Konf. 1	3990 m ³	261.184 ₺	387.177 ₺	23.098 ₺	676.513 ₺
SR32 HDPE Boru #Konf. 2	3672 m ³	240.323 ₺	387.177 ₺	208.346 ₺	840.495 ₺
SR8 HDPE Boru #Konf. 1	3990 m ³	261.184 ₺	278.737 ₺	23.098 ₺	568.073 ₺
SR8 HDPE Boru #Konf. 2	3672 m ³	240.323 ₺	278.737 ₺	208.346 ₺	732.055 ₺

Bu bölümde, laboratuvar ve arazi deneylerinden elde edilen ölçümler ile yapılan sayısal analizlerden yola çıkarak varılan sonuçlar değerlendirilmiştir. Tezin birinci kısmında (Bölüm 2 ve Bölüm 3) laboratuvarında yapılan gerçek ölçekli deney koşulları dikkate alınarak oluşturulan sayısal model kullanılarak, laboratuvarında deneysel olarak incelenemeyen boru çapı ve boru rijitliği değişimi parametrik sayısal analizler yapılarak incelenmiştir.

Laboratuvarında yapılan gerçek ölçekli deneylerde HDPE boru ile birlikte boru üzerinde ve borunun çepeçevre EPS Geofom malzeme ile sarılması durumlarında EPS10 ve EPS15 yoğunluk değerleri kullanılarak alınan oturma, gerilme ve boru çapı değişimi ölçümleri kullanılarak sayısal modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra bu modeller dikkate alınarak boru çapı ve boru rijitliği değişimleri araştırılmıştır.

İkinci kısımda (Bölüm 4 ve Bölüm 5) yüksek dolgular altında kalacak HDPE drenaj borularının davranışını incelemek için arazide yapılan bir boru yükleme deneyi dikkate alınmıştır. Boru yükleme deneyi, Plaxis 2D ile sayısal olarak modellenmiş ve ölçüm sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırıldıktan sonra parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda EPS Geofom malzemenin yoğunluk, geometri, kalınlık ve genişlik değişimlerinin kemerlenme faktörlerine etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte yapay hendek metodunda kullanılan hendek zemini elastisite modülünde meydana gelen değişimler, kırmataş yerine kumlu silt ve kil gibi zeminlerin kullanılması ve boru rijitliği değişimi etkileri de araştırılmıştır.

6.1 EPS Geofom malzemenin özelliklerinin değişimi

Öncelikle hem laboratuvar deneyi hem de arazi deneyi referans alınarak oluşturulan sayısal modellerde, EPS yoğunluğu ve HDPE boru ile birlikte EPS Geofom malzeme kullanılma konfigürasyonları dikkate alınarak boru-zemin etkileşimi incelenmiştir.

Bölüm 3'te yapılan sayısal analizlerde EPS yoğunlukları için sırasıyla 10 kg/m³ ve 15 kg/m³ dikkate alınmıştır. Bölüm 5'te yapılan analizlerde ise Tefera (2010)'da kullanılan 20 kg/m³, 30 kg/m³ ve 40 kg/m³ yoğunluk değerleri ve malzeme parametreleri

kullanılmıştır (Şekil 2.14). Bu parametrik değişimlerden elde edilen sonuçlar 3.2.1 ve 5.2.1 alt başlıklarında paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda EPS malzemenin yoğunluğunun artması ile boru çevresinde meydana gelen yanal ve düşey zemin gerilmelerin arttığı, oturma değerlerinin büyüdüğü ve kemerlenmenin arttığı görülmüştür.

HDPE boru ile birlikte kullanılan EPS malzeme geometrisini incelemek için yapılan sayısal analizlerde boru üzerinde (Konfigürasyon #1) ve çepeçevre etrafında (Konfigürasyon #2) EPS olması durumları incelenmiştir. Arazi deneyi için bu iki geometriden farklı olarak borunun dairesel olarak çepeçevre EPS ile sarılması durumu da araştırılmıştır. Ancak, EPS'nin dairesel ve dikdörtgensel olarak boruyu çepeçevre sarması durumunda sonuçlarda çok az değişim meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra EPS kullanımının genel olarak gerilme, oturma ve esneme değerlerini azaltıp kemerlenmeyi arttırdığı tespit edilmiştir. İki konfigürasyon karşılaştırıldığında ise EPS'nin çepeçevre boruyu sarması durumundan elde edilen azalma değerlerinin, borunun üzerinde EPS olması durumuna göre daima daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bu iki ana parametrenin yanı sıra boru üzerinde EPS Geofom olması durumunda EPS malzemenin genişliği ve kalınlığı sırasıyla 1.5 ve 2 katına çıkarılmış, analiz sonuçlarında ortaya çıkan değişimler değerlendirilmiştir. EPS genişliğinin artması düzensiz bir davranış sergilerken, EPS kalınlığının artması ile meydana gelen gerilmelerde azalma gerçekleşmiştir. Aynı şekilde genişliğin artması kemerlenme faktörlerinde önemli ölçüde değişikliklere yol açmazken, kalınlığın artması ile hem düşey hem de yatay kemerlenme faktörlerinde azalma gözlemlenmiştir.

6.2 Hendek geri dolgu zemini özelliklerinin değişimi

Arazi deneyi üzerinden yapılan sayısal analizlerde, hendekte kullanılan geri dolgu malzemesi değişimi ve bu zeminlerin farklı elastisite modülü değerleri dikkate alınarak sayısal analizler yapılmıştır. Bu kapsamda, hendek malzemesi olarak kırmataş yerine kil ve kumlu silt ele alınmış, ardından arazi deneyinde mevcut olan kırmataş malzemenin elastisite modülünün düşük ve yüksek olması durumları incelenmiştir.

Hendek malzemesi olarak kumlu silt ve kil malzemeleri dikkate alınarak yapılan sayısal analizler sonucunda kemerlenme faktörlerinin kırmataş malzemeye göre genel olarak daha düşük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Düşey kemerlenme faktörü için

referans ve Konfigürasyon #1 durumlarında sırasıyla en yüksek değerler kırmataş, kil ve kumlu silt olarak elde edilirken; Konfigürasyon #2 durumunda ise en düşük değer kil malzeme ile yapılan analizlerde belirlenmiştir. Yatay kemerlenme faktöründe ise düşey kemerlenme faktöründen farklı olarak en yüksek HAF değeri Konfigürasyon #2 durumunda kil zemin kullanımı sonucunda elde edilmiştir.

Hendek geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kırmataşın elastisite modülü değerindeki değişimler dikkate alınarak yapılan analizlerin sonucunda farklı konfigürasyon için farklı değişimler elde edilmiştir. Öncelikle düşey kemerlenme faktörüne bakıldığında referans durumda elastisite artışı düşük yüklemeler altında daha yüksek çıkarken gerilme değeri arttıkça azalma eğilimi göstermiştir. Düşük elastisite modülüne sahip kırmataş kullanıldığında ise VAF değeri referans değere göre oldukça düşük değerlerdedir. Konfigürasyon #1 durumunda yüksek elastisite modülüne sahip kırmataş önce yüksek VAF değerlerine, ardından artan dolgu yükleri altında ise en düşük değerlere ulaşmıştır. Konfigürasyon #2 durumuna bakıldığında ise genel olarak 10 metrelik dolgu yükünden itibaren VAF değerinde büyük farklar tespit edilmemiştir.

Kırmataş malzemenin parametrelerinin değiştirilmesi ile gözlenen bir başka durum ise (yaklaşık 10 metrelik bir dolgu yüksekliğinden itibaren) Konfigürasyon #2 kullanılarak yapılan analizlerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmesidir. Bu sonuçların birbirine sayısal olarak yakın olması, hendek malzemesinin farklı özelliklere sahip olması durumunda dahi EPS Geofom malzeme sayesinde borunun bu değişimlerden çok fazla etkilenmediğini göstermektedir. Bu sayede inşa sırasında hendek malzemesinde meydana gelebilecek yeterli sıkıştırmama veya proje kapsamında istenilen özelliklerde dolgu malzemesi elde edememe gibi sorunların önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Bu analizlerden yola çıkılarak borunun EPS malzeme ile sarılması ile borunun çevresel koşullardan en az düzeyde etkilendiği sonucuna varılmıştır.

6.3 HDPE korige boru özellikleri değişimi

Boru rijitliği ve çap değişimleri sayısal analizler ile araştırılmıştır. Boru rijitliğinin değişimine ait bilgiler 2.1.2.2 alt başlığında detaylı olarak paylaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, rijitliğin azalması ile gerilme ve oturma değerleri bir miktar artarken, esneme değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde olacak şekilde bir miktar artış göstermiştir. Kemerlenme faktörlerine bakıldığında ise

rijitliğin azalması ile Referans ve Konfigürasyon #1 için kemerlenme mekanizması daha aktif bir duruma geçerken, Konfigürasyon #2 için çok değişmediği belirlenmiştir.

İncelenen bir diğer parametre olan boru çapı için ise Ø300 mm'lik çapa sahip bir boru referans alınarak çapın 100 mm artması ve azalması durumunda ortaya çıkan etkiler gözlemlenmiştir. Böylece boru çapının artması ile meydana gelen yatay ve düşey gerilmelerin ile bu gerilmelerin etki ettiği alanların aynı oranda artıp azaldığı tespit edilmiştir. Esneme değerlerine bakıldığında ise yüzdelik değerler olarak düşey esnemelerin negatif yönde arttığı (sıkışma), yatay esnemelerin ise pozitif yönde arttığı (genişleme) görülmüştür. Bu nedenle, boru çapının artması ile borunun üstten basık bir geometriye doğru davranış gösterme eğiliminde olduğu sonucuna varılmıştır.

Son olarak Tablo 5.4'te elde edilen sonuçlara bakıldığında ise çelik boru yerine HDPE borunun EPS Geofom malzeme ile birlikte kullanımının maliyeti neredeyse %50 oranında azalttığı belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda borunun daha düşük rijitliklerde kullanılması ile hesaplanan maliyet değerlerinin daha da düşeceği öngörülmektedir.

- Akınay, E. (2017). "Sıkışabilir Yatak Malzemesi Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi". Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde Hazırlanan Doktora Tezi, İstanbul.
- Akınay, E., Kılıç H., ve R. Babak (2016). "Gömülü Esnek Boru Üzerindeki Zemin Gerilmelerinin Eps Geofoam ile Azaltılması". Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum
- Akınay, Emre, and Havvanur Kılıç (2012). "Investigating parameters affecting buried flexible pipe behavior". 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus. 28-30 June 2012, Near East University, Nicosia, North Cyprus
- AASHTO (2004a). AASHTO LRFD bridge design specifications, 3rd ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Beju, Y. Z., and Mandal, J. N. (2017). "Combined use of jute geotextile-EPS geofoam to protect flexible buried pipes: Experimental and numerical studies". International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 3(4), 32.
- Brown, C.B. (1967). "Forces on rigid culverts under high fills". J. Struct. Div., ASCE, 93(5), 195-215.
- DIN 16961-2, (2010). Thermoplastics Pipes And Fittings With Profiled Wall And Smooth Pipe Inside - Part 2: Technical Delivery Specifications, Berlin.
- Janbu, N. (1957). "Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices". Proc.4.Int.Conf.SMFE, London, Vol. 2, 207-212.
- Kang, J., Parker, F., and Yoo, C. H. (2007). "Soil-structure interaction and imperfect trench installations for deeply buried concrete pipes". Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 133(3), 277-285.
- 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.
- Katona MG, Smith JM, Odello RS and Allgood JR. (1976). "CANDE-a modem approach for the structural design and analysis of buried culverts". Report FHWA-RD-77-5, FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Kılıç, H., ve Akınay, E. (2017). "Gömülü Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boru". 3. Uluslararası Zemin-Yapı Etkileşimi Sempozyumu.
- Kılıç, H., and Akınay, E. (2019). "Effects of Using EPS Geofoam as Compressible Inclusion on HDPE Pipe Behavior". Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 10(2), 04019006.

- Kim, K., and Yoo, C.H. (2002). "Design Loading for Deeply Buried Box Culverts". Highway Research Center, Auburn University, AL.
- Marston, A. (1922). "Second Progress Report to the Joint Concrete Culvert Pipe Committee". Iowa Engineering Experimental Station, Ames, IA.
- McGrath TJ (1998). "Design method for flexible pipe". A report to the AASHTO Flexible Culvert Liaison Committee. Arlington, MA: Simpson Gumpertz & Heger Inc.
- Meguid, M. A., and 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), 2.
- Meguid, M. A., Ahmed, M. R., Hussein, M. G., and Omeman, Z. (2017). "Earth pressure distribution on a rigid box covered with U-shaped geofoam wrap". *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(2), 11.
- Meguid, M. A., Hussein, M. G., Ahmed, M. R., Omeman, Z., and Whalen, J. (2017). "Investigation of soil-geosynthetic-structure interaction associated with induced trench installation". *Geotextiles and Geomembranes*, 45(4), 320-330.
- Lin, L. K., Chen, L. H., and Chen, R. H. (2010). "Evaluation of geofoam as a geotechnical construction material". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(2), 160-170.
- Mada, H. (2005). "Numerical Modelling of Buried Pipes with Flowable Fill as a Backfill Material". MSc. Thesis, College of Engineering and Mineral Sources at West Virginia University.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., and Bonnier, P. G. (1999). "The hardening soil model: formulation and verification". *Beyond 2000 in computational geotechnics*, 281-296.
- Sheeley, M. and Negussey, D. (2000). "An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior". *Geotechnical Special Publication, No.112-Soft Ground Technology*, ASCE, 292-303.
- Spangler, M.G. (1950). "A Theory of Loads on Negative Projecting Conduits". *Proceedings of the Highway Research Board*, 30, Transportation Research Board, Washington, DC, 153-161.
- Spangler MG (1941). "The structural design of flexible culverts". *Iowa State College Bulletin* 30, vol. XI, Ames, IA.
- Sun, L., Hopkins, T.C. and Beckham, T.L., (2009). "Reduction of Stresses on Buried Rigid Highway Structures Using the Imperfect Ditch Method and Expanded Polystyrene (Geofoam)". *Research Report KTC-07-14/SPR-228-01-1F*, Kentucky
- Sun, L., Hopkins, T.C. and Beckham, T.L., (2011). "Long-Term Monitoring of Culvert Load Reduction Using an Imperfect Ditch Backfilled with Geofoam". *Transportation Research Record*, 2212: 56-64.

- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2019
- T. H. Tefera, R. Aabøe, H. Bruun, and K. Aunaas, (2010). "FEM simulation of full scale and laboratory models test of EPS". The Norwegian Public Roads Administration, Norway.
- Tyler, M. (2003). "Earth Pressures on Induced Trench Conduits". M.Sc. Thesis, Dept of Civil Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- Terzaghi, K., (1943). "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley and Sons, New York, N.Y.
- Vaslestad, J., Johansen, T.H., and Holm, W. (1993). "Load reduction on rigid culverts beneath high fills: long term behavior". Transportation Research Record, 1415, Transportation Research Board, Washington, DC, 58-68.
- Vaslestad, J., Sayd, M.S., Johansen, T.H. and Wiman, L., (2011). "Load Reduction and Arching on Buried Rigid Culverts Using EPS Geofom. Design Method and Instrumented Field Tests". Proceedings of EPS 2011, June 6th-8th 2011 at Lillestrøm, Norway.
- Vaslestad, J., Bartlett, S. F., Aabøe, R., Burkart, H., Ahmed, T., and Arellano, D. (2019). "Bridge Foundations Supported by EPS Geofom Embankments on Soft Soil". In 5th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications (pp. 281-294). Springer, Cham.
- Watkins RK, Spangler MG (1958), "Some characteristics of the modulus of passive resistance of soil: a study in similitude". Highway Res Board Proc Annual Meet; 37:576-83.
- Yoo, C.H., Parker, F., and Kang, J. (2005). "Bedding and Fill Heights for Concrete Roadway Pipe and Box Culverts". Final Report, ALDOT Project No. 930-592, Highway Research Center, Auburn University, AL.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: furkanakyelken@outlook.com

Konferans Bildirileri

1. Akyelken F. and Kılıç H. (2019), "Investigation of Effects of EPS Material Use on Buried Flexible Pipe Behavior by Numerical Analysis". 8th International Geotechnical Symposium, Istanbul.

