

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIĞ GÖMÜLÜ ESNEK BORU DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZLERLE
İNCELENMESİ

Murat GÜLEN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Haziran, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIĞ GÖMÜLÜ ESNEK BORU DAVRANIŞININ DENEYSEL
VE SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ**

Murat GÜLEN tarafından hazırlanan tez çalışması 25.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU, Üye
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Pelin ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kubilay KELEŞOĞLU, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Danışmanım Prof. Dr. Havvanur KILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Sığ Gömülü Esnek Boru Davranışının Deneysel ve Sayısal Analizlerle 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.

Murat GÜLEN

İmza



Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FBA-2022-5124” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Eşime
ve
çocuklarıma

TEŞEKKÜR

2016 yılından beri yüksek lisans ve doktora çalışmalarını birlikte yürüttüğüm bilgisi, desteği, anlayışı, ilgisi ve yapmış olduğu rehberlik ile bana her zaman yardımcı olan tez danışmanım Prof. Dr. Havvanur KILIÇ'a en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez ara raporlarımda yararlı ve yapıcı eleştiri ile sundukları değerli katkıları için tez izleme komitesinde yer alan hocalarım Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN ve Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU'na teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar boyunca desteklerini esirgemeyen Ali YÜKSEL'e, Tevrat Al'a, Selim Atabaş'a, Nazlı Ece Öz'e, Ahmet Serdar Köşeli'ye, Dr. Öğr. Üyesi Serhan Ulukaya'ya minnettarlığımı belirtmek isterim.

Çalışmalarımıza ücretsiz olarak EPS Geofoam temin eden EPS Sanayi Derneği (EPSDER) ve BASAŞ Ambalaj ve Yalıtım Sanayi A.Ş.'ye; HDPE boru temininden ötürü İBB İski çalışanı İnş. Müh. Yener Kaya'ya ve Kuzeyboru A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Doktora gibi zorlu bir yolda bana göstermiş olduğu anlayış, özveri, sabır, sevgi ve duygusal desteklerinden ötürü canım eşim Semra GÜLEN'e teşekkür ederim. Özellikle, doktora tezim esnasında dünyaya gelen güzel kızım Esmanur GÜLEN'i ve canım oğlum Ömer Asaf GÜLEN'i tüm sevgimle kucaklıyorum. Onların varlığından ve enerjilerinden aldığım destekle tezimi tamamlıyorum. İyi ki varsınız.

Son olarak bugünlere gelmem de en büyük pay sahibi olan, karşılaştığım zorlukları aşmamda bana her zaman destek olan, güç veren ve borcunu asla ödeyemeyeceğim canım annemin ruhu şad olsun.

Bu çalışmaya FBA-2022-5124 projesi kapsamında maddi destek veren Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Murat GÜLEN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
TABLO LİSTESİ	xx
ÖZET	xxi
ABSTRACT	xxiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Gömülü Boru Sistemleri İçin Genel Bilgiler	1
1.1.1 Rijitlikleine Göre Boru Türleri	1
1.1.2 Kurulum Yöntemlerine Göre Boru Türleri	2
1.1.3 Gömülme Derinliklerine Göre Boru Türleri	3
1.2 Gömülü Boru Sistemleri İçin Yapılan Çalışmlar	4
1.3 Kemerlenme	14
1.3.1 Terzaghi Kemerlenme Teorisi	14
1.3.2 Gömülü Boru Sistemlerinde Kemerlenme Etkisi	19
1.4 EPS Geofoam Malzeme Özellikleri	31
1.5 Gömülü Boru Sistemleri İçin Malzeme Parametelerinin Belirlenmesi	38
1.6 Kemerlenmenin Yanal Toprak Basıncı Katsayısına Etkisi	43
1.7 Ara Yüzey Sürtünme Açılarının Belirlenmesi	47
2 MALZEME ÖZELLİKLERİ	50
2.1 Geri Dolgu Özellikleri	50
2.1.1 Geri Dolgunun Fiziksel Özellikleri	50
2.1.2 Ara Yüzey Kayma Mukavemeti Parametrelerinin Belirlenmesi	51
2.1.3 Model Deneyler İçin Kumun Dr (%)’sinin Belirlenmesi	60
2.1.4 Dolgu Parametrelerinin Üç Eksenli Deneylerle Belirlenmesi	62
2.2 EPS Geofoam İçin Gerilme Şekil Değişirme İlişkisi	66
2.2.1 Serbest Basınc Deneyleri	67
2.2.2 Üç Eksenli (UU) Basınc Deneyleri	69

3 TAM ÖLÇEKLİ DENEYLER	72
3.1 Tam Ölçekli Model Deney Sistemi.....	72
3.2 Hazırlık Aşamaları	73
3.2.1 Deney Borusu ve Potansiyometrelerin Yerleştirilmesi	73
3.2.2 Tank Duvarlarının İyileştirilmesi	74
3.2.3 Gerilme Ölçerlerin Kalibrasyonu	76
3.2.4 Deney Sistemine LVDT'lerin Yerleştirilmesi	78
3.2.5 Yükleme Başlığının ve Yazılımın Revizyonu	79
3.3 Tam Ölçekli Laboratuvar Deneyleri	80
3.3.1 Kum Deneyleri (S Deneyi)	80
3.3.2 Borulu Deney (P Deneyi)	84
3.3.3 EPS Geofoam İle Desteklenen Borulu Deneyler (E1 ve E2)	85
4 DENEYSEL ÖLÇÜMLER	87
4.1 Yüzeysel Oturmalar (S_d)	87
4.2 Düşey Gerilmeler	88
4.3 Yatay Gerilmeler	91
4.4 Boru Yatay ve Düşey Çap Değişimleri	91
5 SAYISAL ANALİZLER	94
5.1 Tam Ölçekli Laboratuvar Deneylerinin Doğrulanması	94
5.1.1 Model Genel Geometrisi, Mesh ve Sınır Durum Koşulları	94
5.1.2 Malzeme Özellikleri	96
5.1.3 Kurulum Aşamaları	98
5.1.4 Parametrik Aşamaları	98
6 BULGULAR VE TARTIŞMA	99
6.1 Kum (S) ve Borulu (P) Deneylere Ait Verilerin Değerlendirilmesi	99
6.1.1 Yüzeysel Oturmalar	99
6.1.2 Düşey Gerilmeler	100
6.1.3 Yatay Gerilmeler	106
6.1.4 Boru Yatay ve Düşey Çap Değişimleri	108

6.1.5	Yanal Toprak Basıncı Katsayısının Değişimi	112
6.1.6	Parametrik Çalışmalar	115
6.2	Borulu (P) ve EPS Geofoam ile Desteklenen Borulu Deneylere (E1 ve E2) Ait Verilerin Değerlendirilmesi	134
6.2.1	Yüzeysel Oturmalar	135
6.2.2	Düşey Gerilmeler	137
6.2.3	Yatay Gerilmeler	141
6.2.4	Boru Yatay ve Düşey Çap Değişimleri	144
6.2.5	Parametrik Çalışmalar	146
7	SONUÇ	155
7.1	Sonuçlar	155
7.2	Sığ Gömülü Esnek Boru Sistemlerinin Tasarımı İçin Öneriler	159
	KAYNAKÇA	163
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	175

SİMGE LİSTESİ

C_a	Adhezyon
K_a	Aktif toprak basıncı katsayısı
K_{FEM}	Analizden belirlenen yatay toprak basıncı katsayısı
σ_{h1a}	Analiz için springline birinci ölçüm noktasının yatay gerilmesi
K_a	Analizler için yatay toprak basıncı katsayısı
σ_{v1a}	Analiz için springline birinci ölçüm noktasının düşey gerilmesi
δ	Ara yüzey sürtünme açısı
γ	Birim hacim ağırlık
d_c	Borunun düşey esnemesi
B_c	Borunun genişliği
E_p	Boru için elastisite modülü
e	Boşluk oranı
$\sigma_{taç}$	Boru taç bölgesine etki düşey gerilmeler
D	Çap
ε_t	Çekme davranışı için eksenel şekil değiştirme
dr	Deformasyon oranı
σ_{v1t}	Deney için springline birinci ölçüm noktasının düşey gerilmesi
K_t	Deneyler için yatay toprak basıncı katsayısı
C_c	Derecelenme katsayısı
ψ	Dilatasyon açısı
E_s	Dolgu için elastisite modülü
σ_v	Düşey gerilme
D_{10}	Efektif dane çapı
ε	Eksenel şekil değiştirme
E	Elastisite modülü
E_f	Elastisite modülü
H_e	Eşit oturma yüzeyi ile boru üst yüzeyi arasındaki yükseklik
σ	Gerilme
B	Hareketli dilimin yarı genişliği
V	Hareketli kapak üzerine etkiyen gerilme
ϕ	İçsel sürtünme açısı
d_f	Karşılaştırma yapılacak durum için deformasyon
σ_f	Karşılaştırma yapılacak durum için gerilme

τ	Kayma gerilmesi
α	Kemerlenme için kayma düzlemlerinin yatayla yaptığı açı
θ	Kemerlenme için kayma düzleminin yatayla yaptığı açı
ρ	Kemerlenme oranı
c	Kohezyon
$e_{\max}$	Maksimum boşluk oranı
$\gamma_{k\max}$	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
$e_{\min}$	Minimum boşluk oranı
H	Numune yüksekliği
w_{opt}	Optimum su muhtevası
D_{50}	Ortalama dane çapı
h	Örtü yükü kalınlığı
G_s	Özgül ağırlık
K_p	Pasif toprak basıncı katsayısı
ν	Poisson oranı
m	Power
d_i	Referans durum için deformasyon
σ_i	Referans durum için gerilme
E_{50}	Sekant elastisite modülü
ϵ_c	Sıkışma davranışı için eksenel şekil değiştirme
σ_{v1}	Springline hattındaki birinci ölçüm noktası için düşey gerilme
σ_{h1}	Springline hattındaki birinci ölçüm noktası için yatay gerilme
σ_{v2}	Springline hattındaki ikinci ölçüm noktası için düşey gerilme
σ_{h2}	Springline hattındaki ikinci ölçüm noktası için yatay gerilmesi
K_o	Sukunetteki toprak basıncı katsayısı
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı
w	Su muhtevası
$q_{sür}$	Sürşarj gerilmesi
C_u	Uniformluk katsayısı
σ_h	Yatay gerilme
K	Yatay toprak basıncı katsayısı
ρ	Yoğunluk
D_{30}	Zeminin %30'unun geçtiği çap
D_{60}	Zeminin %60'ının geçtiği çap

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.H.A	Birim hacim ağırlık
c ₁	Boru deformasyonları ile kemerlenme ilişkisi için katsayı
CAN/CSA	Canadian Standards Association
CD	Consolidated drained
CL	Düşük plastisiteli kil
cm	Santimetre
CMP	Corrugate metal pipe
CPPA	Corrugated Polyethylene Pipe Association
CSP	Corrugated steel pipe
Dr	Relative density
EA	Eksenel eğilme
EI	Eğilme rijitlik
EPS	Expanded polystyrene
FRC	Reinforced concrete pipe
fs	Kemerlenme mekanizmasında kayma gerilmesi
GW	İyi derecelenmiş çakıl
HS	Hardening soil
HDPE	High Density Polyethylene
kg	Kilogram
kPa	Kilo pascal
L	Large
LE	Linear elastik
LWDT	linear variable differential transformer
M	Medium
m	Metre
M.C	Mohr Coloumb
max.	Maksimum
min.	Minimum
ML	Düşük plastisiteli silt
mm	Milimetre
MPa	Mega pascal

NAVFAC	Naval Facilities Engineering Systems Command
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NLEP	Nonlinear elasto plastik
NLHP	Nonlinear hypo plastik
PE	Polyethylene
Ph	Borunun yatay ϕ ap değişimi
Ph _a	Analiz için borunun yatay ϕ ap değişimi
Ph _t	Deney için borunun yatay ϕ ap değişimi
PP	Polypropylene
p ^{ref}	Referans gerilme
Pv	Borunun dűsey ϕ ap deęiřimi
Pv _a	Analiz için borunun dűsey ϕ ap deęiřimi
PVC	Polyvinyl chloride
Pv _t	Deney için borunun dűsey ϕ ap deęiřimi
R _{int}	Ara yűzey azaltma etkeni
r _s	Rijitlik oranı
r _{vd}	Deformasyon değişim oranı
r _{vs}	Gerilme değişim oranı
S	Small
S.E	Sonlu elemanlar
S _d	Toplam yűzeysel oyutma
S _f	Borunun dolgu içersindeki oturması
S _g	Doğal zemin oturması
S _m	Boru yanlarında yer alan zeminin oturması
SP	Kűtű derecelenmiř kum
SP-1	Boru yatay simetri eksenindeki birinci ۆlűm noktası
SP-2	Boru yatay simetri eksenindeki ikinci ۆlűm noktası
SR-HDPE	Stell Reinforced High Density Polyethylene
SW	İyi derecelenmiş kum
TDA	Tire-Derived Aggregat
TS EN	Tűrk Standardları Enstitűsű
u _{ed}	Toplam yűzeysel oturma miktarındaki EPS'nin dűsey oturması
u _{pd}	Toplam yűzeysel oturma miktarındaki borunun dűsey oturması
USCS	The Unified Soil Classification System
u _{sd}	Toplam yűzeysel oturma miktarındaki kumun dűsey oturması

UU	Unconsolidated undrained
XPS	Ekstrüde Polistiren
Y.T.B.K	Yanal yoprak basıncı katsayısı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Farklı özelliklere göre yapılan gömülü boru sınıflandırmaları	1
Şekil 1.2 Kurulum prosedürlerine göre borular türleri a) hendek borusu b) pozitif projeksiyonlu dolgu borusu c) negative projeksiyonlu dolgu borusu.....	2
Şekil 1.3 Boru kesiti üzerinde sıklıkla ölçüm alınan bölgeler	4
Şekil 1.4 Farklı gerilme durumları için boru deformasyonu a) $\sigma_v = \sigma_h$ b) $\sigma_v > \sigma_h$ c) $\sigma_v < \sigma_h$	5
Şekil 1.5 Göçme türleri a) yerel göçme b) springline bölgesindeki göçme c) taç bölgesindeki göçme	6
Şekil 1.6 Boru deformasyonları a) gerçek boru deformasyonları b) şematik gösterim	7
Şekil 1.7 Arazi deneyleri için detaylar a) kurulum aşaması b) yükleme aşaması ...	8
Şekil 1.8 Arazi koşullarında sıg gömülü esnek boru için yükleme koşulları	9
Şekil 1.9 Hareketli kamyon yüklerine maruz kalan ve deforme olan boru kesiti .	10
Şekil 1.10 Deneyler için boru ve geri dolgudan alınan görüntülerden bir kesit	12
Şekil 1.11 2 boyutlu gerilme durumu için deney sistemi	13
Şekil 1.12 Kemerlenme teorisi için trapdoor deney sistemi	14
Şekil 1.13 Trapdoor için elde edilen sonuçlar a) kapak üzerindeki yükün kapak yer değiştirmesine bağlı değişimi b) K'nin derinlikle değişimi	15
Şekil 1.14 Kumun aşağı yöndeki hareketi ve kemerlenme a) deney sisteminin genel görünümü b) kum hareketine göre gelişen yük dağılımları	16
Şekil 1.15 Farklı kemerlenme modelleri a) düşey düzlemler b) üçgen c) parabol.	19
Şekil 1.16 Hendek içerisindeki rijit bir boru için yükün dağılımı	20
Şekil 1.17 Pozitif projeksiyonlu borularda meydana gelen deformasyonlar a) rijit boru b) esnek boru	20
Şekil 1.18 Rijit ve esnek boruların yük taşıma mekanizmaları a) rijit boru b) esnek boru	22
Şekil 1.19 Gömülü bir boru için kemerlenme mekanizması	22
Şekil 1.20 Gömülü boru sisteminde yük transferi a) rijit boru b) esnek boru c) borudan daha esnek bir malzemenin kullanılması	23
Şekil 1.21 Tam ölçekli deney sistemi ve deneylere ait detaylar a) ensrumantasyon detayları b) EPS kullanım durumları	24
Şekil 1.22 Deneylere ait detaylar a) model deney sistemi b) deney kurulum aşaması c) şerit yükleme plakası	25
Şekil 1.23 Deney ve analizlerde kullanılan menfez kesiti	26
Şekil 1.24 Deneylere ait detaylar a) kurulum aşaması b) yüklemeler altında EPS'nin deformasyonu c) yüklemeye hazır deney sistemi	27

Şekil 1.25	Model kesitleri a) yumuşak bölge tepe noktasında b) yumuşak zone U kesitte c) deney kutusunun sensing pad ile sarılı durumu.....	28
Şekil 1.26	Çalışmaya ait detaylar a) deney sistemine ait görsel b) boru ve gerilme ölçümleri için detaylar	29
Şekil 1.27	Boru ve dolgunun göreceli oturmalara göre boru tepesinde oluşan düşey gerilmelerin değişimi	29
Şekil 1.28	Deney aşamaları a) EPS olmadan b) geocell kullanımı c) EPS kullanımı d) EPS ve geocellin birlikte kullanımı	30
Şekil 1.29	Yoğunluğu 38 kg/m^3 olan EPS Geofoam için serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	33
Şekil 1.30	Sebest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi a) EPS10 b) EPS15	35
Şekil 1.31	Serbest basınç deney sonuçları referans alınarak Flac sonlu farklar yazılımından elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	35
Şekil 1.32	Üç eksenli (UU) deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	36
Şekil 1.33	Dane hareketine bağlı olarak yanal toprak basıncının değişimi.....	43
Şekil 1.34	EPS Geofomun istinat duvarında kullanımı.....	44
Şekil 1.35	Farklı ϕ değerleri için K_{FEM}/K_a değişimi	45
Şekil 1.36	K_{FEM}/K_a oranının ϕ 'ye bağlı değişimi.....	46
Şekil 2.1	Geri dolgu malzemesi için dane çapı dağılımı ve görseli	50
Şekil 2.2	Büyük ölçekli kesme kutusu a) genel görünüm b) detayları	51
Şekil 2.3	Dr (%) 40 için tekrarlı deneyler için sonuçlar	52
Şekil 2.4	Farklı Dr (%) için kayma gerilmesi-yatay yerdeğiştirme ilişkisi a) Dr(%) 60 b) Dr(%) 80.....	53
Şekil 2.5	Farklı Dr (%) değerleri için kayma düzlemleri	54
Şekil 2.6	HDPE malzemesi ile kum ara yüzey deneyleri için deney koşulları	55
Şekil 2.7	Farklı Dr (%) için sonuçlar a) Dr (%) 40 b) Dr (%) 60 c) Dr (%) 80	56
Şekil 2.8	Farklı Dr (%) değerleri için kum-HDPE deneyleri kayma düzlemleri ..	56
Şekil 2.9	Dr (%) 40 için farklı düşey gerilmeler için deney sonuçları	57
Şekil 2.10	Gerilme seviyelerine göre EPS-kum ara yüzey etkileşimleri a) düşük gerilme b) orta gerilme c) yüksek gerilme.....	58
Şekil 2.11	EPS-kum ara yüzey etkileşimi sonucu EPS yüzeyide meydana gelen değişimler a) düşük gerilme seviyesi b) orta gerilme seviyesi	59
Şekil 2.12	SP için kompaksiyon eğrisi ve kompaksiyon parametreleri	60
Şekil 2.13	Mini tank içerisinde Dr (%) tayini a) mini tank ve sıkıştırma aparatları b) kontrollü ve kademeli sıkıştırma c) sıkıştırması tamamlanan mini tank	61
Şekil 2.14	Üç eksenli deney sisteminin genel görünümü	62

Şekil 2.15 Üç eksenli numuneler için numune hazırlanması.....	63
Şekil 2.16 Gerilme –şekil değiştirme ilişkisi a) Dr (%) 60 b) Dr (%) 80.....	64
Şekil 2.17 Mohr-Coloumb göçme zarfı a) Dr (%) 60 b) Dr (%) 80	65
Şekil 2.18 Gerilme şekil değiştirme eğrisinden E50’nin belirlenmesi	66
Şekil 2.19 Farklı boy/çap oranlarıda ve farklı yoğunluktaki EPS numuneler	66
Şekil 2.20 Boy/çap oranı 1 olan numunelere ait serbest basınç deney sonuçları ..	67
Şekil 2.21 Farklı bölgeler için E modüllerinin elde edilmesi a) EPS15 b) EPS25	68
Şekil 2.22 Serbest basınç deneylerinde EPS Geofoamdaki eğilme davranışı	69
Şekil 2.23 Farklı boy/çap ve yoğunluklardaki EPS Geofoam için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	69
Şekil 2.24 Hücre basınçlarına bağlı olarak EPS Geofoamdaki hacim değişimleri...	70
Şekil 2.25 Farklı hücre basınçlarında yapılan üç eksenli deneylere ait gerilme şekil değiştirme ilişkisi a) EPS15 b) EPS25.....	71
Şekil 3.1 Tam ölçekli model deney sistemi.....	72
Şekil 3.2 Deney borusu ve potansiyometreler a) potansiyometrelerin şematiği b) potansiyometrelerin boru içerisindeki görünümü c) deney borusu.....	74
Şekil 3.3 Tank duvarlarının iyileştirilmesi a) özel kayganlaştırıcı b) polietilen c) örgüsüz geotekstil d) HDPE geomembran.....	75
Şekil 3.4 Tank duvarlarının iyileştirilmesi a) örgüsüz geotekstilin koli bandı ile güçlendirilmesi b) nihai durumda iyileştirilmiş katman	75
Şekil 3.5 Gerilme ölçümleri için kullanılan farklı boyutlardaki gerilme ölçerler .	76
Şekil 3.6 Gerilme ölçerlerin kalibrasyon aşamalarına ait kesit	77
Şekil 3.7 L tipi gerilme ölçerler için kalibrasyon sonuçları a) 200 kPa kapasiteli b) 500 kPa kapasiteli	78
Şekil 3.8 Yüzeysel oturmalar için kullanılan LVDT’lerin konumu	79
Şekil 3.9 Yükleme başlığındaki revizyon a) öncesi b) sonrası.....	79
Şekil 3.10 Deney sistemi için control paneli ve yazılım ara yüzü.....	80
Şekil 3.11 Kumun kontrollü sıkıştırılması a) B.H.A kontrolü b) sıkıştırma plakaları ve tank duvarlarının ölçeklendirilmesi	81
Şekil 3.12 Kum deneyi için gerilme ölçerlerin konumu konumu a) plan b) kesit...82	
Şekil 3.13 Gerilme ölçerlerin daha efektif çalışması için başlık uygulaması.....	83
Şekil 3.14 Yükleme aşamasına ait görsel	84
Şekil 3.15 Borulu deney için gerilme ölçerlerin ve borunun konumu a) kesit b) plan.....	84
Şekil 3.16 Borulu deney için görseller a) boru içersine zemin girişi önlemek için yapılan uygulam b) L5-L6 gerilme ölçerlerin konumu	85
Şekil 3.17 EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler için gerilme ölçerlerin ve EPS’nin konumu a) kesit b) plan	86

Şekil 3.18 E2 deneylerine ait görseller	86
Şekil 4.1 Tam ölçekli model deneylerden ölçülen yüzeysel oturumların değişimi..	87
Şekil 4.2 S, P ve E1 deneyleri için düşey gerilmeler a) taç b) taban	89
Şekil 4.3 Yatay simetri eksenindeki düşey gerilmelerin değişimi a) M1 ve M2 b) L7 ve L8	90
Şekil 4.4 Yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişimi	91
Şekil 4.5 P ve E1 deneyleri için boru deformasyonları a) Ph ve Pv b) dr.....	92
Şekil 5.1 S, P ve E deneylerine ait modelleme bilgileri a) mesh b) model geometrisi ve sınır durum koşulları	95
Şekil 5.2 Sonlu elemanlar ağına bağlı olarak meydana gelen göçmeler	96
Şekil 6.1 Ölçülen ve hesaplanan yüzeysel oturumların değişimi.....	100
Şekil 6.2 Analizler için düşey gerilmelerin değişimi a) S deneyi b) P deneyi.....	101
Şekil 6.3 Ölçülen ve hesaplanan gerilmelerin değişimi a) taç b) taban c) ρ	102
Şekil 6.4 Merkez zemin prizması için deformasyon davranışı a) trapdoor b) analiz	103
Şekil 6.5 Boru taç bölgesindeki gerilmelerin değişimi a) farklı K değerleri için sonuçlar b) gerilmelerin karşılaştırılması.....	105
Şekil 6.6 Boru yay hattındaki gerilmelerin değişimi a) M1 ve M2 b) L7 ve L8...	106
Şekil 6.7 Boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişimi.....	107
Şekil 6.8 Şerit yüklemelere maruz kalan HDPE boru için deformasyonların dağılımı a) analiz b) idealleştirilmiş.....	108
Şekil 6.9 Farklı yükleme kademeleri için boru çap değişimleri a) Pv ve Ph b) dr..	110
Şekil 6.10 SP-1 için boru çap değişimleri göre gerilmelerin değişimi a) σ_{h1} ve Ph b) σ_{v1} ve Pv	111
Şekil 6.11 Uygulanan gerilmelere bağlı olarak K'nin değişimi	114
Şekil 6.12 Yol üst kaplamasının gerilme ve deformasyonlara etkisi a) plakasız gerilme b) plakalı gerilme c) plakasız deformasyon d) plakalı deformasyon.....	116
Şekil 6.13 Rijit kaplamanın etkisi a) referans noktalar b) ρ değişimi.....	117
Şekil 6.14 Rijit plaka tabakasının gerilme ve deformasyonlara etkisi a) r_{vd} b) r_{vs} ..	119
Şekil 6.15 Rijit kaplama tabakasının K'ye etkisi.....	120
Şekil 6.16 Boru taç bölgesi için gerilmelerin hesaplanması a) Eşitliş 1.4 ve analizlerden elde edilen gerilmeler b) kemerlenme oranı.....	121
Şekil 6.17 0,5D gömülme derinliği için boru deformasyon formu ve kesit değerleri a) U_y b) N c) Q d) M.....	122
Şekil 6.18 Farklı h değerlerinin gerilme ve deformasyonlara etkisi a) r_{vd} b) r_{vs} ..	123
Şekil 6.19 SP-1 için K değerlerindeki değişim a) farklı yükleme kademeleri için K b) farklı rs değerleri için ortalama K.....	125

Şekil 6.20	Farklı r_s değerleri boru taç bölgesindeki gerilmelerin değişimi a) Eşitlik 1.4 ve analizlerden elde edilen gerilmeler b) kemerlenme oranı.....	126
Şekil 6.21	Farklı r_s 'ler için deformasyon ve gerilme değişim oranları a) r_{vd} b) r_{vs}	127
Şekil 6.22	SP-1 için K değerlerindeki değişim a) farklı yükleme kademeleri için K b) farklı r_s değerleri için ortalama K.....	128
Şekil 6.23	Farklı r_s değerleri boru taç bölgesindeki gerilmelerin değişimi a) Eşitlik 1.4 ve analizlerden elde edilen gerilmeler b) kemerlenme oranı.....	130
Şekil 6.24	Farklı r_s 'ler için deformasyon ve gerilme değişim oranları a) r_{vd} b) r_{vs}	131
Şekil 6.25	Dolgu rijitliğine göre yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişimi a) $E_s=28$ MPa b) $E_s= 115$ MPa c) şematik olarak gerilmelerin tranferi.....	132
Şekil 6.26	SP-1 için K değerlerindeki değişim a) farklı yükleme kademeleri için K b) farklı r_s değerleri için ortalama K.....	133
Şekil 6.27	EPS Geofoamun aşırı deformasyonu ve göçme bölgesi.....	135
Şekil 6.28	Borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler ve analizleri için yüzeysel oturmaların değişimi.....	137
Şekil 6.29	P ve E1 için gerilme ve deformasyonların karşılaştırılması a) P için gerilmelerin şematik gösterimi b) E1 için gerilmelerin şematik gösterimi c) P için boru deformasyon formu d) E1 için boru deformasyon formu	138
Şekil 6.30	P ve E1 deneyleri için gerilmelerin değişimi a) boru tacındaki gerilmelerin değişimi b) kemerlenme oranı.....	139
Şekil 6.31	Komşu zemin prizmasındaki düşey gerilmeler a) SP-1 b) SP-2.....	141
Şekil 6.32	SP-1 için yatay gerilmelerin değişimi.....	142
Şekil 6.33	P ve E1 deneylerinde deney ve analizler için K'nin değişimi.....	142
Şekil 6.34	P ve E1 deneyleri için gerilme değişim oranı a) EPS1-15 b) EPS1-25.....	143
Şekil 6.35	Merkez zemin prizmasındaki gerilmelerin ve boru deformasyonlarının değişimi a) P deneyi b) E1 deneyi	144
Şekil 6.36	Borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler ve analizleri için boru çap değişimleri	145
Şekil 6.37	Deformasyon değişim oranları a) P_v ve P_h için d_r b) S_d için d_r	146
Şekil 6.38	EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler için rijit kaplamanın düşey gerilme dağılımına olan etkisi a) kaplamasız b) kaplamalı.....	148
Şekil 6.39	Gömülme derinliğine bağlı olarak düşey gerilmelerin dağılımı a) 3D için E1-15 b) 2D için E1-25.....	150
Şekil 6.40	En ideal EPS Geofoam kesitleri için analizler a) EPS kalınlığının etkisi b) EPS genişliğinin etkisi c) ideal kesitler.....	152
Şekil 6.41	En ideal EPS Geofoam boyutları a) deney koşulları b) yüksekliğin etkisi c) genişliğin etkisi d) en ideal EPS kesiti.....	153

Şekil 6.42 Literatür çalışmalarında önerilen soft zone boyutları.....	154
Şekil 7.1 Rijit kaplamanıngerilme dağılımına etkisi.....	160
Şekil 7.2 Dolgudan kaynaklanan yapısal hasarlar.....	160
Şekil 7.3 Koruge HDPE ve çelik boruda için tacındaki yapısal hasarlar.....	161
Şekil 7.4 Sığ gömülü boru sistemlerinde EPS Geofoam'un kullanımına dair arazi görselleri.....	162
Şekil 7.5 Yatay simetri eksenindeki yapısal hasarlar.....	162



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	CAN/CSA B182.11 standardına göre geri dolgu özellikleri ve sıklığı .	4
Tablo 1.2	EPS Geofoam için TS EN 14933’da belirtilen dayanım özellikleri	32
Tablo 1.3	Hardening Soil malzeme parametreleri	34
Tablo 1.4	Farklı araştırmacılar tarafından önerilen amprik eşitlikler	37
Tablo 1.5	Literatür çalışmalarında kullanılan EPS malzeme parametreleri	38
Tablo 1.6	Gömülü yapılar için kullanılan yazılım ve geri dolgu özellikleri	41
Tablo 1.7	Termoplastik boruların mekanik özellikleri	42
Tablo 1.8	Literatür çalışmaları için boru malzeme parametreleri ve modelleme .	43
Tablo 1.9	Literatür çalışmaları için ara yüzey mukavemeti parametreleri	49
Tablo 2.1	Geri dolgu malzemesi için fiziksel özellikler	51
Tablo 2.2	Farklı Dr (%) için belirlenen kayma mukavemeti parametreleri	54
Tablo 2.3	Farklı Dr (%) için kum-HDPE kayma mukavemeti parametreleri	56
Tablo 2.4	EPS-kum ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri	59
Tablo 5.1	Geri dolgu malzeme modeli ve parametreleri.....	97
Tablo 5.2	HDPE boru için malzeme modeli ve parametreleri	97
Tablo 5.3	EPS Geofoam için malzeme modeli ve parametreleri	98
Tablo 5.4	Analiz aşamasına ait detaylar	98
Tablo 6.1	Literatür çalışmaları için önerilen K değerleri.....	113

Sığ Gömülü Esnek Boru Davranışının Deneysel Ve Sayısal Analizlerle İncelenmesi

Murat GÜLEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Alt yapı hizmetlerinin karşılanması için kullanılan ve temel mühendislik yapılarından biri olan gömülü boru sistemleri hizmet süresi boyunca farklı yüklemelere maruz kalır. Amaca uygun olarak inşa edilen gömülü boru sistemlerinde kullanılan borunun türü, kurulumu, kısa ve uzun süreli performansı ile hizmet ömrü boyunca oluşan yapısal hasarların mertebesinin doğru bir şekilde öngörülmesi ve gerekli önlemlerin alınması oldukça önemlidir. Yapısal hasarlar boru kapasitesini etkiler ve deformasyonlar boru hattının çalışmasını engelleyecek boyutlara ulaşır. Bu durum tasarımda kullanılan parametrelerin proje sahasıyla uyumlu olması ve boru zemin etkileşiminin dikkate alınması ile önlebilir. Özellikle zemin gerilmelerine ve şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü esnek boru sistemlerinde boru esneme davranışı kemerlenmeye, başlangıç koşullarından farklı gerilme dağılımlarının oluşmasına ve yanal toprak basıncı katsayısının değişmesine neden olur. Farklı mühendislik yapılarında incelenen bu durum, sığ gömülü esnek boru sistemleri için henüz tam olarak açıklanabilmiş değildir. Bu tez çalışması kapsamında boru esneme davranışının kemerlenme mekanizmasına, gerilmelerin dağılımına ve merkez zemin prizması ile boru yatay simetri

eksenindeki yanal toprak basınç katsayısına etkisi tam ölçekli laboratuvar deneyleri ile araştırılmıştır. Ayrıca kemerlenme etkisini artırmak, boruya etkiyen gerilmeleri ve boru deformasyonlarını azaltmak için boru tepe noktasında 15 kg/m^3 ve 25 kg/m^3 yoğunluklara sahip EPS Geofoamun kullanılabilirliği incelenmiştir. Tam ölçekli laboratuvar deneyleri 2D sonlu elemanlar yazılımı Plaxis (2021) ile modellenmiş ve oluşturulan model üzerinden üst yapı kaplama rijitliği, boru gömülme derinliği, dolgu ve boru rijitliği ile farklı boyutlardaki EPS Geofoamun kullanımı dikkate alınarak parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Nihai durumda şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü esnek bir boru için esneme davranışının kemerlenmeye, gerilme dağılımına ve yanal toprak basıncı katsayısına olan etkisi sistematik olarak açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sığ gömülü esnek boru sistemi, EPS geofoam, kemerlenme mekanizması, gerilme dağılımı, yanal toprak basıncı katsayısı

Investigation Of Shallow Buried Flexible Pipe Behaviour By Experimental And Numerical Analyses

Murat GÜLEN

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Havvanur Kılıç

Buried pipe systems, which are used to provide infrastructure services and are one of the basic engineering structures, are subject to various loads during their service life. It is of great importance to accurately predict the type of pipe to be used in the buried pipe systems to be constructed according to the purpose, its installation, short and long-term performance and the level of structural damage that will occur during its service life. In addition, it is necessary to take the necessary precautions. Structural damage can affect the capacity of the pipe and deformations can reach dimensions that prevent the operation of the pipeline. This situation can be prevented by accurately predicting the parameters to be used in the design and the operating mechanism of the system. In particular, in shallowly buried flexible pipe systems subjected to soil stresses and local loading conditions, the deflection behaviour of the pipe causes arching, stress distributions different from the initial conditions and changes in the lateral earth pressure coefficient, which is initially at the K_0 condition. This phenomenon, which has been studied in various engineering structures, has not been fully explained for shallowly buried flexible pipe systems. In this thesis, the effect of pipe deflection behaviour on the arching mechanism, stress distribution and lateral earth pressure coefficient at the centre soil prism and springline is investigated by full-scale laboratory experiments. Furthermore, the

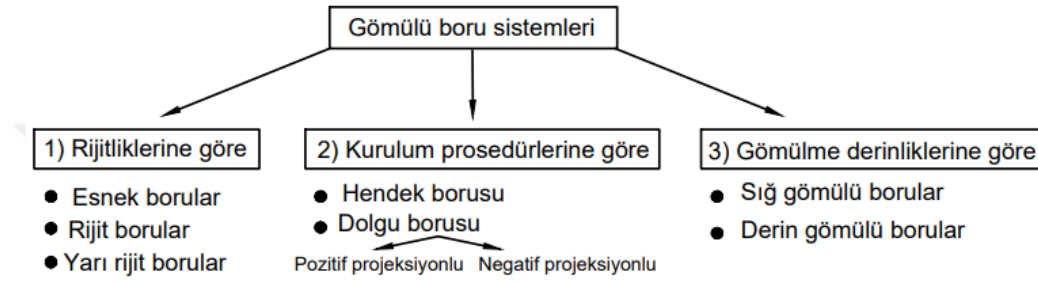
potential of EPS Geofoam with varying densities at the pipe's upper surface to enhance the arching effect, diminish the stresses exerted on the pipe, and decrease. The full-scale laboratory experiments were modelled using 2D finite element software Plaxis (2021) and parametric studies were carried out, taking into account the stiffness of the pavement, embedment depth, backfill and pipe stiffness, and the use of different sizes of EPS Geofoam. The effects of deflection behaviour on the arching, stress distribution and lateral earth pressure coefficient of a shallowly buried flexible pipe subjected to local loading conditions are systematically explained.

Keywords: Shallow buried flexible pipe system, EPS geofoam, arching mechanism, stress distribution, lateral earth pressure coefficient



1.1 Gömülü Boru Sistemleri İçin Genel Bilgiler

Gömülü boru sistemlerini farklı şekillerde gruplandırmak mümkün olsa da genellikle boru rijitliği, boru kurulum prosedürü ve boru gömülme derinliği dikkate alınarak sınıflandırılır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Farklı özelliklere göre yapılan gömülü boru sınıflandırmaları

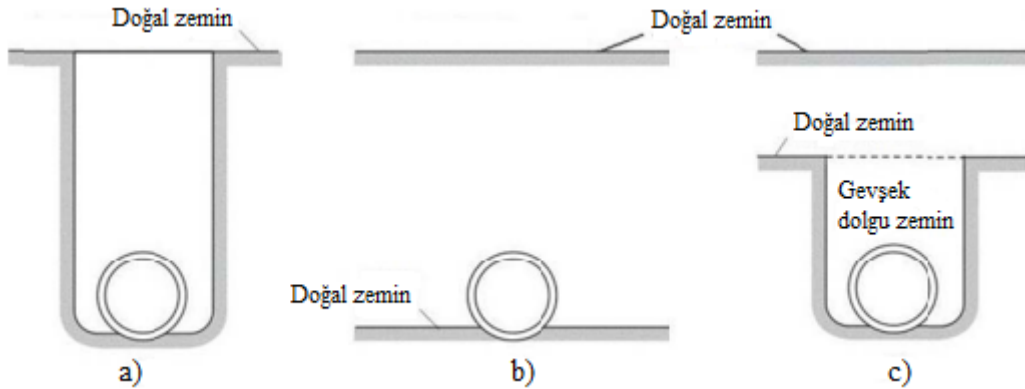
1.1.1 Rijitliklerine Göre Boru Türleri

Gömülü boru sistemleri maruz kaldıkları yüklemeler altında boru dairesel kesitinde deformasyonlar meydana gelir. Bu boru çap değişimleri referans alındığında, gömülü borular 2 ana grupta incelenmektedir. Farklı yüklemeler altında, boru kesitinde herhangi bir yapısal hasar oluşmadan boru çapının %2'sinden daha fazla deforme olan borular esnek olarak adlandırılırken, bu koşulu sağlamayan borular rijit olarak tanımlanmaktadır. Beton, betonarme ve çimento esaslı borular rijit boru sınıfında yer alırken; PE, HDPE, koruge HDPE, çelik, koruge çelik, PVC, koruge PVC, PP, alüminyum vb. borular ise esnek boru sınıfında yer alır (Moser ve Folkman, 2008). Gömülü boru sistemlerinin tasarım amacına uygun olarak hem rijit boruların dayanımı ve hem de esnek boruların esneme özellikleri aynı anda kullanılması gerebilir. Bu gereksinimin karşılanması, çelikle güçlendirilmiş çimento esaslı boruların (FRC) kullanılması ile mümkündür. Moore vd. (2004) bu tür boruları yarı rijit borular olarak tanımlamakta ve tasarım amacına uygun olarak kullanılacak boruları; rijit borular, yarı rijit borular ve esnek borular olmak üzere üç ana grupta ifade etmişlerdir.

Rijit ve esnek boruların yapısal özelliklerinin farklı olmasından dolayı yük taşıma mekanizmaları da farklılık gösterir. Rijit borular genellikle ihmal edilebilir seviyede deformasyona uğradıkları için iç ve dış yüklemeler altında maruz kaldıkları yükler borunun rijitliği tarafından karşılanır. Yükün uygulanma noktası ve sıklığı, boru çevresindeki geri dolgu malzemesinin sıkıştırılma özellikleri, boru ve dolgu özellikleri, boru çevresindeki gerilmelerin dağılımı vb. etkiler sonucu boru kesitinde farklı deformasyonlar meydana gelir. Borulardaki deformasyon kriteri sistemli olarak ilk kez Spangler (1941) tarafından geliştirilmiş ve yıllarca gömülü boruların tasarımında kullanılmıştır. Esnek borulardaki bu deformasyon tasarım kriteri farklı uluslararası standartlarda belirtilmiştir. Özellikle esnek borular farklı iç ve dış yüklemeler altında çapının %20-%30'una varan deformasyonlarda bile hizmet vermeye devam edebilir. Boru çapının %20-%30 deformasyonunda güvenlik sayısı 4 alındığında, boru çapının %5 veya %7,5 esnemesi tasarım kriteri olarak kullanılmaktadır (NCHRP, 1999; CPPA, 2006; AASHTO, 2007). Bu iki farklı boru davranışı dikkate alındığında tasarımlarda rijit borular için dayanım önemli olurken; esnek borularda ise meydana gelecek deformasyonun miktarı kritik olmaktadır.

1.1.2 Kurulum Yöntemlerine Göre Boru Türleri

Gömülü boru sistemleri inşa edilme yöntemleri dikkate alındığında hendek borusu ve dolgu borusu olmak üzere 2 ana grupta incelemektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Kurulum prosedürlerine göre borular türleri a) hendek borusu b) pozitif projeksiyonlu boru c) negatif projeksiyonlu boru (Spangler ve Handy, 1982)

Hendek borusu; kohezyonlu doğal bir zeminde kazılan hendek içerisine borunun yerleştirilmesi ve sonrasında hendeğin doğal zemin kotuna kadar geri dolgu ile doldurulması ile kurulumu tamamlanan borulardır (Şekil 1.2a).

Dolgu borusu; doğal zemin üzerine veya sığ bir hendek içerisine yerleştirilen boru üzerine dolgu inşa edilmesi ile elde edilen borulardır. Dolgu borularında borunun tepe noktası doğal zemin kotunun üstünde inşa edilmiş ise pozitif projeksiyonlu boru (Şekil 1.2b), boru tepe noktası doğal zemin kotundan daha aşağıda ise negatif projeksiyonlu boru olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.2c).

1.1.3 Gömülme Derinliklerine Göre Boru Türleri

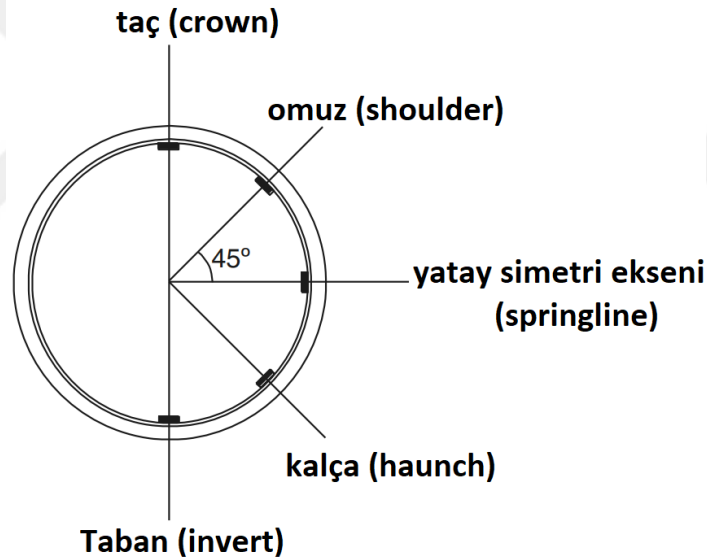
Gömülme derinlikleri genellikle 10 m ve daha büyük olan borular derin gömülü boru sistemleri olarak ifade edilirken, gömülme derinliği genellikle 2 m ve daha küçük olan borular ise sığ gömülü boru sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Özellikle gömülme derinlikleri dikkate alındığında, borularda gerilme ve deformasyonlara neden olan iç ve dış faktörler farklılık gösterir. Zeminin zati yükünden dolayı meydana gelen uniform yayılı gerilmeler, derin gömülü boru sistemlerinin tasarımında dikkate alınan ve boruda deformasyonlara neden olan ana faktördür. Sığ gömülü boru sistemlerinde ise yüzeyden uygulanan trafik yükleri boru davranışını belirleyen en önemli parametredir. Ayrıca kullanılan borunun türü, geri dolgu özellikleri, boru çevresinde oluşan gerilmelerin dağılımı, dolgu sıkıştırma yöntemi ve kemerlenme etkisi boru davranışına etki eden diğer faktörlerdir.

Gömülü boru sistemlerinde kullanılan ve boru-zemin etkileşimini yönlendiren geri dolgu malzemesinin dane çapı dağılımı, dane şekilsel özellikleri, sıklığı ve sıkıştırma prosedürü uluslararası standartlarda detaylı olarak belirtilmiştir. Tablo 1.1’de bu standartlardan biri olan CAN/CSA B182.11 (2004)’te yer alan geri dolgu özellikleri sunulmuştur.

Gömülü boru sistemlerinin performansını, inşa aşamasından hizmet ömrü sonuna kadar etkileyen faktörleri belirlemek ve olumsuzluklara çözüm üretmek amacıyla arazi, laboratuvar ve sayısal analizleri de içeren farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda boru kesiti üzerinden sıklıkla ölçüm alınan ve boru davranışında önemli olan bölgeler Şekil 1.3’te belirtilmiştir.

Tablo 1.1 CAN/CSA B182.11 standardına göre geri dolgu özellikleri ve sıklığı

Malzeme sınıfı	1	2	3	4
Malzeme Özellikleri	Köşeli taşlar	Temiz çakıl ve temiz kum	Farklı zemin karışımları	İnce daneli zeminlerin karışımı
Maximum su muhtevası aralığı (%)	-	9-12	9-18	6-30
Kompaksiyon tekniği	Rölatif Sıklık (Dr), %			
Mekanik kompaktör	95-100	95-100	95-100	90-100
Vibratör	80-95	80-95	80-95	75-90
Suya doymun kompaksiyon	80-95	80-95	-	-
Elle yerleştirme için Dr (%)	60-80	-	-	-
Elle sıkıştırma için Dr (%)	-	60-80	60-80	60-75
Direk dökme için Dr (%)	60-80	60-80	60-80	60-75



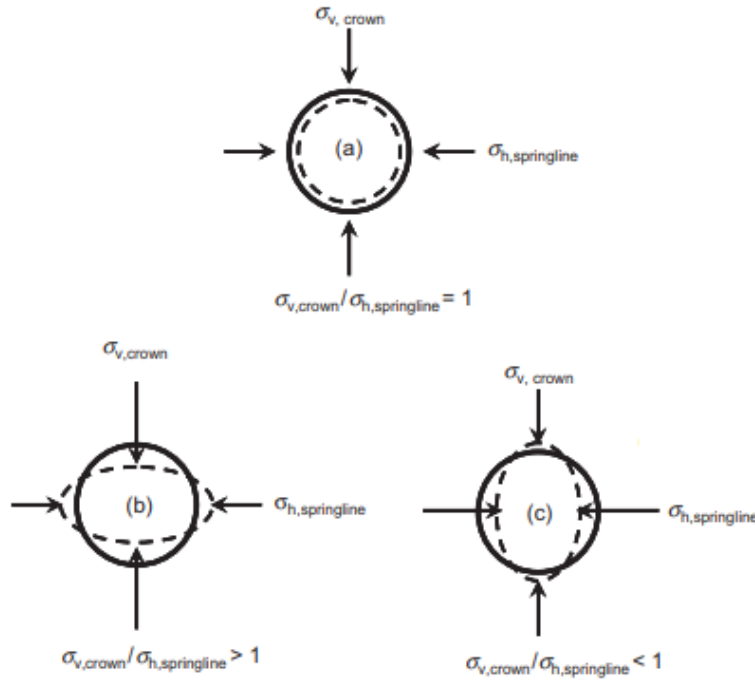
Şekil 1.3 Boru kesiti üzerinde sıklıkla ölçüm alınan bölgeler (Chaallal vd., 2015)

1.2 Gömülü Boru Sistemleri İçin Yapılan Çalışmalar

Gömülü esnek boru sisteminin kısa ve uzun süreli performansı ve bu süre içerisinde meydana gelecek yapısal hasarların mertebelerini etkileyen farklı parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerin sayısı ve etki derecesi araştırmacılar arasında farklılık gösterse de Fang vd. (2020), bunları 5 ana başlıkta açıklamışlardır;

- Geri dolgu özellikleri
- Geri dolgunun sıkıştırma özellikleri
- Boru yatağının özellikleri
- Kaplama türü ve trafik yükleri
- Boru özellikleri ve gömülme derinliği

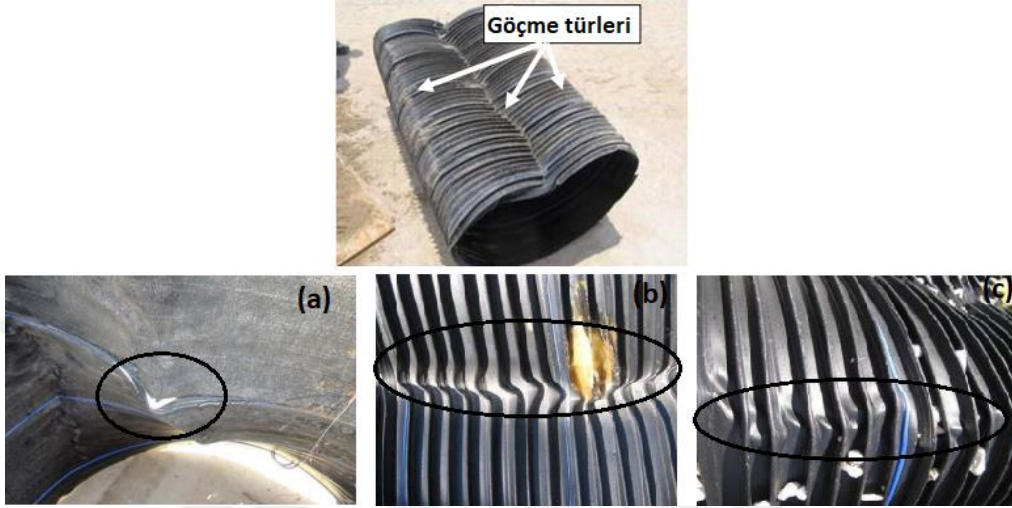
Farklı etkiler sonucu yüklemelere maruz kalan borular, gerilme koşullarına bağlı olarak esneme ve ya uzama hareketi yaparak deforme olur. Boruya etkiyen yatay ve düşey gerilmelerin eşitliğinde boru kesiti hacimce küçülmesine rağmen boruda belirgin bir esneme ve ya uzama hareketi meydana gelmez (Şekil 1.4a). Boruya etkiyen düşey gerilmelerin (σ_v) yatay gerilmelerden (σ_h) daha büyük olduğu durumda, boru esneme hareketi yaparak düşeyde kısalma ve yatayda uzama hareketi yapar (Şekil 1.4b). Fakat yatay gerilmelerin düşey gerilmelerden daha büyük olduğu durumlarda boru düşey doğrultuda uzama ve yatay doğrultuda kısalma hareketi yaparak yumurta şeklini alır (Şekil 1. 4c).



Şekil 1. 4 Farklı gerilme durumları için boru deformasyonu a) $\sigma_v = \sigma_h$ b) $\sigma_v > \sigma_h$ c) $\sigma_v < \sigma_h$ (Witthoeft ve Kim, 2015)

Farklı etkiler sonucu esneme veya uzama davranışı yapan borular, tasarımda dikkate alınan deformasyon sınırını aşabilir. Boru kesitinin zorlanması ile meydana gelen aşırı deformasyonlar boru kesitinde farklı göçme türlerine neden olur. Masajedian (2011), farklı rijitliklere ve üç farklı boru çapına (61 cm, 91 cm, 122 cm) sahip çelik takviyeli HDPE (SR-HDPE) ve korige çelik borular (CSP) için 2

farklı geri dolgu malzemesi (kum ve çakıl) kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yapılan deneylerde bölgesel yüklemelere (trafik yükleri) maruz kalan gömülü esnek borularda boru çapı (D), türü ve dolgu rijitliğine bağlı olarak üç önemli göçme türünün meydana geldiği ve bu göçme türlerinin AASHTO'da belirtilen göçme türleri ile paralellik gösterdiği ifade edilmiştir (Şekil 1.5).



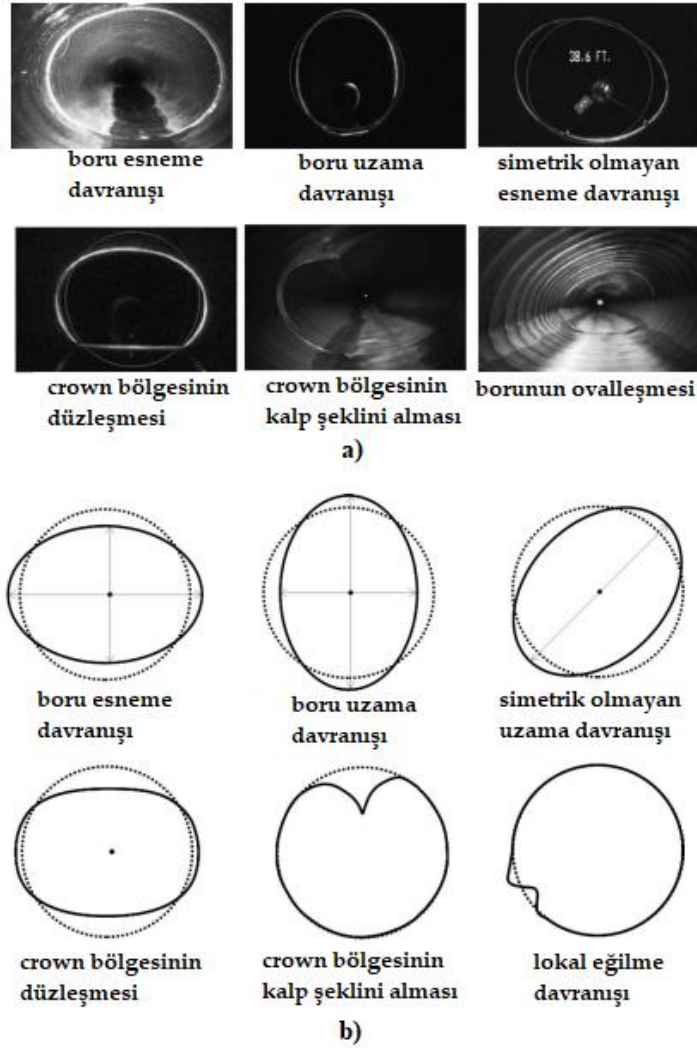
Şekil 1. 5 Göçme türleri a) yerel göçme b) taç bölgesindeki göçme c) yatay simetri eksenindeki göçme (Masajedian, 2011))

Kullanılan 2 farklı boru türü için SR-HDPE boruların rijitliği, CSP borulara kıyasla daha düşük olduğundan, dolgu rijitliği SR-HDPE boruların davranışında daha önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Gömülü esnek boru sistemlerinde boru esnemelerinden dolayı meydana gelen göçme türleri, iyi sıkıştırılmış ve boru etrafını bir bütün olarak kaplamış geri dolgu ile minimize edilebilir. Boru çevresinde yer alan ve boruyu çepeçevre saran geri dolgu, esneme veya uzama hareketi yapacak gömülü boruya yeterince zemin desteği sağladığında borunun hareketi kısıtlanır. Hareketi kısıtlanan borudaki eğilme davranışı ve buna bağlı olarak eğilme kaynaklı göçmeler de kısmen önlenir (Duncan, 1979; Leonards ve Juang, 1985; Katona ve Akl, 1985; Masajedian 2011).

Gömülü borular, tasarım aşamasında izin verilebilir deformasyon kriterine göre inşa edilmelerine rağmen farklı iç ve dış faktörlerden dolayı hizmet süresi boyunca bu deformasyon sınırını aşabilirler. Boru geometrisinin stabilitesinin sağlanamaması durumunda, boru profilinin farklı bölgelerinde kalıcı deformasyonlar ve yapısal hasarlar meydana gelir. Boru performansı bu durumdan olumsuz etkilenir ve nihai durumda gömülü boru sistemi hizmet veremez hale gelir.

Motahari ve Abolmaali (2010), ABD’de farklı eyaletlerde hizmet vermeye devam eden 96 HDPE boru hattı için toplam 4572 m uzunluğundaki HDPE boruların deformasyon özelliklerini, boru hattı içerisine yerleştirdikleri lazer tarayıcılar ve video kayıtları ile incelemişlerdir. Elde edilen görüntülerden özel profil yazılımları kullanılarak boru deformasyon formları ve bu deformasyonlara bağlı göçme türleri belirlenmiştir (Şekil 1.6).



Şekil 1. 6 HDPE boru deformasyonları a) gerçek boru deformasyonları b) şematik gösterimi (Motahari ve Abolmaali, 2010)

Lazer video incelemesinden elde edilen verilerin analizi sonucunda genellikle simetrik deformasyonlar gözlemlense de farklı deformasyon türlerinin de meydana geldiği belirtilmiştir. İncelenen HDPE boru hatlarının %63'lük kısmının AASHTO tarafından önerilen %5 deformasyon sınırını aştığı, tüm boru hatlarında maksimum ve ortalama deformasyonların sırasıyla %22,5 ve %7,2 olduğu ifade edilmiştir.

Trafik yüklerine maruz kalan sıg gömülü esnek boru sistemleri için boruya etkiyen gerilmeler, boru etrafındaki geri dolgunun sıkılık derecesine bağlı olarak farklılık gösterir. Fang vd. (2019), dolgunun sıkılık derecesinin esnek boruların mekanik davranışına etkisini uzunluğu 6 m ve çapı 0,8 m olan koruge HDPE boru için arazi deneyleri ile araştırmışlardır. Bu deneylerde geri dolgu malzemesi borunun farklı bölgelerinde farklı sıkılıklarda yerleştirilmiştir (Şekil 1.7).



Şekil 1. 7 Arazi deneyleri için detaylar a) kurulum aşaması b) yükleme aşaması
(Fang vd., 2019)

Fang vd. (2019) yapılan deneyler sonucunda, geri dolgu malzemesinin boru kalça bölgesi (haunch) altındaki sıkılık derecesinin borunun deformasyonu üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu, iyi sıkıştırılmış bir dolgu içerisinde yer alan esnek borudaki en kritik bölgenin yatay simetri eksenini olduğunu, boru etrafındaki zeminin gevşek olması durumunda en belirgin değişikliğin taç ve taban bölgelerinde meydana geldiğini ve borunun gevşek dolguya olan tepkisinin gevşek bölgenin boyutunun yanı sıra o bölgenin konumunun da önemli olduğunu belirtmişlerdir.

McGrath vd. (1999), kurulum aşaması için geri dolgu malzemesinin boru davranışına olan etkilerini farklı çaplardaki rijit ve esnek borular, hendek genişliği, dolgu sıkıştırma yöntemi ve sıkıştırma derecelerini dikkate alarak laboratuvar ve tam ölçekli saha deneyleri ile incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, dolgu sıkılığındaki nispeten küçük farklılıkların dolgu rijitliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, dolgunun mekanik parametrelerini değiştirdiğini ve boruların davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir.

Gassman vd. (2005), karayolu projelerinde drenaj uygulamalarında kullanılan HDPE borular için kurulum prosedürlerinin boru performansına etkisini Güney Carolina'daki 45 HDPE boru hattı için incelemişlerdir. Bu çalışmada da boru çap değişimleri Motahari ve Abolmaali (2010)'nin yaptığı gibi video kameralar ile kaydedilmiştir. Bu incelemeler sonucunda yetersiz yatak zemininin varlığı, uygun olmayan dolgu malzemesi ve yetersiz örtü yükü kalınlığından dolayı boruların %20'sinde boru çap değişimleri %5'ten büyük, %18'sinde çevresel çatlaklar, %20'sinde bölgesel eğilmeler ve %7'sinde ise delinmeler tespit edilmiştir. Kurulum aşamasındaki hataların aşırı deformasyonlara ve yapısal hasarların oluşmasına neden olduğu ve uygun kurulum prosedürlerinin boru performansı için oldukça önemli olduğu ifade edilmiştir.

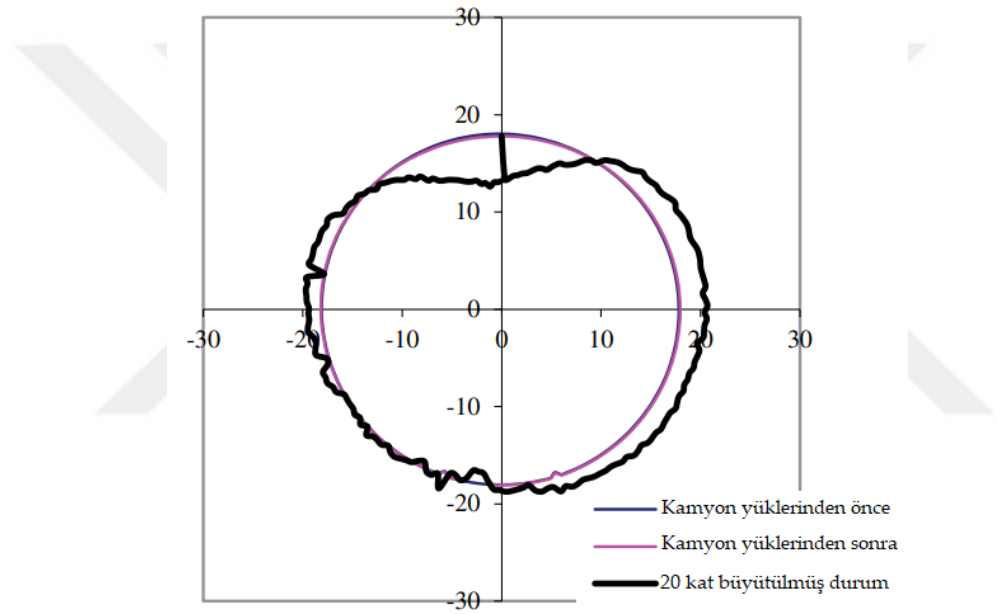
Chaallal vd. (2015), farklı boru çaplarına sahip sığ gömülü HDPE, PVC ve metal boruların farklı gömülme derinliklerindeki kısa süreli performanslarını belirlemek ve yerinde alınan ölçümler ile AASHTO tasarım kriterlerini kontrol etmek amacıyla arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Arazi koşullarında sığ gömülü esnek boru için yükleme koşulları
(Chaallal vd., 2015)

Sığ gömülü boru sistemlerine etki eden trafik yüklerini temsil etmek için kullanılan damperli kamyon yükleri altındaki boru çap değişimleri ve boru duvarlarında meydana gelen gerilmeler kurulum aşamasından itibaren ölçülmüştür. Yapılan

çalışmalarda, boru-zemin arasında meydana gelen sũrtũnme ve kayma dũzlemlerine bağlı olarak yatay simetri eksenini ve taē bũlgelerindeki gerilme oranları farklılık gũstermiřtir. Ȗzellikle gũmũlme derinliği $0,5D$ 'den kũēũk olan deneyler yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin taē bũlgesindeki dũřey gerilmelerden daha kũēũk olduğunu; fakat $1D$ ve $2D$ gũmũlme derinliğine sahip deneylerde bu oranın 1'den daha bũyũk olduğunu gũstermiřtir. Farklı gũmũlme derinlikleri iēin alınan gerilme Ȗlēũmleri yatay simetri eksenindeki yatay ve dũřey zemin gerilme oranlarının, sıkıştırılmış kohezyonsuz granũler dolgular iēin genellikle $0,87-1,74$ aralığında değiştiğini ve boru deformasyon formunun şekil 1.9'da gũrũldũėũ gibi kalp şeklini aldığını ifade etmişlerdir (Chaallal vd., 2015).



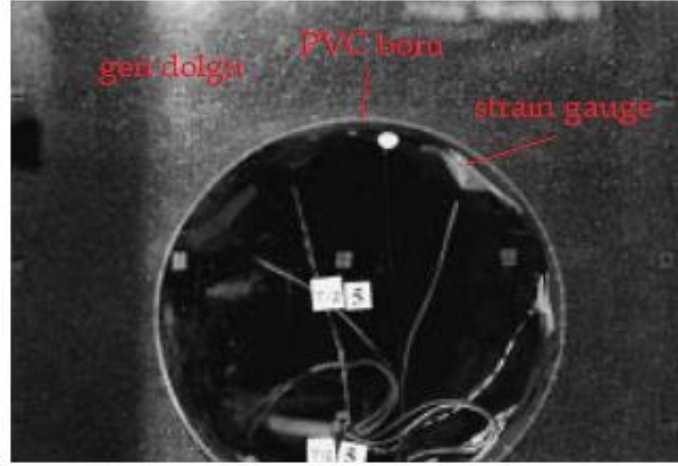
şekil 1. 9 Hareketli kamyon yũklerine maruz kalan ve deforme olan boru kesiti (Chaallal vd., 2015)

Farklı yũklemlere maruz kalan sığ gũmũlũ esnek borularda boruya etkiyecek gerilmeleri ve boru ēap değişimlerini en az indirgeyen, boruyu ēevreleyen geri dolgu malzemesinden maksimum zemin desteğini sağlayan ve boru davranışında Ȗnemli bir etki oluşturan Ȗrtũ yũkũ kalınlığı farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Watkins ve Reeve, 1982; Lohnes vd., 1997; Faragher vd., 2000; Sargand vd., 2002; Kang vd., 2013; Naeini vd., 2016; Fang vd., 2020). Lohnes vd. (1997), borulara yeterli zemin desteğini sağlamak iēin yaptıkları arazi deneylerinde gũmũlũ boru sisteminin nihai mukavemetinin dolgu sıkıştırma derecesinin artmasıyla doğrusal olarak arttığı belirtilmiş ve aynı ēalıřma iēin gerēekleřtirilen sayısal analizlerde minimum 305 mm (12 inē) Ȗrtũ yũkũ

kalınlığının kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Önerilen bu minimum örtü kalınlığı, Watkins ve Reeve (1982) tarafından önerilen değer ile aynıdır. Faragher vd. (2000), tekrarlı kamyon yükü altında 610 mm çapına sahip HDPE boru davranışını incelemek için 1 m örtü yükü ve 1000 tekrarlı yükleme için boru davranışını araştırmışlardır. Çalışmalarda ilk yükleme döngüleri sırasında boru düşey deformasyonunun hızlı bir şekilde arttığı ve tekrarlı yüklemeler sonucunda deformasyonların önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Kang vd. (2013), örtü yükü kalınlığının ve kamyon yüklerinin gömülü HDPE ve PVC boruların performansı üzerindeki etkisini 305 mm ve 1524 mm aralığında değişen boru çapları ve farklı örtü yükü kalınlıkları için arazi deneylerini referans alarak sayısal analizlerle araştırmışlardır. Boru kesitindeki kritik deformasyon ve gerilme değerleri belirlenirken minimum örtü yükü kalınlığının gözetilerek kontrol edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Naeini vd. (2016), gömülü borularda fay hareketleri sonucu meydana gelecek deformasyon ve şekil değiştirmeler üzerinde geri dolgu ve boru özelliklerinin etkisini 3D sonlu elemanlar analizleri ile araştırmışlardır. Analizler geri dolgu özelliklerinin ve boru gömülme derinliğinin, boru deformasyonlarını belirleyen önemli iki parametre olduğunu göstermiştir. Fang vd. (2020), dolgu sıkışma özelliklerinin, boru özelliklerinin ve trafik yüklerinin boru performansına etkisini arazi ve sayısal analizlerle incelemişlerdir. Borunun gömülme derinliğindeki artış, zemin gerilmelerinden dolayı borudaki deformasyonları artırmasına rağmen trafik yüklerinin etkisini azaltmıştır. Gömülme derinliği arttıkça, trafik yüklerinin boru üzerindeki etkilerinin oldukça sınırlı olmasına rağmen boruya yakın bölgelerde gevşek dolgu varlığı, trafik yüklerinin etkisini artırmıştır (Fang vd., 2020).

Boru ve geri dolgu arasında efektif bir etkileşim için yatak ve boru etrafındaki geri dolgunun uniform serilmesi ve sıkıştırılması gerekir. Bu etkileşim dolgudan boruya sağlanacak zemin desteğinin etkisini artırarak borudaki aşırı deformasyonları azaltır. Rogers vd. (1996), 250 mm çapa sahip PVC boru kullanarak geri dolgu malzemenin farklı sıkılık değerleri için laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler sırasında boru kesiti boyunca deney sisteminde görüntüler alınarak kurulum ve sonrasındaki değişimler Şekil 1.10'da görüldüğü gibi kaydedilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, görüntü işleme yöntemleri ile elde edilen boru deformasyonları ile gerinim ölçerlerden (strain gauge) alınan ölçümlerin uyumlu

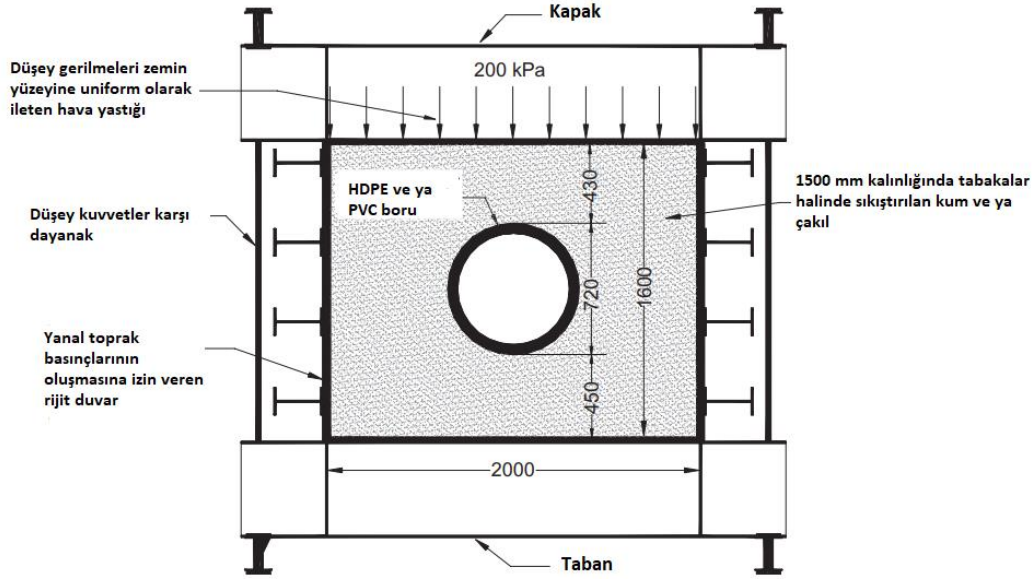
olduğu görülmüştür. Ayrıca kurulum prosedürlerinin boru performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri olduğunu ve borunun kalça bölgesindeki (haunch) gevşek geri dolgunun varlığının zeminden boruya aktarılacak desteğin ortadan kalkmasına neden olacağını ifade etmişlerdir.



Şekil 1. 10 Deneyler için boru ve geri dolgudan alınan görüntülerden bir kesit
(Rogers vd., 1996)

Coombs ve Pluimer (2010), raylı sistemler altında kullanılan HDPE boruların hareketli yüklemeler altındaki performansını arazi deneyleri ile incelemişlerdir. Deneyler sırasında tekrarlı dinamik yüklemeler altında boru kesiti içerisinde alınan video görüntüleri ve dinamik yüklemeler altında ölçüm alabilen strain gauge ölçümleri dikkate alındığında, gömülü boru sisteminde elastik deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Drenaj koşullarının sağlandığı durumda raylı sistemlerin altında koruge HDPE boruların kullanılabileceği ve oldukça iyi performans sergilediği ifade edilmiştir.

Brachman vd. (2008), 600 mm çaplı termoplastik koruge HDPE ve PVC borular için geri dolgunun ve farklı sıkıştırma tekniklerinin boru deformasyon özelliklerine etkisini, uniform yayılı yüklemeler altında deneysel çalışmalarla incelemişlerdir. Derin gömülü boru sistemleri için boruya etkiyen gerilmeleri temsil eden Şekil 1.11'deki deney sisteminde kötü derecelenmiş kum (SP) ve iyi derecelenmiş çakıl (GW) kullanılarak 6 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında uygulanan düşey gerilmeler kademeli olarak 200 kPa'ya kadar artırılmıştır.



Şekil 1.11 2 boyutlu gerilme durumu için deney sistemi (Brachman vd., 2008)

Yapılan deneyler, iyi derecelenmiş çakılın (GW) rijitliğinin kötü derecelenmiş kumun (SP) rijitliğinden daha büyük olduğu için GW'nin sıkıştırılması ile elde edilen boru deformasyonları ve boruya etkiyen gerilmeler SP'ye göre daha küçük ölçülmüştür. Fakat çakıl ile yapılan deneylerde bölgesel eğilme etkilerinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kötü derecelenmiş kumun elle, tokmakla, plakalı tokmak ile üç farklı yöntemle sıkıştırılmıştır. Belirlenen boru çap değişimleri ve şekil değiştirmeler kıyaslandığında en büyük etkiler elle serilip sıkıştırılan deneylerden; en küçük değerler ise plakalı tokmak kullanılarak sıkıştırılan deneylerden elde edilmiştir.

Scott vd. (2009), Şekil 1.11'deki deney sistemini referans alarak geri dolgu rijitliğinin boru çap değişimi, boruya etkiyen gerilmeler ve boru deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini ince daneli siltli kil ve iri daneli çakıl kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarda, GW siltli kile oranla boruya daha fazla zemin desteği sağladığı için boru çapındaki değişimler GW kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde daha düşük ölçülmüştür. Yani siltli kil zemin rijitliğinin düşük olması, boruya daha fazla yükün etkimesine ve boru çap değişimlerinin daha büyük olmasına neden olmuştur.

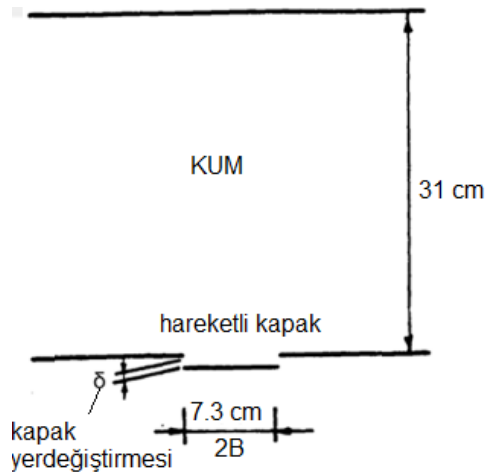
1.3 Kemerlenme

Kemerlenme, komşu zemin prizmasına göre daha fazla hareket eden merkez zemin prizmasının yükü veya gerilmeleri komşu zemin prizmasına aktarması olarak tanımlanmaktadır (Terzaghi, 1936; 1943). Yani kemerlenmenin oluşabilmesi için merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasında göreceli yerdeğiştirmenin olması gerekir. Gömülü boru sistemlerinin temel iki bileşeni olan boru ve dolgunun rijitliklerinin farklı olması, boru üzerinde yer alan zemin prizması ile komşu zemin prizmaları arasında görece bir hareket meydana getirir. Bu göreceli hareketin yönü ve büyüklüğü boru üzerine etkiyen düşey yükün büyüklüğünü kayda değer şekilde değiştirir.

Kemerlenme teorisini açıklayan ve en çok bilinen üç teori; Janssen Silo Teorisi, Marston Yük Teorisi ve Terzaghi Kemerlenme Teorisi' dir (Janssen, 1895; Marston ve Anderson, 1913; Terzaghi, 1943). Bu tez çalışması kapsamında Terzaghi Kemerlenme Teorisi hakkında detaylı bilgi verilip Janssen Silo Teorisi ile Marston Yük Teorisi detaylandırılmamıştır

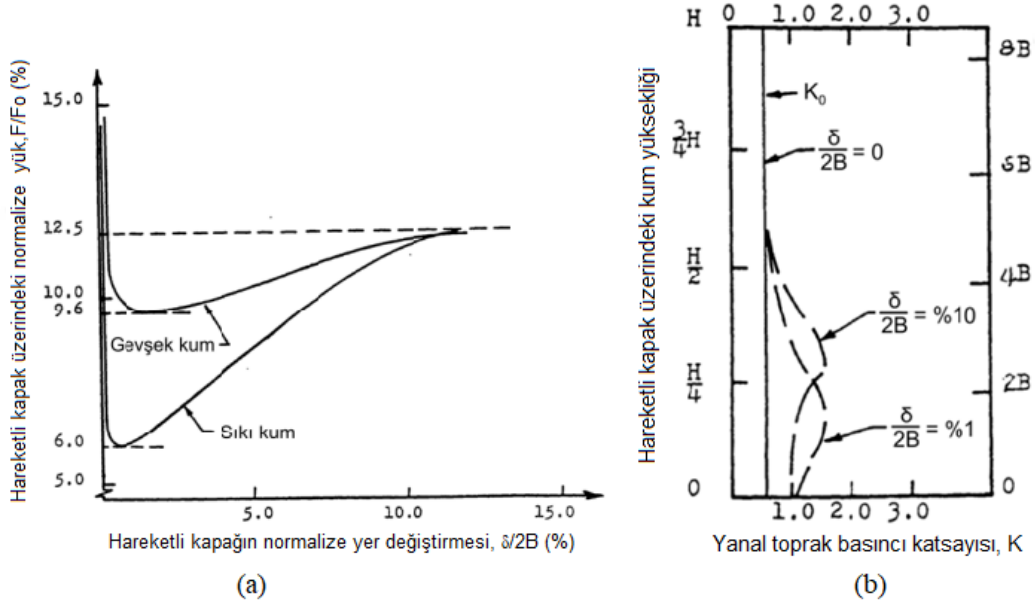
1.3.1 Terzaghi Kemerlenme Teorisi

Terzaghi (1936, 1943), alt tarafında hareket edebilen bir kapağın yer aldığı bir kutu içerisinde kum kullanarak zemin kemerlenme etkisini araştırmıştır. Deneylerde eni 7,3 cm ve boyu 46,3 cm olan hareketli kapağın kademeli olarak aşağı yöndeki yer değiştirmesi ve bu yer değiştirmeler için kapağın üstüne etki eden düşey yük değeri belirlenmiştir. Trapdoor olarak adlandırılan bu deney sisteminin kesiti ve boyutları Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 12 Kemerlenme teorisi için trapdoor deney sistemi (Terzaghi, 1936)

Özellikle hareketli kapağın aşağı yönde hareketi sonucu kapağın üzerindeki yük hızlı bir şekilde azalmış ve düşey yer değiştirmenin kapak genişliğinin yaklaşık %1'i olduğunda en düşük değere ulaşılmıştır. Ölçülen yük değerlerinin kapak düşey yer değiştirmesine bağlı olarak değişimi Şekil 1.13a'da sunulmuştur. Deneylerde kapak üzerine ve zemin içerisindeki farklı noktalara yerleştirilen sürtünme bantları ile dolaylı olarak hesaplanan yatay ve düşey gerilmeler dikkate alınarak yanal toprak basıncı katsayısı (K) ve bunun derinlikle değişimi belirlenmiştir (Şekil 1.13b).

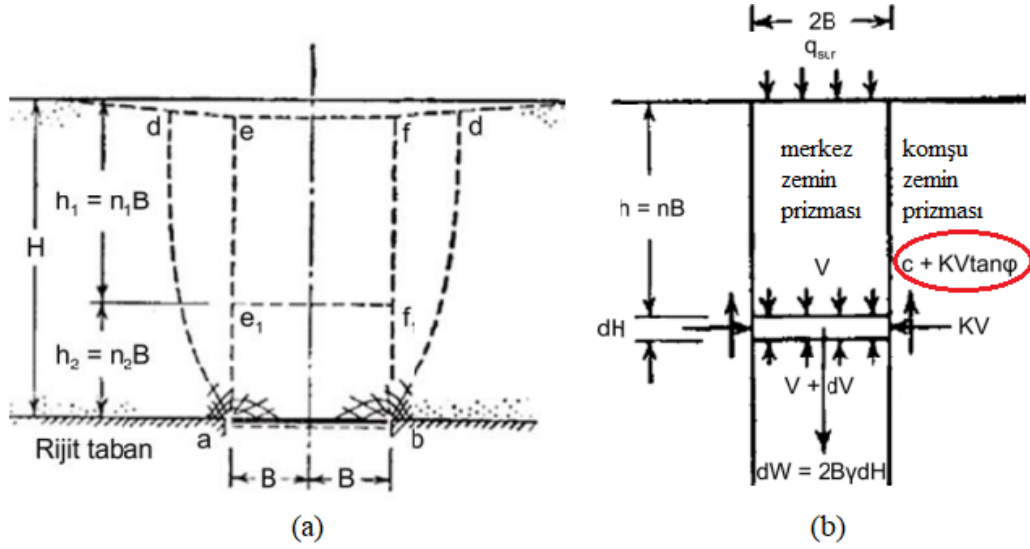


Şekil 1. 13 Trapdoor için elde edilen sonuçlar a) kapak üzerindeki yükün kapak yer değiştirmesine bağlı değişimi b) K'nin derinlikle değişimi (Terzaghi, 1936)

Şekil 1.13b'de görüldüğü gibi kapak genişliğinin yaklaşık 2,5 katı (5B) düşey mesafede yanal toprak basıncı katsayısı sukunetteki değere (K_0) kavuşmaktadır. Başka bir deyişle, belirtilen bu mesafeden sonra düşey gerilmeler kapak hareketinden etkilenmemektedir.

Terezaghi (1936, 1943), deneylerden elde ettiği ölçümler ve gözlemlerinden yola çıkarak düzlem şekil değiştirme kabulü ile kemerlenme mekanizmasını detaylandırmıştır. Şekil 1.14a'da hareketli ab parçası için düşey yer değiştirme değeri sıfır olduğunda, kapağa etkiyen düşey gerilmeler uniform ve kumun birim hacim ağırlığı ile kapak genişliğinin çarpımına eşittir. Hareketli ab parçasının aşağı yönde hareketi sonucu kapak üstündeki kum da kapak ile birlikte hareket eder. Bu durumda hareket eden kütle ile komşu zemin kütlesi arasında kayma düzlemleri gelişir. Kapak üzerindeki yük değeri, bu kayma düzlemlerindeki sürtünme

direncinin düşey bileşeni kadar azalırken, komşu zemin prizmasında aynı miktarda artış gösterir.



Şekil 1.14 Kumun aşağı yöndeki hareketi ve kemerlenme a) deney sisteminin genel görünümü b) kum hareketine göre gelişen yük dağılımları (Terzaghi, 1943)

Terzaghi (1936, 1943), hareketli kapağın aşağı yöndeki hareketi sonucu meydana gelen kayma düzlemlerinin düşey doğrultuda meydana geldiğini kabul ederek kemerlenme teorisini geliştirmiştir. Bu teoride Şekil 14a'daki ae ve bf düşey düzlemleri kayma düzlemleri olarak kabul edilmiş ve ab parçası üzerindeki düşey yük değeri, kayma yüzeyleri arasında kalan kum ağırlığı ile kayma yüzeyleri boyunca gelişen kayma direncinin farkına eşit olduğu kabul edilmiştir. Hareketli ab parçası üzerinde yer alan ve ab parçası ile birlikte aşağı yönde hareket eden bir zemin diliminin hareketi ve bu zemin dilimine etkiyen gerilmelerin hesabı Şekil 1.14b'de detaylandırılmıştır.

Şekil 1.15b'deki mekanizmada yer alan bileşenler aşağıda ifade edilmiştir;

- $V + dV$: Dilimin altındaki düşey gerilme
- h : Dilim üstündeki zemin kalınlığı
- K : Yanal toprak basıncı katsayısı
- γ : Zeminin birim hacim ağırlığı
- V : Dilim üstüne etkiyen düşey gerilme
- KV : Dilim yanlarındaki yatay gerilme
- $c + \sigma_n \tan(\phi)$: Dilim yanlarındaki kayma gerilmesi
- c : Kohezyon
- ϕ : İçsel sürtünme açısı
- q_{sur} : Sürşarj gerilmesi
- $2B$: Dilim genişliği
- dH : Dilim kalınlığı
- $dW = 2B \cdot \gamma \cdot dH$: Dilim ağırlığı

Şekil 1.14b'deki dH kalınlığındaki yüklerin dengesi Eşitlik 1.1'de ifade edilmiştir.

$$2B\gamma dH = 2B(V + dV) - 2BV + 2c dH + 2KVdH\tan(\phi) \quad (1.1)$$

Önerilen teoride zemin içerisindeki her nokta için yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı (σ_h/σ_v) K'ye eşit olduğu kabul edilmiştir. Eşitlik 1.1'deki denklemin diferansiyel olarak karşılığı Eşitlik 1.2'de ifade edilmiştir.

$$dH = \frac{dV}{\gamma - \frac{c}{B} - KV \frac{\tan(\phi)}{B}} \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.2'deki diferansiyel denklem $z=0$ ve $h=q_{sür}$ için çözüldüğünde Eşitlik 1.3 elde edilir.

$$V = \frac{B\left(\gamma - \frac{c}{B}\right)}{K\tan(\phi)} (1 - e^{-K\tan(\phi)h/B}) + q_{sür}e^{-K\tan(\phi)h/B} \quad (1.3)$$

Eşitlik 1.3, kohezyonsuz bir zemin için uygulandığında Eşitlik 1.4; kohezyonsuz ve sürşarj yükü olmayan bir zemine uygulandığında ise Eşitlik 1.5 elde edilir.

$$V = \frac{B\gamma}{K\tan(\phi)} (1 - e^{-K\tan(\phi)h/B}) + q_{sür}e^{-K\tan(\phi)h/B} \quad (1.4)$$

$$V = \frac{B\gamma}{K\tan(\phi)} (1 - e^{-K\tan(\phi)h/B}) \quad (1.5)$$

Terzaghi (1936, 1943), kemerlenmenin hareketli parça genişliğinin 2,5 katı bir mesafede ($5B$) oluştuğunu belirtmiştir. Şekil 1.14(a)'da hareketli ab parçası üzerindeki zemin kalınlığı ab parçasının yarı uzunluğu (B) ile ilişkilendirilirse ($h=nB$) Eşitlik 1.6 elde edilir.

$$V = \frac{B\gamma}{K\tan(\phi)} (1 - e^{-K\tan(\phi)n}) \quad (1.6)$$

$5B$ mesafede etkili olan Terzaghi kemerlenme teorisi için Şekil 1.14 dikkate alındığında, kayma direncinin yalnızca ae_1 ve bf_1 yüzeyleri boyunca var olduğunu ve ee_1f_1f prizmasının e_1abf_1 prizması üzerine bir sürşarj gibi etki ettiği varsayılmıştır. Dolayısıyla $h_1=n_1B$ sürşarj olarak dikkate alınan zeminin kalınlığı; $h_2=n_2B$ kayma direncinin etkili olduğu zemin kalınlığıdır. Dolayısıyla $q_{sür} = \gamma Bn_1$ olacak şekilde Eşitlik 1.4 düzenlenirse Eşitlik 1.7 elde edilir.

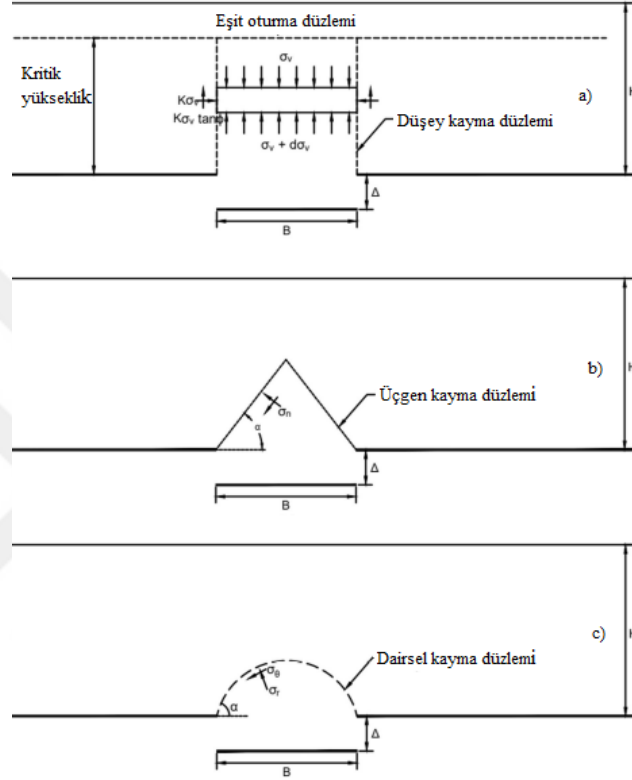
$$V = \frac{By}{K \tan(\phi)} (1 - e^{-Kn_2 \tan(\phi)}) + \gamma B n_1 e^{-Kn_2 \tan(\phi)} \quad (1.7)$$

Sürtünme direncinin meydana geldiği zemin kalınlığı çok büyük olursa yani $h_2 = n_2 B$ eşitliğindeki n_2 çok büyük olursa, hareketli ab kapağı üzerinde yer alan zemin kalınlığının kemerlenmeye etkisi olmaz. Yani kemerlenme sürşarjdan etkilenmez ve nihai durumda Eşitlik 1.8 elde edilir.

$$V = \frac{By}{K \tan(\phi)} \quad (1.8)$$

Güncel literatür çalışmaları incelendiğinde gömülü menfez, tünel, istinat duvarları, temeller, kazıklı dolgular vb. geoteknik yapılarda farklı kabuller için kemerlenmenin oluşumu, aşamaları, formu ve sınırlarını inceleyen farklı çalışmalar mevcuttur (Ladanyi ve Hoyaux, 1969; Evans, 1983; Costa vd., 2009; Chevalier vd., 2012; Iglesia vd., 2014; Chen vd., 2015; Zhang vd., 2016; Chen vd., 2018; Al-Naddaf vd., 2019; Lin vd., 2022; George ve Dasaka, 2023). Kemerlenmenin meydana geldiği kritik yükseklik dikkate alındığında, kemerlenmenin formu için genellikle 3 görüş ileri sürülmüştür (Şekil 1.15). Şekil 1.15a'daki model Terzaghi (1943) tarafından önerilmiş olup, burada yükün kritik bir yüksekliğe kadar düşey kayma düzlemleri üzerinden aktarıldığı varsayılmaktadır. Kritik yükseklik, kapak hareketinden bağımsız olarak oturmanın her yerde eşit olduğu bir düzlemin yüksekliği olarak da açıklanmaktadır. Kayma düzlemlerinin üçgen şeklinde olduğunu kabul eden bazı araştırmacıların kemerlenme modeli Şekil 1.15b'de detaylandırılmıştır (Carlsson, 1987; Chen vd., 2015, Chevalier vd., 2012; Evans, 1983, Guido, 1987; Hello ve Villard, 2009; IREX, 2012; Oiseth, 2002; Rogbeck, 1998). Fakat üçgen şeklindeki kayma düzlemlerinin eğimi (α), farklı varsayımlar ve yaklaşımlardan dolayı araştırmacılar arasında farklılık göstermektedir. Örneğin Carlsson (1987) ve Rogbeck vd. (1998) 75° , Guido vd. (1987) 45° , IREX (2012) 90° ; Oiseth vd. (2002) 68° ile 74° arasında değişen bir eğim açısını önermişlerdir. Özellikle görüntü işleme tekniklerinin gelişmesi ile Şekil 1.15c'de gösterilen ve parabolik veya yarı dairesel kayma düzlemlerinden oluşan kemerlenme modeli en fazla araştırılan modeldir. Parabolik kemerlenme modeli ilk olarak Engesser (1882) tarafından önerilmiş ve Iglesia vd. (2014) tarafından daha da geliştirilmiştir. Buna ek olarak Hewlett ve Randolph (1998) tarafından 2 boyutlu trapdoor için yarım küre ve dairesel kemerlenme modeli de önerilmiştir.

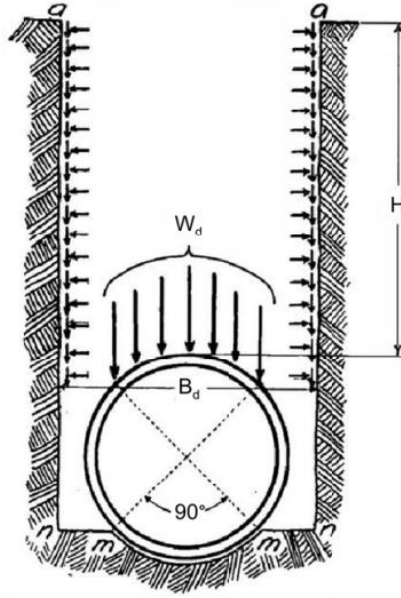
Trapdoor deney düzeneğinde kemerlenme modeli için gerçekleştirilen tam ölçekli laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlere dayanan farklı çalışmalarda, kemerlenmeye bağlı olarak meydana gelen gerilme dağılımındaki değişim ve gerilmelerin yönelimi farklı araştırmacılar tarafından araştırılmıştır (Van Eekelen vd., 2013; Villard vd., 2016; Burke ve Elshafie, 2020a; Burke ve Elshafie, 2020a; George ve Dasaka, 2020; ; Li vd. 2022).



Şekil 1. 15 Farklı kemerlenme modelleri a) düşey düzlemler b) üçgen c) parabol

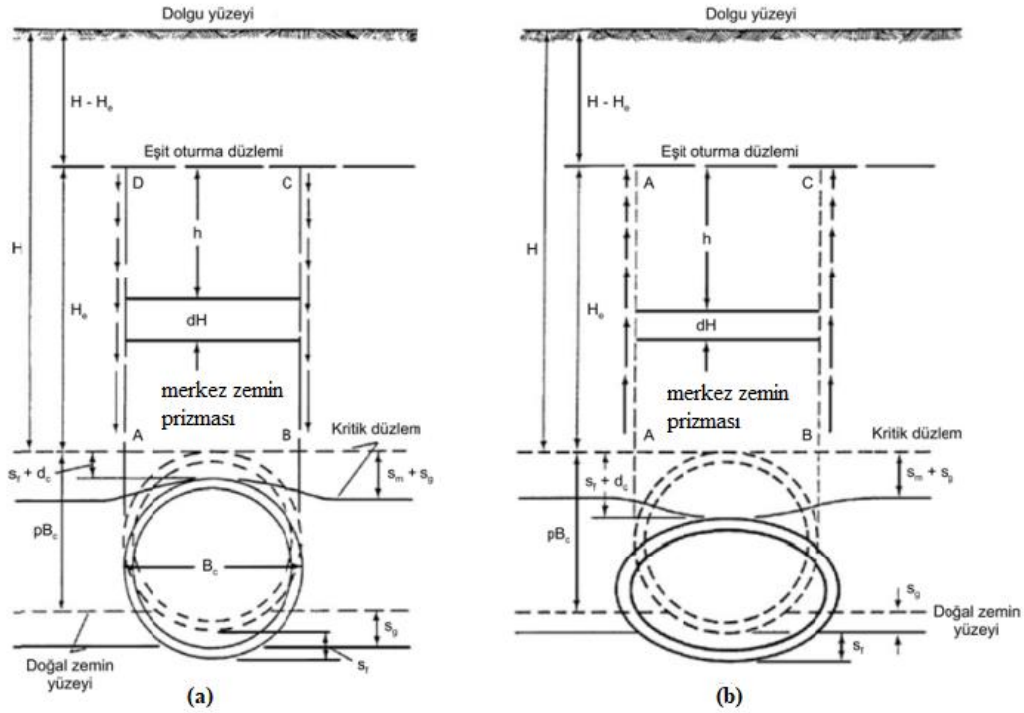
1.3.2 Gömülü Boru Sistemlerinde Kemerlenme Etkisi

Marston ve Anderson (1913), doğal zeminde kazılmış hendek içerisine yerleştirilen rijit bir boru üzerindeki yükün dağılımını Şekil 1.16'da göstermiştir. Geri dolgu malzemesinin hendek duvarlarına uyguladığı yanal itkinin kayma gerilmelerine neden olduğunu belirtmiş ve geri dolgu malzemesinde meydana gelen oturmanın hendek duvarlarında kayma gerilmelerinin oluşması için yeterli olduğunu kabul etmişlerdir. Bu varsayımları dikkate alarak geliştirilen Marston Yük Teorisinde, geri dolgu malzemesinin kohezyonu ihmal edilerek boru üzerine etkiyen en büyük yükün hesaplanması sağlanmıştır.



Şekil 1. 16 Hendek içerisindeki rijit bir boru için yükün dağılımı (Marston ve Anderson, 1913)

Marston (1930), menfez yapısının tepe noktası ile menfez yapısının dışındaki zemin arasındaki farklı oturmaların meydana gelmesini esas alarak kayma düzlemlerinin Terzaghi Kemerlenme Teorisi'nde olduğu gibi hareketli kapağın iki yanından yukarı doğru giden düşey düzlemler olduğunu kabul etmiştir (Şekil 1.17).



Şekil 1. 17 Pozitif projeksiyonlu borularda meydana gelen deformasyonlar a) rijit boru b) esnek boru (Moser ve Folkman, 2008)

Boru üzerinde yer alan merkez zemin prizması ile komşu zemin prizmasının göreceli oturmaları Marston (1930) tarafından oturma oranı (r_{sd}) olarak tanımlanmış ve teori bu oran üzerine kurgulanmıştır. Teorinin temel dayanağı Eşitlik 1.9'da ifade edilmiştir.

$$r_{sd} = \frac{(s_m - s_g) - (s_f - d_c)}{s_m} \quad (1.9)$$

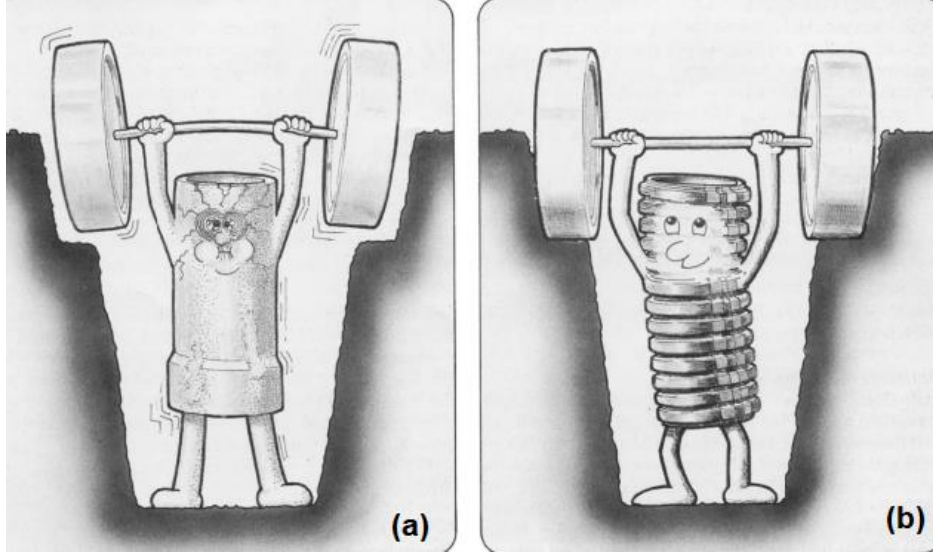
Eşitlik 1. 9 ve Şekil 1.17'de ifade edilen terimler;

- H: boru üzerindeki dolgunun yüksekliği
- s_f : borunun dolgu içerisindeki oturması
- d_c : borunun düşey esnemesi
- s_m : boru yanlarında yer alan zeminin oturması
- He: eşit oturma yüzeyi ile boru üst yüzeyi arasındaki yükseklik
- B_c: boru genişliği
- s_g : doğal zeminin oturması
- 2B: Dilim genişliği

Önerilen bu eşitlikte menfez yapısının tepesi ile menfez yapısı dışındaki zemin arasındaki farklı oturma, limit denge durumunda "kayan yüzey" ile sonuçlanmazsa, Marston'un toprak basıncı teorisini kullanmak gerçekçi olmayan sonuçlara neden olacaktır. Buna ek olarak Spangler (1950), Marston Yük Teorisini geliştirerek menfezin tepesindeki gerilmelerin hesaplanabilirliğini göstermiştir. Bu hesaplamalarda da kayma düzlemlerinin Şekil 1.17'de AD ve BC düzlemleri boyunca geliştiği kabul edilmiştir.

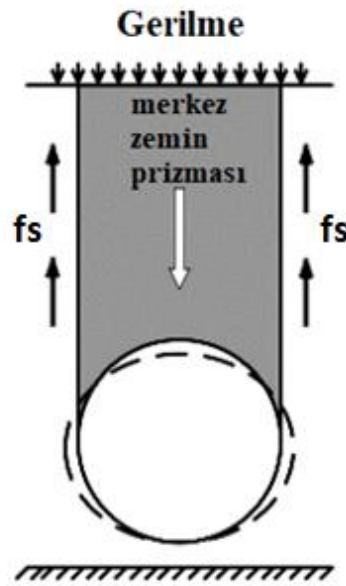
Gömülü boru/menfez yapıları yarı amprik yaklaşımlar (Marston, 1930; Spangler, 1950; Heger, 1988) veya sayısal analiz yöntemleri kullanılarak tasarlanabilmektedir. Özellikle sayısal analizlerde boru/menfez geometrisi, zemin özellikleri, sıkıştırma aşamaları ve kurulum prosedürleri yarı amprik yaklaşımlardan daha kapsamlı ele alınır. Yarı amprik tasarım yöntemi olmasına rağmen Heger gerilme dağılımı yöntemi, bir menfezin kurulum aşamasından itibaren kurulumla dair her bir sayfaya ait gerilme dağılımını hesaplamada oldukça başarılıdır (Allard ve El Naggar, 2015).

Gömülü boru sistemlerine etki eden zemin gerilmeleri ve trafik yükleri boru ve geri dolgu malzemesinin göreceli rijitlikleri ölçüsünde karşılanacağı Bölüm 1.1.1'de açıklanmıştır. Bundan dolayı rijitlikleri birbirinden farklı olan rijit ve esnek boruların yük taşıma mekanizmaları da farklılık gösterir (Şekil 1.18).



Şekil 1. 18 Rijit ve esnek boruların yük taşıma mekanizmaları a) rijit boru
b) esnek boru (Järvenkylä, 1989)

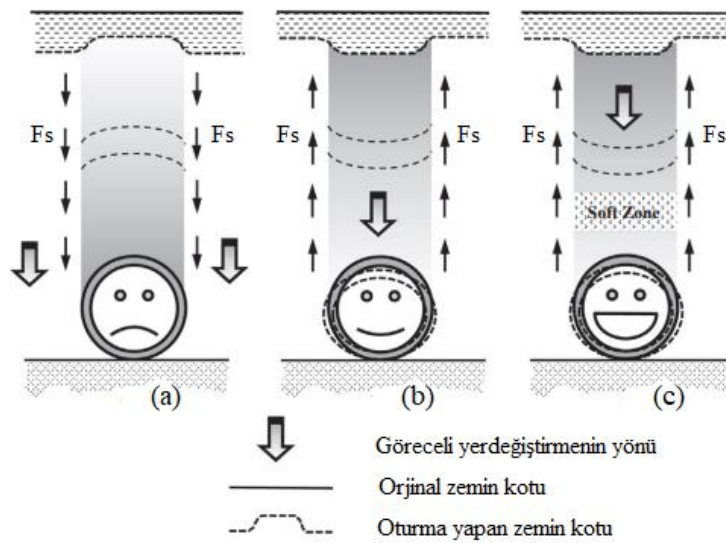
Gömülü bir boruya etki eden gerilmeleri azaltmak için zemindeki pozitif kemerlenme mekanizmasından faydalanılır. Farklı yüklemelere maruz kalan ve rijitliği dolguya göre daha düşük olan gömülü boru, çevresinde yer alan zeminden daha fazla düşey yerdeğiştirir. Bu durumda, boru üstünde yer alan merkez zemin prizması, boru ile birlikte aşağı yönde hareket eder. Aşağı yönde hareket eden merkez zemin prizması, komşu zemin prizması ile etkileşim halinde olup taşıması gereken yükün bir kısmını düşey düzlemlerde meydana gelen kayma gerilmeleri ile boru yanlarında yer alan dolguya aktarmaktadır (Şekil 1.19).



Şekil 1. 19 Gömülü bir boru için kemerlenme mekanizması (Fang vd., 2020)

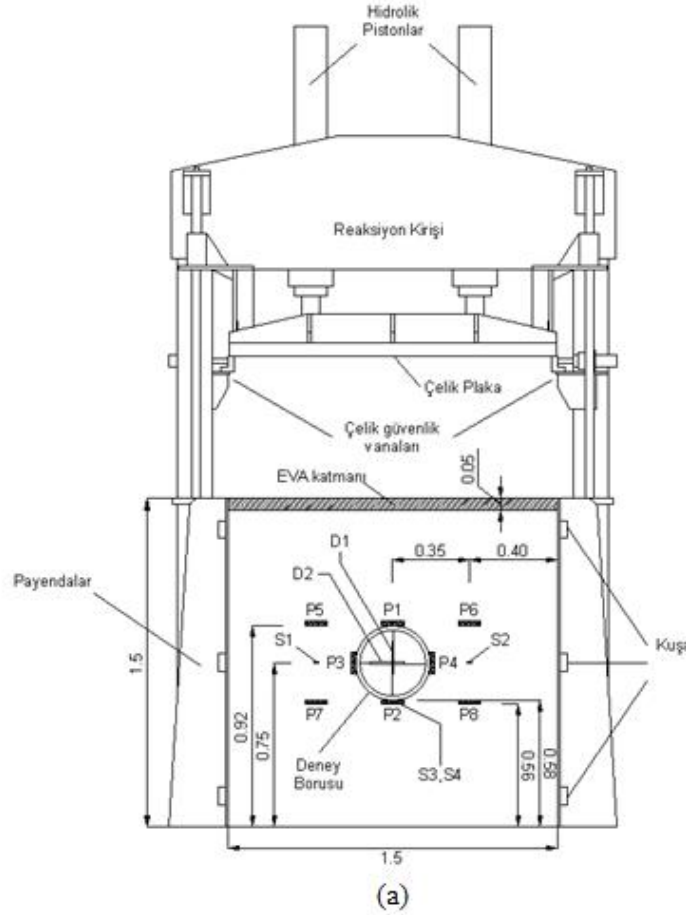
Nihai durumda boruya etki edecek gerilmeler azalır ve bu durum pozitif kemerlenme olarak adlandırılır. Meydana gelen bu mekanizmada, merkez zemin prizmasından komşu zemin prizmasına aktarılan gerilmeler temsilen " f_s " olarak gösterilmiştir. Özellikle son 100 yılda yapılan bilimsel çalışmalar, kemerlenme etkisini artırmak ve boru tarafından taşınan yük miktarını azaltmak için boru tepe noktasında ve çevresinde sıkışabilirliği yüksek malzemelerin (EPS, araba lastiği parçacıkları, saman balyası, tahta yongası, hızar tozu vb.) kullanılabilirliğini göstermiştir (Marston, 1930; Spangler, 1950; McAfee ve Valsangkar, 2004; Parker vd., 2008; Kang vd., 2008; Kang vd., 2009; Kang vd., 2019; Sun vd., 2009; Sun, 2011; Mequid vd., 2017; Meguid ve Ahmed 2020; Söylemez ,2017; Kılıç ve Akınay, 2019; Mahgoud ve El Naggat, 2020; Kefçi, 2020; Al- Naddaf vd., 2021).

Gömülü boru sistemlerinde meydana gelen kemerlenme için boru geri dolguyla oranla daha fazla düşey yerdeğiştirirse pozitif kemerlenme etkisi oluşur. Fakat gömülü rijit boru sistemlerinde, boru yanlarında yer alan komşu zemin prizması borudan daha fazla düşey yerdeğiştirir. Bu etki sonucunda komşu zemin prizması taşınması gereken yükün bir kısmını merkez zemin prizmasına aktarır ve rijit boru taşınması gereken yükten daha fazlasını taşımış olur. Negatif kemerlenme olarak tanımlanan bu durum Şekil 1.20a'da gösterilmiştir. Özellikle rijit borularda meydana gelen negatif kemerlenme etkisini ortadan kaldırmak ve pozitif kemerlenmeden faydalanmak için literatür çalışmalarında *soft zone* olarak tanımlanan sıkışabilirliği yüksek malzemelerden yararlanılmaktadır (Şekil 1.20c).



Şekil 1. 20 Gömülü boru sisteminde yük transferi a) rijit boru b) esnek boru c) borudan daha esnek bir malzemenin kullanılması (Kang vd., 2019)

Kılıç ve Akınay (2019), 300 mm çaplı koruge HDPE boru ve gevşek durumdaki kum için EPS'nin (expanded polystyren) farklı kullanım durumlarının boru davranışı üzerindeki etkisini tam ölçekli laboratuvar deneyleri ile incelemişlerdir (Şekil 1.21). Yapılan çalışmalarda Şekil 1.21b'de EPS'nin farklı kullanım durumları için boru taç bölgesinde boru çapı kadar genişlikte ve nominal çapının 1/6'sı kadar kalınlıkta tek EPS panelin kullanımı (deney 1) en ideal durum olarak belirlenmiştir.



Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5
Boru crown bölgesinde tek EPS panelin kullanılması	Boru invert bölgesinde tek EPS panelin kullanılması	Boru invert ve crown bölgelerinde tek EPS panelin kullanılması	Borunun belirli bölgelerinde EPS kullanımı	Boru çevresinde EPS kullanımı

(b)

Şekil 1. 21 Tam ölçekli deney sistemi ve deneylere ait detaylar a) ensrumantasyon detayları b) EPS kullanım durumları (Kılıç ve Akınay, 2019)

Önerilen bu durum için boru ta bölgesindeki düşey gerilmelerin %76, yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin %65, boru düşey ve yatay boru çap değişimlerini ise sırasıyla % 87 ve % 60 azaldığı ifade edilmiştir.

Mahgoud ve El Naggar (2020), sığ gömülü esnek borular için trafik yüklerinin boruya olan etkilerini azaltmak için atık madde sınıfında yer alan ve sıkışabilirliği yüksek olan araba lastiği atıklarının (TDA; **tire-derived aggregate**) yumuşak bölge olarak kullanımını tam ölçekli laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerle araştırmışlardır (Şekil 1.22). Bu çalışmada en ideal TDA kullanımını belirlemek için ensrumantasyonu yapılan 600 mm çaplı koruge elik boru etrafında TDA Şekil 1.21b'ye benzer konumlarda kullanılmıştır.

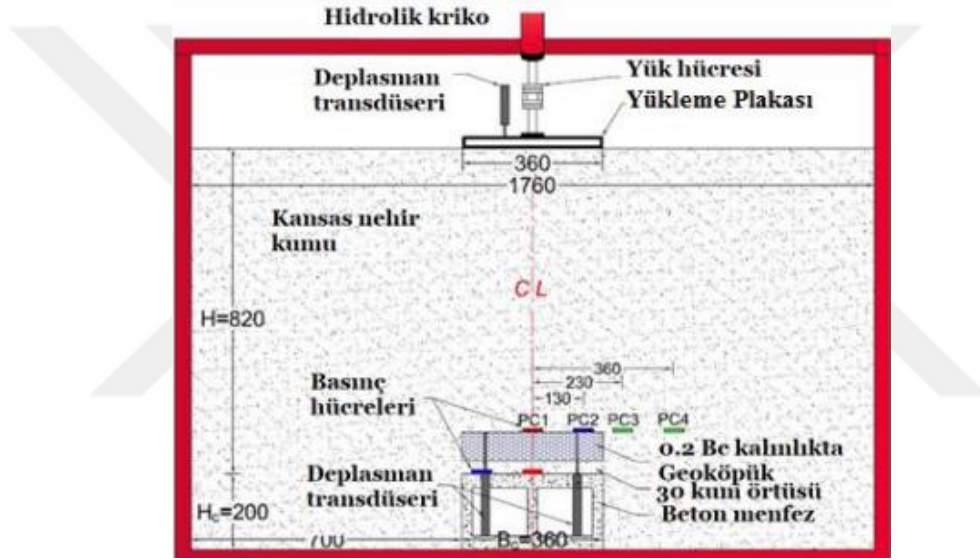


Şekil 1. 22 Deneylere ait detaylar a) model deney sistemi b) deney kurulum aşaması c) bölgesel yükleme plakası (Mahgoud ve El Naggar, 2020)

Yapılan laboratuvar deneylerinin sayısal analizlerle doğrulanması ve yapılan parametrik çalışmalar, TDA'nın boru alt noktasında kullanımı dışındaki tüm durumlarda boru çap değişimlerinin %80 azaldığı, boru üzerinde bir TDA tabakası ve boru altında rijit bir kaplamanın kullanılması durumunda gerilmelerin boru üzerinde daha geniş bir alana dağıldığı ve TDA'nın üzerindeki üst tabakanın zımbalama göçmesini önleyerek boru performansını önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir. Gömülme derinliği 1D olduğunda ta bölgesinde ölçülen gerilme değerinin gömülme derinliği 1,5D için ölçülen değerin yaklaşık 2,4 katı oluken,

gömölme derinliği 3D'ye ulaşana kadar gerilmelerdeki azalma devam etmiştir. Özellikle yapılan sayısal analizler sonucunda boru etrafında TDA kullanmanın taç bölgesine etkiyen gerilmeleri ve boru çap değişimlerini önemli miktarda azaltmasına rağmen meydana gelen yüzey oturmalar TDA'sız duruma göre daha büyük hesaplanmıştır.

Al-Naddaf vd. (2021), bölgesel yüklemelere maruz kalan rijit beton menfezlerde meydana gelen negatif kemerlenme etkisini önlemek ve pozitif kemerlenme etkisinden faydalanmak için farklı kalınlık, genişlik ve konumlarda EPS kullanımını, boyutları 1,76 m * 0,46 m * 1,50 m olan küçük ölçekli menfez için laboratuvar ve Plaxis 3D analizleri ile incelemişlerdir (Şekil 1.23).

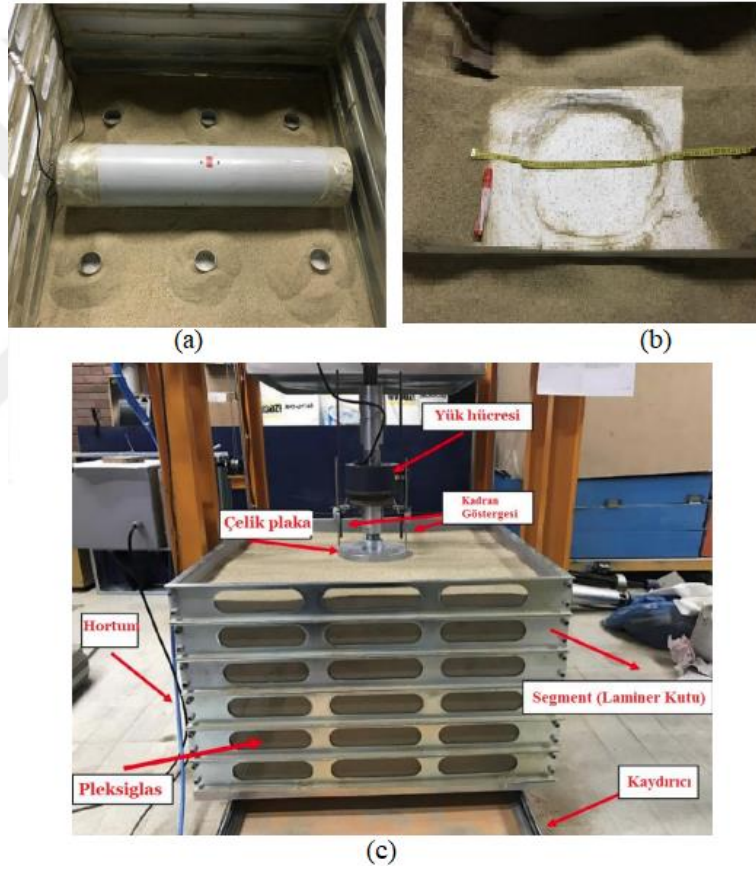


Şekil 1. 23 Deney ve analizlerde kullanılan menfez kesiti (Al-Naddaf vd., 2021)

Çalışmada, rijit menfezin tepe noktasında EPS'nin kullanımı sonucunda pozitif kemerlenmeden dolayı düşey gerilmelerde % 45' e varan azalmalar tespit edilmiştir. EPS genişliği, menfez tepe genişliğinden daha büyük olduğu durumda menfez tepe noktasında gerilmelerde az da olsa artış meydana gelmiş ve EPS'nin konumu menfez tepesinden ne kadar uzak olursa menfez tepesinde ölçülen gerilmelerin o ölçüde daha büyük olacağı ifade edilmiştir. *Genel görüşün aksine, daha ince EPS kullanımının daha iyi kemerlenme etkisi oluşturduğu belirtilmiştir.*

Söylemez (2017), sığ gömülü esnek PVC borularda EPS kullanımının boru performansına etkilerini EPS yoğunluğu, EPS kalınlığı, EPS'nin konumu ve genişliğini dikkate alarak laboratuvar deneyleri ile araştırmıştır. Bölgesel yükleme koşullarına maruz kalan ve boyutları 1 m x 1 m x 0,9 m olan deney tankında

kontrollü bir şekilde sıkıştırılan dolgu malzemesi, dış çapı 20 cm ve et kalınlığı 3,9 mm olan PVC boru ve EPS kullanımı da içeren deneyler gerçekleştirmiştir (Şekil 1.24). Deneylerde sadece yüzeysel oturmalar, boru yatay ve düşey çağ değişimleri dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Boru tepesinde kullanılan EPS Geofoamun genişliğindeki ve kalınlığındaki artış, boru tepesinde daha efektif bir kemerlenme oluşturarak boru çap değişimlerini azaltmıştır. Özellikle yoğunluğu daha yüksek olan EPS Geofoam, yüksek gerilme seviyelerinde boru performansına olumlu katkı sağlamaya devam etmiştir. Daha düşük gerilme seviyelerinde ise düşük yoğunluklu EPS Geofoamun kullanımı kemerlenmeyi daha etkin biçimde ortaya çıkararak borunun daha iyi performans sergilemesini sağlamıştır.

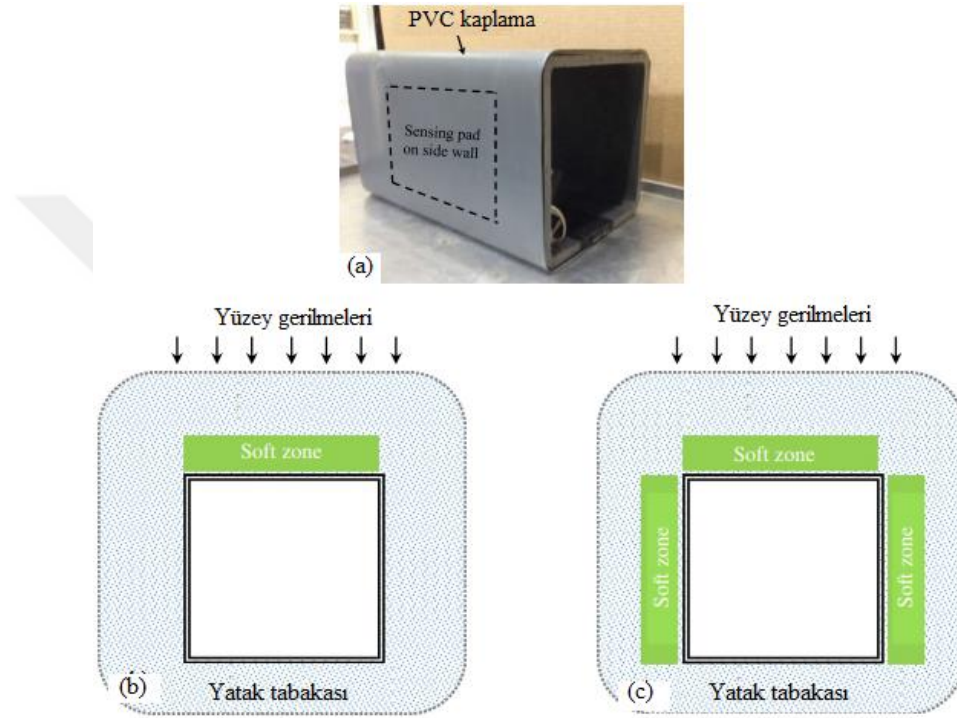


Şekil 1. 24 Deneylere ait detaylar a) kurulum aşaması b) yüklemeler altında EPS'nin deformasyonu c) yüklemeye hazır deney sistemi (Söylemez, 2017)

Boru tepesinde EPS'nin kullanılmasıyla artan kemerlenme etkisinin, uygulanan gerilmelerin büyüklüğü ve EPS Geofoamun aşırı deformasyonuna bağlı olarak ortadan kalkması, boruda aşırı deformasyonlara neden olmuştur. Özellikle kemerlenmenin ortadan kalkması ile meydana gelen boru çap değişimleri, EPS kullanımı olmadan meydana gelen boru çap değişimlerinden daha büyük

ölçülmüştür. Ayrıca alınan ölçümler EPS Geofoamun en efektif kullanım yerinin boru tepesi olduğunu göstermiştir (Söylemez, 2017).

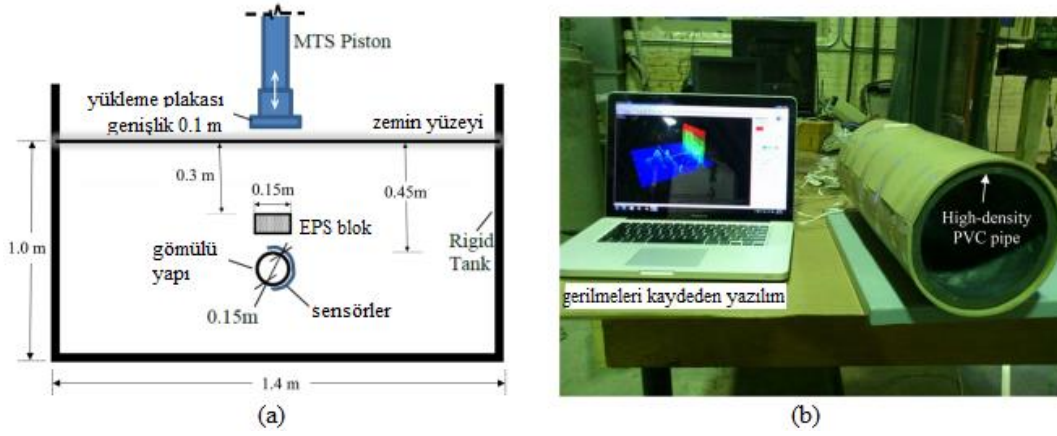
Meguid vd. (2017), boyutları 0,25 m x 0,25 m x 0,44 m olan gömülü rijit bir kutu etrafına EPS Geofoam kullanılması ile oluşan gerilme dağılımındaki değişimi, rijit yapı etrafında *PVC sensing pad* olarak adlandırılan özel gerilme ölçerler aracılığıyla laboratuvar deneyleri ve Abaqus 2D yazılımı ile sayısal analizlerle incelemiştir (Şekil 1.25).



Şekil 1. 25 Model kesitleri a) yumuşak bölge tepe noktasında b) yumuşak zone U kesitte c) deney kutusunun sensing pad ile sarılı durumu (Meguid vd., 2017)

Deneyler sonucunda kesit boyunca rijit kutuya etkiyen gerilmelerin uygulanan gerilmelere ve zamana bağlı değişimi PVC sensing pad ile uyumlu çalışan bilgisayar destekli yazılım ile belirlenmiştir. Çalışma sonucunda EPS malzeme kullanımı ile rijit kutunun üst noktasındaki gerilmelerde %64 ve yan duvarlarda %70'e varan azalmalar elde edilmiştir (Meguid vd., 2017).

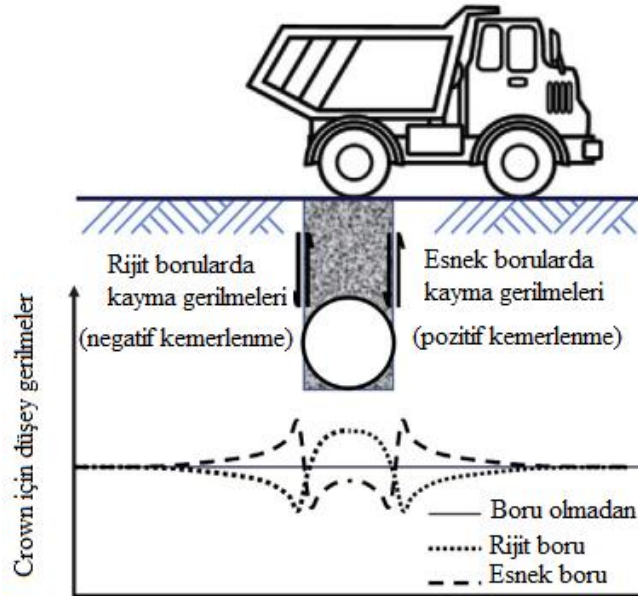
Meguid and Ahmed (2020), boyutları 1,4 m x 0,45 m x 1 m olan laboratuvar deney sisteminde tekrarlı yüklemeler altında EPS kullanımının PVC boru davranışına etkisini araştırmışlardır (Şekil 1.26). Kumlu çakıl kullanılarak yapılan deneylerde yükleme noktası ile EPS22 üst kotu arasındaki mesafe 30 cm (2D), EPS kalınlığı 7,5 cm (0,5D) ve yükleme plakasının boyutları 10 cm x 45 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. 26 Çalışmaya ait detaylar a) deney sistemine ait görsel b) boru ve gerilme ölçümleri için detaylar (Mequid and Ahmed, 2020)

Tekrarlı yüklemeler sonucunda $\sigma_{taç}$ bölgesindeki gerilmelerin EPS kullanımında 84 kPa dan 12 kPa'a (%86) azaldığı, boru yanlarındaki gerilme değişimlerinin az olduğu ve tekrarlı yüklemelere maruz kalan gömülü sığ esnek borularda boru çap değişimlerini azaltmak için EPS kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

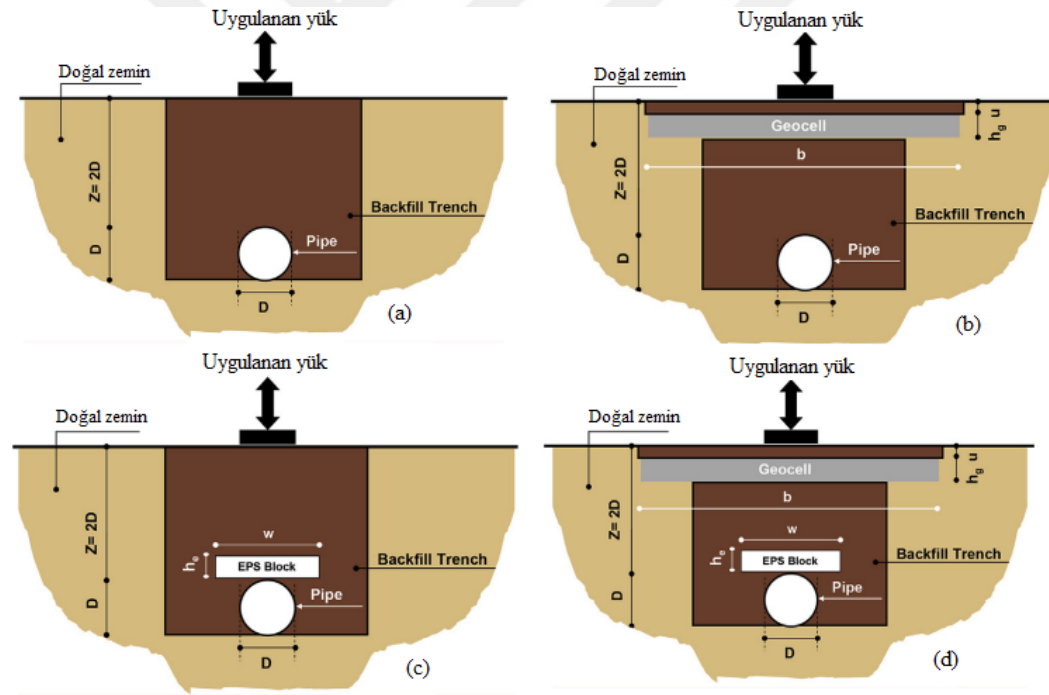
Gömülü esnek boru sistemlerinde, merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki farklı oturmalar, zemindeki kayma gerilmelerini harekete geçirerek kemerlenme mekanizmasının oluşmasını sağlar (Şekil 1.27).



Şekil 1. 27 Boru ve dolgunun göreceli oturmalarla göre boru tepesinde oluşan düşey gerilmelerin değişimi (Tafreshi vd., 2019)

Özellikle gömülü boru sistemlerindeki kemerlenme etkisini artırmak için kullanılan soft zone bölgesi daha büyük yüzeysel oturmalara ve üst yapının işlevselliğini yitirmesine neden olur. Başka bir deyişle trafik yüklerine maruz kalan sığ gömülü boruların performansı ve hizmet verebilirliği, meydana gelecek yüzeysel oturmalara, boru çap değişimleri, boruya etkiyen gerilmeler ve bu gerilmelerin dağılımına bağlıdır.

Farklı yapılarda meydana gelen aşırı oturmaları azaltmak için araştırmacılar tarafından alternatif yöntemler önerilmiştir (Madhavi ve Rajagopal, 2007; Tavakoli vd., 2012; Tanyu vd., 2013; Indraratna vd., 2015; Trung vd., 2016; Tavakoli vd., 2019; Tafreshi vd, 2019). Tafreshi vd. (2019), bölgesel yüklemeye maruz kalan sığ gömülü esnek borularda EPS Geofoamdan dolayı meydana gelen yüzeysel oturmaları azaltmak ve boru performansını artırmak için geosentetik hücrelerin (geocell) kullanılabilirliğini laboratuvar deneyleri ile incelemişlerdir (Şekil 1.28).



Şekil 1. 28 Deney aşamaları a) EPS olmadan b) geocell kullanımı c) EPS kullanımı d) EPS ve geocellin birlikte kullanımı (Tafreshi vd., 2019)

Çalışma sonucunda Şekil 1.29b'deki konumda geocell kullanmak, boru düşey çap değişimini, toplam yüzeysel oturmayı ve boru tepe noktasına etkiyen gerilmeyi Şekil 1.28a' ya göre sırasıyla % 27, %43 ve %25 azaltmıştır. Şekil 1.28c'de boru taç bölgesinde EPS Geofoam kullanımı toplam yüzeysel oturmayı artırırken, Şekil

1.28a ve Şekil 1.28b'ye göre boruya etkiyen gerilmeleri ve boru çap değişimlerini azaltmıştır. Şekil 1.28d'de EPS ve geocellin birlikte kullanılması, toplam yüzeysel oturmaları, boru çap değişimlerini ve boruya etki eden gerilmeleri önemli ölçüde azaltmıştır. Fakat geocell ile birlikte EPS Geofoam kullanımının ekonomik boyutunun tartışmaya açık bir durum olduğu da ifade edilmiştir.

1.4 EPS Geofoamun Malzeme Özellikleri

EPS Geofoam son 60-70 yıldır dünyanın farklı bölgelerinde ve farklı geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Farklı özelliklere sahip EPS Geofoam, zeminlere göre 100-200 kat daha hafif, yoğunluğuna göre istenilen mukavemet, sıkışabilirlik ve boyutlarda üretilme kolaylığı sunmaktadır. Kolay inşa olanağı sunarak zaman ve iş gücünden tasarruf sağlayarak, yüklemeler altında neredeyse sıfır yanal şekil değiştirme yapma gibi özelliklerinden dolayı kullanımı artarak devam etmektedir. Bu malzemelerin sıkışabilirliği malzeme yoğunluğunun, şekil değiştirme hızının ve numune boyutunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Farklı yoğunluklarda üretilen EPS Geofoam'un yoğunluğu ve dayanımı dikkate alındığında iki farklı şekilde adlandırılmaktadır. Genellikle kararayolu alt yapı hizmetlerinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanıldığında belirli şekil değiştirme değerlerindeki dayanımı dikkate alınarak isimlendirilir. Örneğin EPS100 ifadesi, bu malzemesinin standartta belirtilen ve tasarımda dikkate alınan eksenel şekil değiştirme (ϵ) değerindeki dayanımının 100 kPa olduğunu göstermektedir. Üretim aşamasında farklı yoğunluklarda imal edilen EPS Geofoamlar üretici firmalar tarafından 1 m³ hacmindeki kütlesi dikkate alınarak da adlandırılır. EPS15 (Tip 16) olarak ifade edilen malzemenin 1 m³ hacmindeki ağırlığının 15 kg yani yoğunluğunun 15 kg/m³ olduğunu ifade etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında da tercih edilen bu gösterim EPS Geofoam'un ikinci gösterim yöntemidir. TS EN 14933'te belirtilen farklı yoğunluklardaki EPS Geofoamların %2 ve %5 eksenel şekil değiştirme değerlerindeki dayanım değerleri Tablo 1.2'de ifade edilmektedir. Belirtilen dayanım değerleri ile EPS Geofoamun yoğunluklarının (sıkışabilirlik özelliklerinin) ters orantılı olacak şekilde ilişkili olduğu görülmektedir.

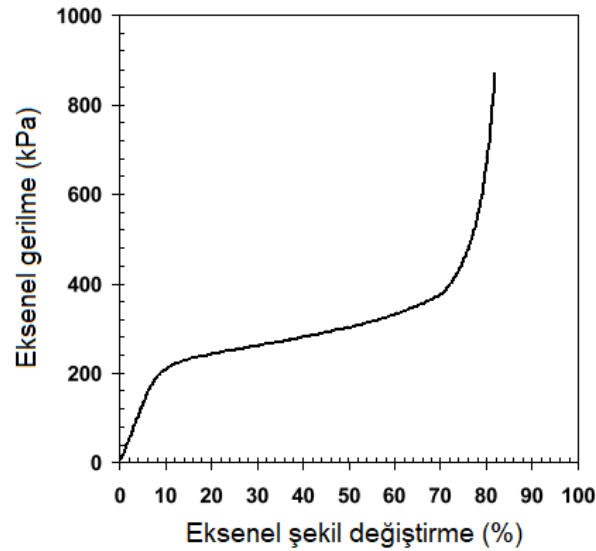
Tablo 1. 2 EPS Geofoam için TS EN 14933'daki minimum dayanım özellikleri

TİP	EPS40	EPS60	EPS100	EPS120	EPS150
Yoğunluk, kg/m ³	12	16	20	24	30
$\varepsilon=2\%$ için min. dayanım, kPa	20	30	60	80	100
$\varepsilon=5\%$ için min. dayanım, kPa	30	50	80	100	120
$\varepsilon=5\%$ için min. dayanım, kPa	40	60	100	120	150
Min. eğilme dayanımı, kPa	50	100	150	170	200

Diğer yapısal elemanlara oranla birçok avantaja sahip olan EPS Geofoam başta hafif dolgu malzemesi olarak yol alt dolgularında, şev stabilitesinde, gömülü boru sistemlerinde boruya etkileyen gerilme ve deformasyonların azaltılmasında, istinat duvarlarında duvara etkileyen yanal toprak basıncının azaltılmasında, dinamik veya darbe etkilerin azaltılmasında, şişen zeminler üzerine inşa edilen yapıların şişme davranışından etkilenmesinin önlenmesinde vb. farklı geoteknik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Elragi, 2000; Kirişçi 2019). EPS kullanımını içeren bu mühendislik yapılarının tasarımında kullanılacak malzeme parametreleri genellikle laboratuvar çalışmalarından elde edilmektedir. Fakat tercih edilecek deney türü ve gerilme koşulları elde edilen parametreler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gömülü menfez/boru sistemlerinde kullanılan EPS Geofoamun malzeme parametreleri (E , c , ϕ , ν) ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi genellikle serbest basınç veya üç eksenli (UU) deneylerinden elde edilmektedir. Bu iki deneydeki gerilme koşulları ve kullanılan numunelerin boyutları elde edilen gerilme-şekil değiştirme davranışlarında farklılıklara neden olur. Tefera vd. (2011) farklı yüklemelere maruz kalan EPS Geofomun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin aşağıda ifade edilen değişkenlere bağlı olduğunu ifade etmektedirler;

- EPS Geofoam yoğunluğuna
- Uygulanan yükün büyüklüğüne
- Çevresel faktörlere
- EPS-geri dolgu arasındaki etkileşime
- Kurulum süresine ve aşamalarına

Farklı yoğunluklara sahip EPS Geofoamlara ait gerilme şekil değiştirme ilişkileri benzer davranış sergiler. Şekil 1.29'da EPS38 için serbest basınç deneyinden belirlenen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi sunulmuştur.



Şekil 1. 29 Yoğunluğu 38 kg/m³ olan EPS Geofoam için serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme- şekil değiştirme ilişkisi (Tafreshi vd., 2019)

Şekil 1.29'daki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde, zeminlerden ve diğer yapısal elemanlardan (beton, çelik, vb.) farklı olarak belirgin bir göçme meydana gelmediği açıkça görülmektedir. Tefera vd. (2011), aşağıda belirtildiği gibi EPS Geofoam için gerilme-şekil değiştirme ilişkisini dört farklı bölge olarak tanımlamalarına rağmen eksenel şekil değiştirme aralıkları EPS Geofoam'un yoğunluğuna göre değişkenlik gösterir (Şekil 1.29).

- Bölge_1 linear elastik bölge (ϵ (%) ≈ 2)
- Bölge _2 akma bölgesi ($2 \leq \epsilon$ (%) ≤ 10)
- Bölge _3 linear elastik ve pekleşme bölgesi ($10 \leq \epsilon$ (%) ≤ 35)
- Bölge _4 ise nonlinear ve pekleşmenin devam ettiği bölge ($35 \leq \epsilon$ (%) < 100)

Özellikle dar bir alanda kalan ve elastik bölge olarak ifade edilen Bölge_1, EPS25 için başlangıç konumu ile yaklaşık %2 eksenel şekil değiştirme aralığı için geçerlidir. EPS Geofoam yoğunluğunun artması elastik bölgenin sınırını büyütürken (Şekil 2.29), EPS Geofoam yoğunluğunun azalması ise bu bölgenin daha dar bir alanda kalmasına neden olur.

EPS Geofoamun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde, kullanım amacına göre Bölge_1 olarak adlandırılan eksenel şekil değiştirme seviyeleri için linear elastik (Ertuğrul ve Trandafir 2011; Withoeft vd. 2018; Kang vd. 2019; Khan ve Meguid, 2021); daha büyük şekil değiştirme değıştirme değeri için ise nonlinear elastik-plastik davranış gösteren malzeme modellerinin (Hardening Soil)

kullanılması önerilmektedir (Tefera vd. 2011; AbdelSalam ve Azzam, 2016). Linear elastik (LE) malzeme modeli için kullanılan EPS Geofoam için mukavemet özellikleri ilgili uluslararası ve TS EN 14933'te açıkça belirtilmesine rağmen Hardenin Soil (HS) malzeme modeli için aynı durum söz konusu değildir. Tefera vd. (2011), EPS Geofoamun büyük şekil değiştirme değerlerinde kullanılacak Hardening Soil Malzeme Modeli için Tablo 1.3'te sunulan malzeme parametrelerinin kullanılmasını önermektedir.

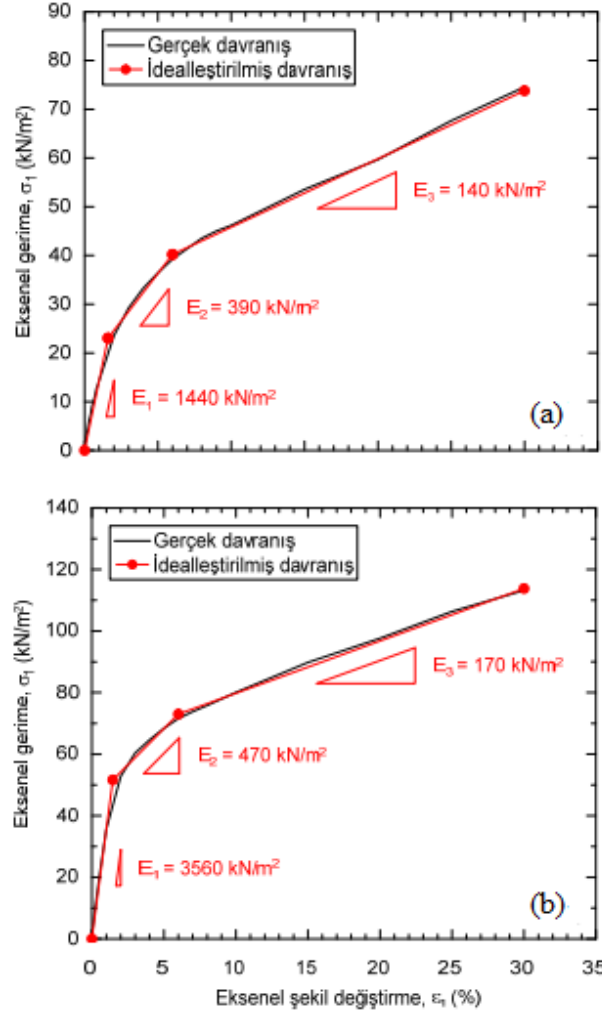
Tablo 1. 3 Hardening Soil malzeme parametreleri (Tefera vd., 2011)

Hardening Soil Malzeme Parametreleri	EPS Türü		
	EPS20	EPS30	EPS40
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	20	30	40
Kohezyon, c (kPa)	35	60	75
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	30	42	40
Dilatasyon açısı, Ψ (°)	0	0	0
Sekant elastisite modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	6000	9000	15000
Power, m	0,5	0,5	0,5
Poisson oranı, ν	0,1	0,1	0,1
Referans gerilme, p^{ref} (kPa)	100	100	100

Tablo 1.3'teki farklı yoğunluklardaki EPS Geofoam için sunulan malzeme parametrelerinin serbest basınç ve üç eksenli deneylerden elde edilen malzeme parametrelerinden oldukça farklıdır. Özellikle kohezif bir davranış gösteren bu malzemeler için önerilen içsel sürtünme açılarının oldukça yüksek, kohezyon değerlerinin ise düşük olduğu ve bu değerlerin EPS Geofomu temsil etmediği açıktır.

Farklı geoteknik uygulamalarda kullanılan farklı özelliklerdeki malzemelerin varlığı ve bu malzemelerin her biri için geleneksel malzeme modellerinin kullanımını zorlaştırmaktadır. Hatta çoğu zaman mevcut malzeme modelleri, farklı yapısal malzemeleri modellemek için yetersiz kalabilmektedir. Bu durum araştırmacıları alternatif çözümler bulmaya yönlendirmiştir. Akınay (2017), EPS10 ve EPS15 için gerilme-şekil değiştirme ilişkisini boy/çap oranı 1 olan numuneler için serbest basınç deneyinden belirlenmiştir. Şekil 1.30'daki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak farklı bölgeleri temsil eden farklı elastisite modüllerini (E) hesaplayarak bu değerleri analizlerde kullanmıştır. Özellikle

elastik şekil değiştirme aralığı dışındaki EPS deformasyonlarını modellemek için farklı E değerlerinin kullanılması alternatif bir çözüm olarak önerilmiştir.

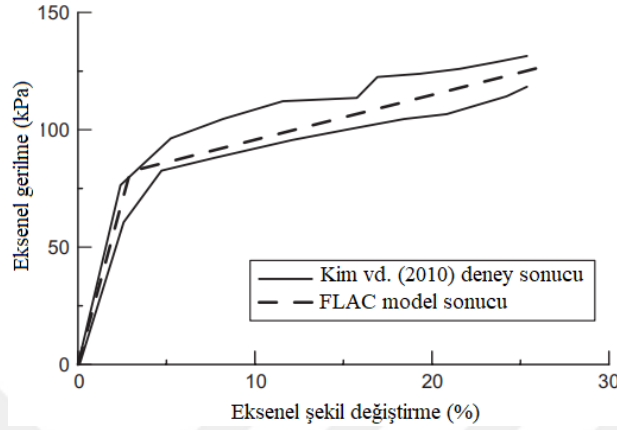


Şekil 1. 30 Sebest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi a) EPS10 b) EPS15 (Akınay, 2017)

Buna ek olarak, bazen kullanılan sayısal analiz yazılımları da alternatif çözümler sunmaktadır. Bu tür durumlarda deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi dikkate alınarak malzeme davranışı sayısal analiz programına aktarılır veya tanımlanır. Kim vd. (2010), EPS malzemesi için serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisini FLAC sonlu farklar yazılımına tanımlayarak çalışmalarında kullanmışlardır (Şekil 1.31).

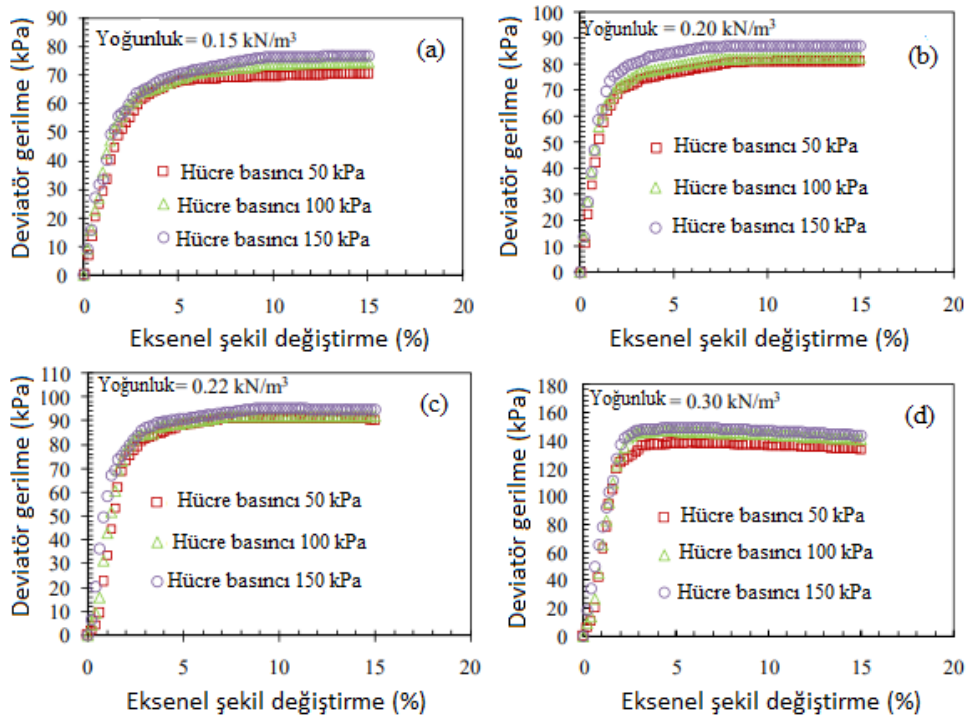
EPS Geofoam malzeme parametrelerini belirlemek için kullanılan numunelerin şekli ve boyutları da oldukça önemlidir. Atmatzidis vd. (2001) ve Chun vd. (2004) EPS numuneleri üzerinde yaptıkları üç eksenli (UU) basınç deneylerinde yüksekliği 10 cm ve çapı 5 cm olan numuneler; Mandal (2012) yüksekliği 15 cm ve çapı 7,5

cm olan numuneler; Beju ve Mandal (2016) 5 cm, 10 cm ve 15 cm boyutlarındaki kübik numuneler kullanmışlardır. Özellikle Wong ve Leo (2006) H/D oranının 2 olduğu durumda numunelerde eğilme davranışının meydana gelebileceğini belirtmiş ve deneylerde $H=D=5$ cm olan numunelerin kullanılmasını önermişlerdir.



Şekil 1. 31 Serbest basınç deney sonuçları referans alınarak Flac sonlu farklar yazılımından elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Kim vd., 2010)

Mandal (2012), üç eksenli UU deneylerinde boyutları 150 mm x 75 mm olan farklı yoğunluklardaki EPS Geofoamların 50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa hücre basınçlarındaki gerilme şekil değiştirme davranışını araştırmıştır (Şekil 1.32).



Şekil 1. 32 EPS Geofoam için üç eksenli (UU) deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Mandal, 2012)

Deneylerde, uygulanan hücre basıncının artışına bağlı olarak elde edilen ölçülen maksimum gerilmelerde ve EPS Geofoamun elastik davranış sergilediği eksenel şekil değiştirme değerlerinde az da olsa artışlar tespit edilmiştir.

EPS malzeme parametreleri deneysel olarak belirlenebileceği gibi farklı araştırmacılar tarafından önerilen amprik eşitlerle de belirlenebilmektedir. Literatür çalışmalarında sıklıkla kullanılan bazı amprik eşitlikler Tablo 1.4'te sunulmuştur. Özellikle Horvath (1995), EPS malzemeler için Poisson oranının negatif çıkabileceğini ifade etmiştir.

Tablo 1. 4 Farklı araştırmacılar tarafından önerilen amprik eşitlikler

Referans	Eşitlik	
	Poisson oranı, ν (-)	Elastisite modülü, E (MPa)
EDO (1992)	$\nu = 0,0056 \times \rho_f^1 + 0,0024$	-
Horvath (1995)	$\nu = 0,0056 \times \rho_f^1 + 0,0024$	$E_f^2 = 0,45 \times \rho_f^1 - 3,0$
Hazarika (2006)	-	$E_f^2 = 0,41 \times \rho_f^1 - 2,8$
Kim et al. (2018)	$\nu = 0,0056 \times \rho_f^1 + 0,0024$	$E_f^2 = 0,43 \times \rho_f^1 - 2,6$

Note: ¹ EPS yoğunluğu (kg/m³), E_f^2 EPS elastisite modülü,

EPS malzemenin sıkışabilirlik özellikleri ve yoğunluğu ters orantılı olarak değişmektedir. Yüksek sıkışabilirlik özellikleri için düşük yoğunluklu EPS Geofoam kullanılması gerekse de bu malzemelerin çok düşük rijitlikte olmasından dolayı mekanik sorunlarla karşılaşmaktadır. Bundan dolayı literatür çalışmaları incelendiğinde düşük rijitlikteki EPS10 malzeme sınırlı sayıda çalışmada kullanılmıştır. Buna ek olarak EPS Geofoamun hem dayanım hem de sıkışabilirlik özellikleri dikkate alındığında en çok tercih edilenler ise EPS15 ve EPS22 olmaktadır. EPS Geofoam veya soft zone kullanımını içeren bazı çalışmalar için kullanılan sıkışabilirliği yüksek malzemelere ait detaylar Tablo 1.5'te özetlenmiştir.

Tablo 1. 5 Literatür çalışmalarında kullanılan EPS malzeme parametreleri

Referans	Sıkışabilirliği Yüksek Malzeme Özellikleri					
	Model	Türü	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	ν (-)
Ertuğrul ve Trandafir (2011)	LE	EPS15	-	-	1500	-
Lal vd. (2014)	LE MC ¹	EPS 15 EPS 20 EPS 30	34 39 62	1,5 2,0 2,5	2480 4070 7550	0,10 0,12 0,17
Dave ve Dasaka (2014)	LE	EPS10 EPS15	-	-	1322 2503	-
Withoeft ve Kim (2015)	LE	EPS15	41 64	-	2800	-
AbdelSalam ve Azzam (2016)	HS	EPS15	12 16	19 33	(E ₅₀) 2350	0,1
Meguid vd. (2017)	Nonlinear hypo plastik	EPS15 EPS22 EPS39	-	-	4200 6910 17800	0,15 0,10 0,10
Kang vd. (2019)	LE	EPS	-	-	345 2756	0,1
Mahgoub ve El-Naggar (2020)	HS	TDA	24	26,5	2750 (E ₅₀)	-
Al Naddaf vd. (2021)	LE MC ¹	EPS15	33,7 5	2	2400	0,1
Khan ve Meguid (2021)	LE	EPS15 EPS22 EPS22 EPS39	-	-	1500 6910 10000 17800	0,1 0,12 0,13 0,15

Note: ¹ Mohr Coloumb

1.5 Gömülü Boru Sistemleri için Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Amacına uygun olarak üretilen gömülü boruların performansını ve hizmet süresi boyunca hizmet verilebilirliğini sağlamak için korugeli boru türleri (koruge HDPE, koruge çelik, nervürlü PVC) ve çelikle güçlendirilmiş HDPE borular (SR-HDPE) da sıklıkla kullanılmaktadır. Ayche (2005), gömülü esnek boruların performansını ve tasarım kriterlerinin uygulanacak yüklere, zeminin rijitliğine, borunun rijitliğine ve borunun profil özelliklerine bağlı olduğunu ifade etmiş ve HDPE boruların geometrik özelliklerinin borunun yapısal performansına etkisini belirlemek için sonlu elemanlar yazılımı Algor'u kullanmıştır. Yapılan analizlerde korugasyonların

boru rijitliğini artırarak boru performansını olumlu etkilediğini ve boru malzeme modeli olarak elastik malzeme davranışı yerine visco-elastik malzeme davranışı kullanılmasının daha doğru olacağını ifade etmiştir.

Fang vd. (2019), gömülü koruge HDPE borular için geri dolgu malzemesinin sıkıştırma özelliklerinin ve dolgu sıkılığının, boru-zemin etkileşimine etkisini arazi deneyleri ve 3D sonlu elemanlar yazılımı Abaqus ile araştırmışlardır. Analizlerdeki sonlu elemanlar ağının (mesh aşaması) korugasyonların zemin ile etkileşimde olduğu bölgelerde iç içe girmesinden dolayı mevcut yazılım yetersiz kalmıştır. Sorunun giderilmesi için boru zemin elemanları Hypermesh kullanılarak Abaqus'e aktarılmıştır.

Fang vd. (2020), trafik yüklerinin gömülü koruge HDPE boruların mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için tam ölçekli arazi deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler, 3D sonlu elemanlar yazılımı Abaqus'te doğrulanmıştır. Doğrulan model üzerinde trafik yükleri, boru rijitliği, dolgu sıkıştırma özellikleri ve rijitliğin etkileri incelenmiştir. Fakat kullanılan 3D analizler bile koruge-zemin etkileşimini yansıtamayacağı için koruge HDPE boru korugesiz olarak modellenmiştir.

Dhar vd. (2004), uniform yayılı yükleme koşullarına maruz kalan termoplastik koruge HDPE ve nervürlü PVC boruların deformasyon ve şekil değiştirme davranışlarını farklı dolgu özellikleri ve boru rijitlikleri için deneysel ve 2D sonlu elemanlar yazılımı ile incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 2D sonlu elemanlar analizlerinin boru deformasyonu ve şekil değiştirmelerini hesaplamak için etkili bir şekilde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Derin gömülü menfez/boru sistemlerinin tasarımında genellikle 2D düzlem şekil değiştirme kabulü için gerçekleştirilen analizler yeterli görülmektedir. Fakat hareketli yüklerin (trafik yükleri) zemin ve yapıya üç boyutlu etki ettiği düşünüldüğünde 2D analizler sıkı gömülü boru/menfez sistemlerde daha muhafazakar tasarımlara neden olmaktadır. Kitane ve McGrath (2006), Plaxis 2D ve 3D analizleri ile trafik yüklerine maruz kalan 6 farklı kesite sahip sıkı gömülü menfezin performansını lineer elastik (LE), Mohr Coulomb (MC) ve Hardening Soil (HS) malzeme modellerini kullanarak araştırmışlardır. Gerçek saha deneylerinin modellenmesine dayanan analizlerde elastisite modüllerinin derinlikle

değişimi dikkate alındığında, Mohr-Coulomb göçme kriteri ile elasto-plastik zemin modelinin, hareketli yüke maruz kalan menfezlerin 3D analizi için yeterli doğruluk sağladığı sonucuna varılmıştır.

Gömülü boru sistemlerinde kullanılan geri dolgunun belirli özelliklerde olması gerekir (Tablo 1.1). Bazen ortam şartları ve ekonomik nedenler mevcut zeminlerin kullanımını gerektirebilir. Al-Abri ve Mohamedzein (2010), ülkelerinde bol miktarda bulunan kum tepelerindeki Dune kumunun gömülü esnek HDPE ve PVC boru sistemlerinde geri dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini Abaqus 2D ile araştırmışlardır. Farklı Dr (%) değerinde, 2 farklı boru malzemesi, boru çapları, boru-zemin ara yüzeyleri ve örtü yükü kalınlıkları için Dune kumunun gömülü boru sistemlerindeki performansı analiz edildiğinde, diğer malzemelerin temininin mümkün olmadığı durumlarda Dune kumunun sıkı ve orta sıkı yoğunlukta kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.

Gömülü boru sistemlerinde meydana gelen gerilme dağılımlarını tahmin etmek için farklı yaklaşımlar (Marston, 1930; Spangler, 1950; Heger, 1988) kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar gerilme dağılımına etkileyen farklı parametreleri (hendek yapısının geometrisi, geri dolgu malzemesinin rijitliği ve gömme derinliği vb.) göz ardı edebilmektedir. Allard ve El Naggar (2015), gömülü yapılarda gerilme dağılımını etkileyen tüm parametreleri dikkate alarak bir menfez yapısına etkileyen gerilmeleri hesaplamış ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak Heger gerilme dağılımının kullanılabilirliğini Plaxis 2D’de kapsamlı bir parametrik çalışma yaparak incelemişlerdir.

Gömülü boru/menfez sistemlerinin yapısal performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri geri dolgu rijitliğidir. Geri dolgu için kullanılacak malzeme modeli ve bu model için gerekli parametrelerin deneysel çalışmalarla elde edilmesi oldukça önemlidir. Katona (2016), geri dolgunun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini üç eksenli deneylerle belirledikten sonra bu eğriden lineer elastik, Mohr Coulomb ve Duncan Selig malzeme model parametrelerini hesaplamıştır. Üç farklı zemin malzeme modeli ve üç farklı menfez yapısı için 2D sonlu elemanlar yazılımı Cande ile yapılan analizlerde Duncan-Selig modelinin (pekleşen zemin modeli), granüler dolgu zeminlerde dairesel menfezler için lineer elastik, Mohr Coulomb elastoplastik malzeme modellerinden daha doğru ve daha güvenli olduğunu belirtmiştir.

Kullanılan sayısal analiz yöntemi hangisi olursa olsun yapılan analizlerin performansı ve doğruluk derecesi zemin ve boru davranışını karakterize etmek için kullanılan parametrelerin uygunluğuna bağlıdır. Literatür çalışması kapsamında gömülü yapılar için kullanılan yazılımlar ve malzeme modelleri yukarıda birkaç örnek ile ifade edilmeye çalışılmıştır. İncelenen diğer çalışmalar ise Tablo 1.6’da sunulmuştur.

Tablo 1. 6 Gömülü yapılar için kullanılan yazılım ve geri dolgu özellikleri

Referans	Yazılım	Geri Dolgu Malzeme Parametreleri						
		Model	Dolgu türü	c (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	ν (-)	m (-)
Dhar ve Moore (2008)	SE ¹ 3D	MC	SW ²	-	36	30	0,2	-
Al Abri ve Mohamedzein (2010)	Abaques 2D-3D	Nonlinear hypo plastik	SP	-	30-36	-	-	-
Kitane ve McGrath (2011)	Plaxis 2D-3D	MC HS	SW ²	-	39-42	22,6	0,19 0,26	0,35
Allard ve El Naggar (2015)	Plaxis 2D	HS	-	-	36	60	-	0,50
Naeini vd. (2016)	Abaques 3D	MC	SW ²	-	40	24,7	0,3	-
Katona (2016)	Cande 2D	LE MC HS	SW ²	86	36	26,7	0,3	-
Fang vd. (2019)	Abaques 3D	MC	SP	-	26-35	7-10	0,23 0,32	-
Tao vd. (2020)	Flac 2D	MC	Farklı zeminler	10-20	26-35	10-14	0,25 0,30	-
Fang vd. (2020)	Abaques 3D	Von Mises	Farklı zeminler					
Al-Naddaf vd. (2021)	Plaxis 3D	HS	Kum	-	38	-	-	-
Meguid vd. (2017)	Abaques 2D	MC	Kumlu çakıl	-	47	150	0,30	-

Note: ¹ sonlu elemanlar; ² iyi derecelenmiş kum

Gömülü boru/menfez sistemlerinin tasarımında farklı yazılımlar kullanıldığı için yapının modellenmesi aşamaları da farklılık gösterir. Modellemeler sırasında boru/menfez yapısına ait eğilme rijitliği (EI), eksenel rijitliği (EA) ve ν gibi malzeme parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir. Literatür çalışmaları

incelendiğinde gömülü yapılar kiriş - kolon elemanlar (beam-column elements) ve ya kabuk elemanlar (shell elements) ile modellenmektedir.

Termoplastik boru malzeme davranışı zaman ve sıcaklığa bağlı olarak farklılık gösterir. Bu değişkenlerin etkisinde termoplastik boru malzemesi doğrusal olmayan visko elastik-plastik davranış gösterir (Sargand vd., 1995; Zhang ve Moore 1997; Ayche, 2005). Tablo 1.7’de AASHTO ve ASTM tarafından önerilen ve farklı termoplastik boru malzemelerine ait kısa ve uzun süreli E değerleri özetlenmiştir.

Tablo 1. 7 Termoplastik boruların mekanik özellikleri

Boru tipi	Standart	ϵ_t^1 (%)	ϵ_c^2 (%)	Kısa süreli E (MPa)	Uzun süreli E (MPa)
Sert duvarlı PE	ASTM F714	5	4.1	≈ 760	≈ 152
Koruge PE	AASHTO M294	5	4.1	≈ 760	≈ 152
PE	ASTM F894	5	4.1	≈ 760	≈ 152
	ASTM F894			≈ 550	≈ 131
Sert duvarlı PVC	ASTM F679 or AASHTO M304	5	4.1	≈ 2760 ≈ 3034	≈ 945 ≈ 1075
PVC	ASTM F679 or AASHTO M 304	5	4.1	≈ 2760 ≈ 3034	≈ 945 ≈ 1075
Koruge PP	AASHTO M 330	5	4.1	≈ 1206	≈ 193

Note: ¹ Çekme için eksenel şekil değiştirme; ² Sıkışma için eksenel şekil değiştirme

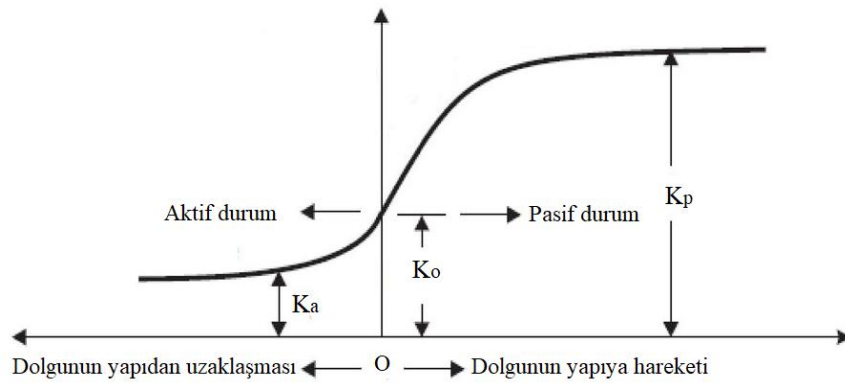
Uzun süreli tasarımlar için ifade edilen E değeri, boru malzemesinin 50-75 yıl, kısa süreli tasarımlar için sunulan E değeri ise 6 saat sonundaki E değerini temsil etmektedir. Fakat analizleri basitleştirmek için sekant elastisite modulünü kullanan elastik malzeme modelleri sıklıkla kullanılmaktadır (Tablo 1.8). Özellikle PE borular için lineer elastik malzeme modelini kullanan araştırmacılar, E değeri olarak 450 MPa veya 456 MPa değerinin kullanılmasını önermektedir. Önerilen bu değer boru malzemesinin 6 saatlik deney sonucunu temsil etmektedir. Boru performansını artırmak için amaca uygun olarak üretilen ve E değerleri korugesiz borulara göre daha yüksek olan korugeli borular Tablo 1.8’de * sembolü ile gösterilmiştir. Özellikle kiriş-kolon, plaka ve ya kabuk eleman olarak modellenen boruların E değerleri, borudan ziyade boru malzemesini temsil etmektedir.

Tablo 1. 8 Literatürdeki bazı çalışmalarda kullanılan sayısal yaklaşımlar ve boru malzeme parametreleri

Referans	Yazılım	Boru Özellikleri				
		Malzeme modeli	Model elemanı	Türü	E (MPa)	ν
Sargand vd (1995)	Cande	Elastik	-	PVC	2758	0,25 0,30
Zhang ve Moore (1997)	S.E	Visco elastik ve elastik	-	HDPE	450	-
Dhar vd. (2004)	S.E	Elastik	Beam	HDPE PVC*	450 2760	-
Ayche (2005)	Algor	Visco elastik	Solid	HDPE*	868	0,45
Dhar ve Moore (2004)	S.E	Elastik		HDPE*	450	0,46
Al-Abri ve Mohammedzein (2010)	Abaques	-	Beam	HDPE PVC	456 2760	0,46 0,30
Allard ve El Naggar (2015)	Plaxis	Elastik	Plate	RC	30000	0,20
Akınay (2017)	Plaxis	Elastik	Plate	HDPE*	390	0,45
Fang vd. (2019)	Abaques	Elastik	Shell	HDPE*	800	0,40
Fang vd (2020)	Abaques	Von Mises	Shell	HDPE*	800	0,40
Mahgoub ve El-Naggar (2020)	Plaxis	Elastik	Plate	Çelik*	200000	-
Kılıç vd. (2023)	Plaxis	Elastik	Plate	PVC HDPE	Değişken	0,30 0,45

1.6 Kemerlenmenin Yanal Toprak Basıncı Katsayısına Etkisi

Geoteknik yapılarının tasarımında yatay gerilmelerin yanal toprak basıncı katsayısı yardımıyla hesaplanması yaygın bir yaklaşım olduğu için bu katsayılar oldukça önemlidir (Şekil 1.33).



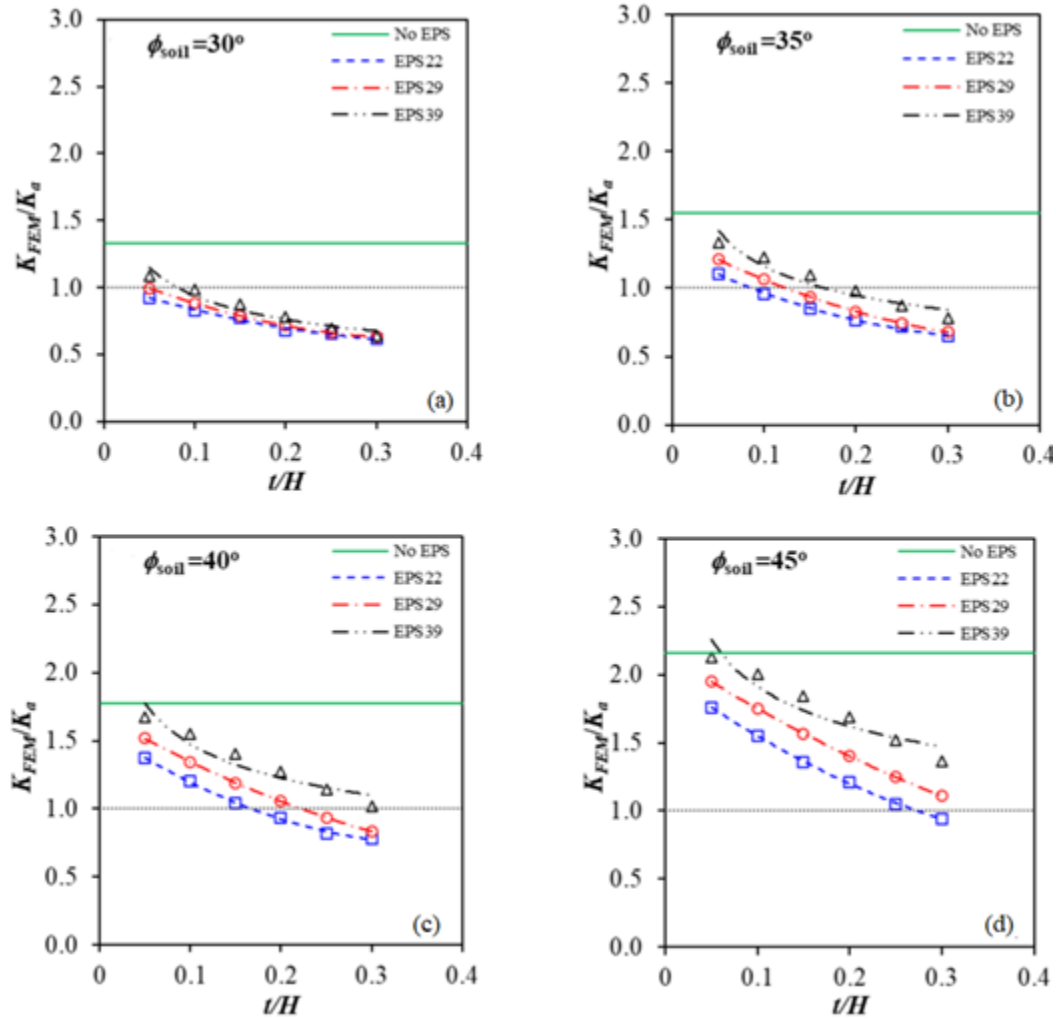
Şekil 1. 33 Dane hareketine bağlı olarak yanal toprak basıncının değişimi

Gömülü yapıların rijit ve ya esnek olmasına bağlı olarak negatif veya pozitif kemerlenme mekanizmasını inceleyen çalışmalar Bölüm 1.3.2’de detaylandırılmıştır. Özellikle kemerlenme etkisi sonucu merkez zemin prizması ve komşu zemin prizması arasındaki yük transferi ve bu transferin yönü, boru ve dolgunun yük taşıma mekanizmasında önemli değişimlere neden olur. Nihai durumda gömülü boru sisteminde yeni gerilme dağılımları oluşur. Bu yeni gerilme dağılımlarından yatay ve düşey gerilmeler farklı oranlarda etkilendiği için K değeri de değişime uğrar.

44

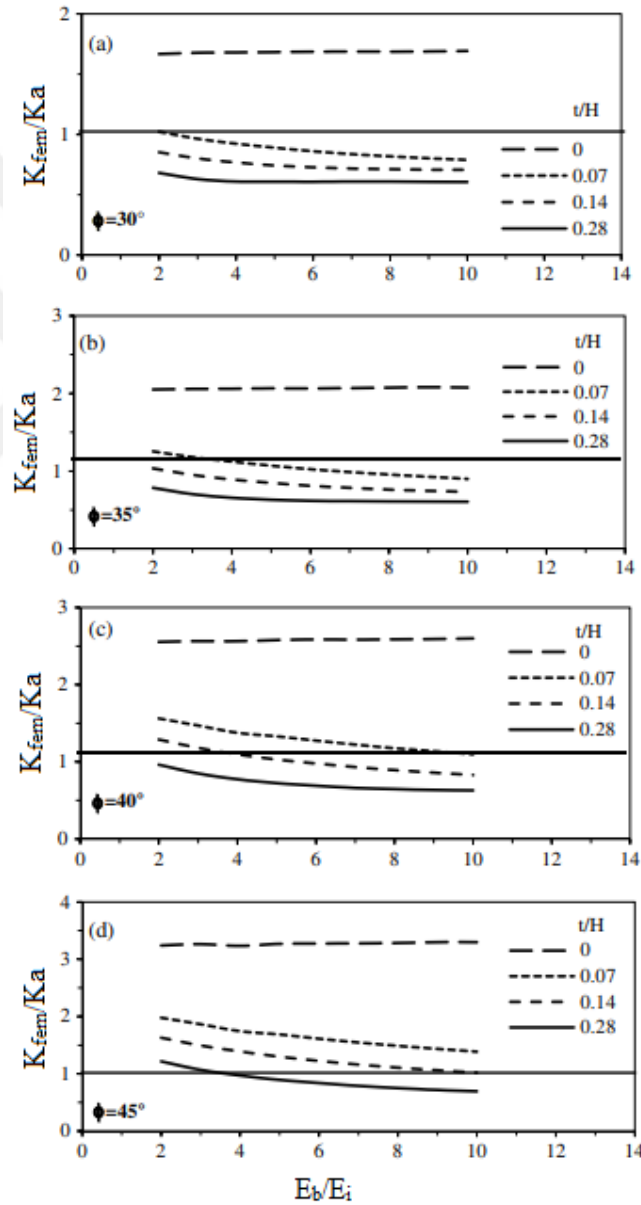
Bu amaç için kullanılan sıkışabilirliği yüksek malzemeler duvara etkiyen gerilmeleri, gerilmelerin dağılımını ve yanal toprak basıncı katsayısında önemli değişimler meydana getirir. Özellikle Khan ve Meguid (2021), yaptıkları deneysel çalışmalarını sayısal analiz modellerini doğrulamak için kullandıktan sonra parametrik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarda farklı EPS yoğunlukları, farklı EPS kalınlığı/duvar yüksekliği oranları ile farklı dolgu rijitliklerinin duvara etkiyen yanal toprak basınçlarına etkisi sistemli olarak açıklanmıştır. Sıkışabilirliği yüksek EPS Geofoamun istinat duvarında kullanımı sonucu meydana gelen yeni aktif toprak basıncı katsayısı K_{FEM} olarak adlandırılmış ve K_{FEM}/K_a değerinin farklı koşullar için değişimini Eşitlik 1.10 ile geri hesaplamalarla (back analysis) belirlemişlerdir (Şekil 1.35).

$$K_{FEM} = \frac{2}{\gamma H^2} \int_0^H \sigma_x dz \quad (1.10)$$



Şekil 1. 35 Farklı ϕ değerleri için K_{FEM}/K_a değişimi (Khan ve Mguid, 2021)

Ertuğrul ve Trandafir (2011), rijit istinat duvarlarında EPS Geofoam kullanımı ile duvar arkasındaki K değerindeki değişimi deneysel ve sayısal analizlerle araştırmışlardır. Ayrıca analizlerde EPS yoğunluğu, kalınlığı ve geri dolgu özelliklerinin gerilme dağılımı ve K 'ye etkisi parametrik çalışmalarla incelenmiştir. Analizler sonucunda Eşitlik 1.10 kullanılarak elde edilen yanal toprak basıncı katsayısının değişimi Şekil 1.36'da sunulmuştur. EPS kripi etkisini hesaba katmadan elde edilen sonuçların rijit istinat duvarları tasarımlarında kullanılabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 1. 36 K_{FEM}/K_a oranının ϕ 'ye bağlı değişimi (Ertuğrul ve Trandafir, 2011)

Tao vd. (2020), dolgu yükseklikleri 5,4 m ile 19,4 m aralığında değişen 135 adet menfez yapısını incelemiş ve bu menfezlerde meydana gelen deformasyonları ve hasarları belirlemişlerdir. Bu 135 adet menfez yapısının 110'unda farklı etkiler sonucu farklı deformasyonların ve hasarların olduğu rapor edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak bir menfez yapısında meydana gelen gerilme dağılımını ve kemerlenme mekanizmasına bağlı olarak K'nin değişimini Flac 2D ile incelemişlerdir. Oluşturulan model üzerinde dolgu yüksekliğinin, kaya bloğu oranının, dolgu Poisson oranının ve kaplama kalınlığının gerilme dağılımına ve K'ya etkisi detaylandırılmıştır. Özellikle gömülü bir menfez yapısındaki yanal toprak basıncı katsayısının sabit olmadığı ve yukarıda ifade edilen parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ifade edilmiştir.

İstinat duvarlarında EPS kullanımı sonucu Ka veya Ko değerlerinin değişimi sistemli olarak araştırılmış ve sistematik olarak ifade edilmiştir. Fakat gömülü boru sistemlerinde yapılan çalışmalar genellikle kemerlenme faktörü üzerinde yoğunlaşmış ve EPS kullanımı ile sığ ve derin gömülü boru sistemlerindeki yanal toprak basınçlarının değişimi henüz tam olarak sistematik olarak açıklanabilmiş değildir. Özellikle bölgesel ve ya şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü esnek boru sistemlerinde K'nin değişimini inceleyen çalışma sayısı da oldukça sınırlıdır.

1.7 Ara Yüzey Sürtünme Açılarının Belirlenmesi

Farklı kullanım alanları olan EPS Geofaamlar kullanıldığı yapısal eleman ve geri dolgu malzemesi ile birlikte bir bütün olarak çalışır. Özellikle gömülü boru sistemlerinde ve dayanma yapılarında geri dolgu-yapı, yapı-EPS ve EPS-geri dolgu sürekli etkileşim halindedir. Yapılan sayısal analizlerde kullanılacak geri dolgu-yapı, yapı-EPS ve EPS-geri dolgu ara yüzey sürtünme açılarının (δ , c_a) amprik eşitlikler yerine deneysel çalışmalarla belirlenmesi daha gerçekçi tasarımların yapılmasına olanak sağlayacaktır. Bu ara yüzey sürtünme açılarının değeri genellikle farklı deney koşulları gözetilerek laboratuvar ortamında direkt kesme kutusu deney aleti ile belirlenirken, alternatif olarak Terzaghi ve Peck (1948) ile NAVFAC (1986) tarafından önerilen yaklaşımlardan da elde edilebilmektedir.

Zemin-yapı etkileşimi konusunda ilk kapsamlı deneysel çalışmalar direk kesme kutusu deney aleti kullanılarak Potyondy (1961) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Potyondy bu çalışmalarda, her biri kendi içinde farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip ahşap, beton ve çelik ara yüzey yapısal elemanlar ile farklı dane çapı dağılımına sahip kum, siltli kum, kohezyonlu zemin, kil zemin ve kayalar için ara yüzey sürtünme mukavemetleri belirlenmiştir. Sonraki çalışmalar ara yüzey elemanının cinsini, yüzey pürüzlülüğü, sertliğini, zeminin ortalama dane çapını, sıklılığını (Dr), suya doygunluk derecesini, şekilsel özelliklerini, deney aletinin boyutlarını, türünü ve farklı gerilme seviyelerini dikkate alarak zemin-yapı ara yüzey etkileşimini laboratuvar deneyleri ile incelemişlerdir (Kishida ve Yoshimi, 1981, Dyer ve Milligan, 1984; Palmeira, 1989; Liu, 2006; Wu vd. 2007; Bareither vd. 2008; Tiwari ve Al-Adladh, 2014; Samanta vd. 2018; Szypcio, 2019; Tayfun, 2022).

Teknolojik gelişmeler sonucu farklı yapısal elemanların (EPS, geogrid, geotekstil, geocompozit vb.) ve farklı geri dönüşüm atıklarının mühendislik yapılarında kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu malzemelerin mühendislik yapısı ile etkileşimi ve ara yüzey sürtünme mukavemeti parametreleri tasarımlar için önemlidir. Beju ve Mandal (2018), taş ocaklarında atık madde olarak fazlaca bulunan kırma taş atıklarının gömülü boru sistemlerinde ve istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi olarak EPS ile birlikte kullanılmasında meydana gelecek ara yüzey sürtünme mukavemet parametrelerini direk kesme kutusu deney aleti ile araştırmışlardır. 12 kg/m³, 15 kg/m³, 20 kg/m³ yoğunluklarına sahip EPS Geofomun kuru ve suya doygun durumlarını dikkate alınarak 10 kPa, 25 kPa ve 45 kPa düzey gerilmelerde gerçekleştirilen deneylerde EPS yoğunluğunun ara yüzey sürtünmesine etkisinin ihmal edilebilir büyüklükte olduğu ve alt kutudaki zemin katman kalınlığının ara yüzey sürtünmesini önemli derece etkilediği ifade edilmiştir. Gömülü sistemler ve istinat duvarları için yapılan analizlerde kullanılan geri dolgu-boru, boru-EPS ve EPS-geri dolgu ara yüzey sürtünme açıları bazı çalışmalar için Tablo 1.9’da özetlenmiştir. Daha kapsamlı bilgiler *Bölüm 2*’de sunulacaktır.

Witthoeft ve Kim (2015), FLAC ile yaptıkları analizlerde boru-zemin ara yüzey sürtünme açısı için (δ) 1° ile 34° aralığında değişen farklı değerler kullandıklarında model deneylerden ölçülen gerilme değerlerinde %5-%10 aralığında değişimler elde etmişlerdir.

Tablo 1. 9 Literatürdeki boru-zemin arayüzey etkileşimi inceleyen bazı çalışmalar

Referans	Yapı türü	Boru-zemin ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri				
		Dolgu	ϕ (°)	ψ (°)	Etkileşim	δ (°)
Kang vd. (2013)	Gömülü HDPE boru	SW ML ¹ CL ²	-	-	Zemin-boru	Rijit
Lal vd. (2014)	İstinat duvarı	ML ¹	34,5	6	EPS-zemin EPS-duvar	24,5 32,3
Allard ve El Naggar (2015)	Beton menfez	Granüler dolgu	30-42	-	Zemin-boru	24,8 35,8
Withoeft ve Kim (2015)	Gömülü boru	Kum	34	0-10	Zemin-boru Zemin-EPS	16,9 0-34
Naeni vd. (2016)	Gömülü HDPE boru	SW	40	10	Zemin-boru	22,8
Meguid vd. (2017)	Rijit kutu	Kumlu çakıl	47	15	Zemin-kutu Zemin-EPS EPS-kutu	25,8 32,8 25,8
Akınay (2017)	Gömülü HDPE boru	SP	30	-	Zemin-boru Zemin-EPS Boru-EPS	20 30 14
Mahgoud ve El Naggar (2020)	Gömülü çelik boru	SP	39	-	Zemin-boru Zemin-plate	22 22
Khan ve Meguid (2021)	İstinat duvarı	Kum	43,5	22,5	EPS-duvar EPS-zemin Zemin-duvar	15,9 8,1 5,4

Note: ¹ düşük plastisiteli silt; ² düşük plastisiteli kil

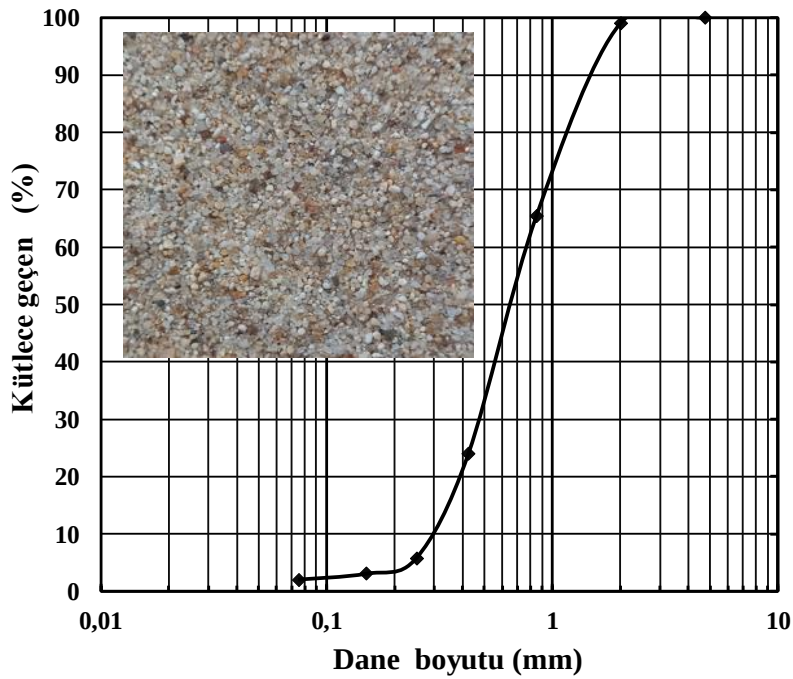
2 MALZEME ÖZELLİKLERİ

2.1 Geri Dolgu Malzemesi

Tam ölçekli laboratuvar deneylerinde geri dolgu malzemesi olarak Tekirdağ bölgesinden temin edilen kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır. Bu kumun fiziksel özellikleri, kayma mukavemeti parametreleri ve farklı yapısal elemanlarla ara yüzey sürtünme mukavemet parametreleri laboratuvarımızda yapılan deneylerle belirlenmiştir. İlgili standartlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylere ait detaylar alt başlıklar halinde sunulacaktır.

2.1.1 Geri Dolgunun Fiziksel Özellikleri

Dane çapı dağılımını belirlemek için 5000 gr deney kumu yıkanarak etüvde kurutulmuş ve malzemenin yaklaşık %3'ü No:200 elek altına geçmiştir. ASTM D6913, ASTM D854, ASTM D4253, ASTM 4254'e göre belirlenen dane çapı dağılımı ve görseli Şekil 2.1'de; fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Geri dolgu malzemesinin birleştirilmiş zemin sınıflandırmas sistemine (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfında yer almaktadır



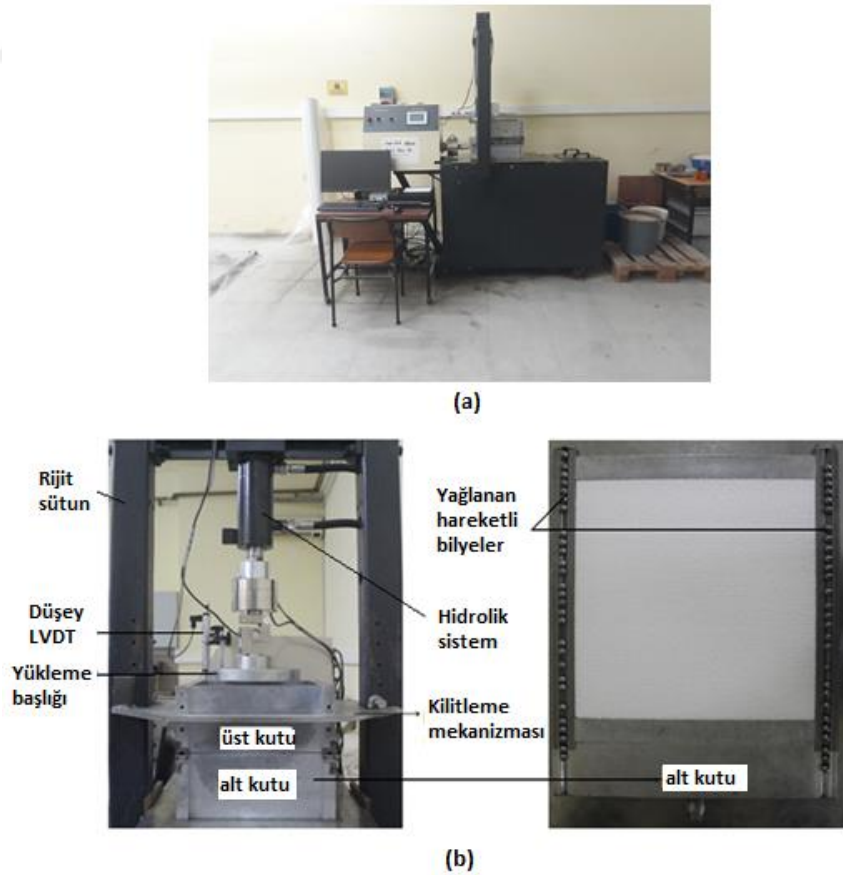
Şekil 2. 1 Geri dolgu için dane çapı dağılımı ve görseli

Tablo 2. 1 Geri dolgu malzemesi için fiziksel özellikler

Zemin Sınıfı (USCS)	e_{max}	e_{min}	Gs	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cc
SP	0,81	0,50	2,67	0,28	0,47	0,67	0,78	2,76	0,97

2.1.2 Ara Yüzey Kayma Mukavemeti Parametrelerinin Belirlenmesi

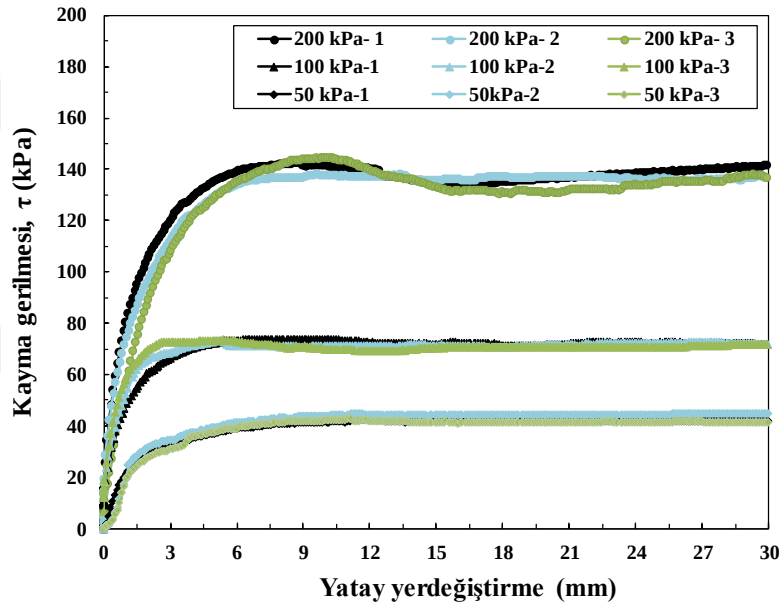
Tablo 1.9’da özetlenen çalışmalar ve diğer literatür çalışmaları incelendiğinde farklı boru, geri dolgu ve EPS yoğunlukları için kullanılan ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri amprik eşitliklerden, analiz programı tarafından önerilen değerlerden, daha önce yapılmış çalışmalardan ve kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınarak kesme kutusu deneylerinden belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilecek sayısal analizler için geri dolgu, geri dolgu-EPS ve geri dolgu-boru ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerine (ϕ , δ , c , c_a) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda detayları Şekil 2.2’de verilen 30 cm x 30 cm x 22,5 cm boyutlarındaki büyük ölçekli direk kesme kutusu deney aleti kullanılarak ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 2. 2 Büyük ölçekli kesme kutusu a) genel görünüm b) detayları

2.1.2.1 Kumun Kayma Mukavemeti Parametreleri

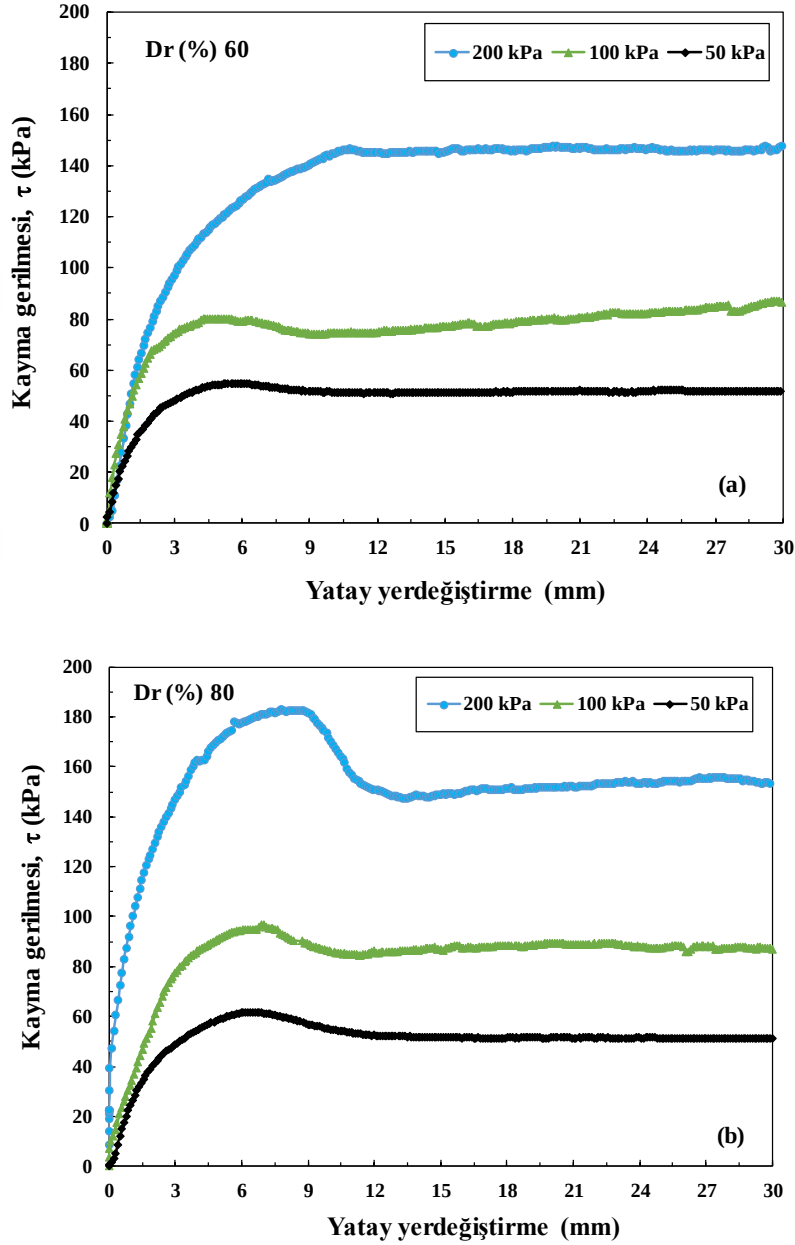
Gömülü boru sistemlerinde kullanılacak geri dolgu malzemesinin özellikleri ve sıkıştırma dereceleri için Tablo 1.1 referans alındığında, minimum Dr (%) 60 olması gerekmektedir (CAN/CSA B182.11). Fakat daha gevşek durumdaki parametrelerin bilinmesi de yapılacak tasarımlar için önemlidir. Bundan dolayı kumun kayma mukavemeti parametreleri Dr(%) 40, Dr(%) 60 ve Dr(%) 80 için 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa düşey gerilme altında belirlenmiştir. Yapılan deneylerin tekrarlanabilirliğini kontrol etmek için Dr (%) 40'taki her deney aynı koşullarda 3 kez tekrar edilerek kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme ilişkisi belirlenmiştir (Şekil 2.3).



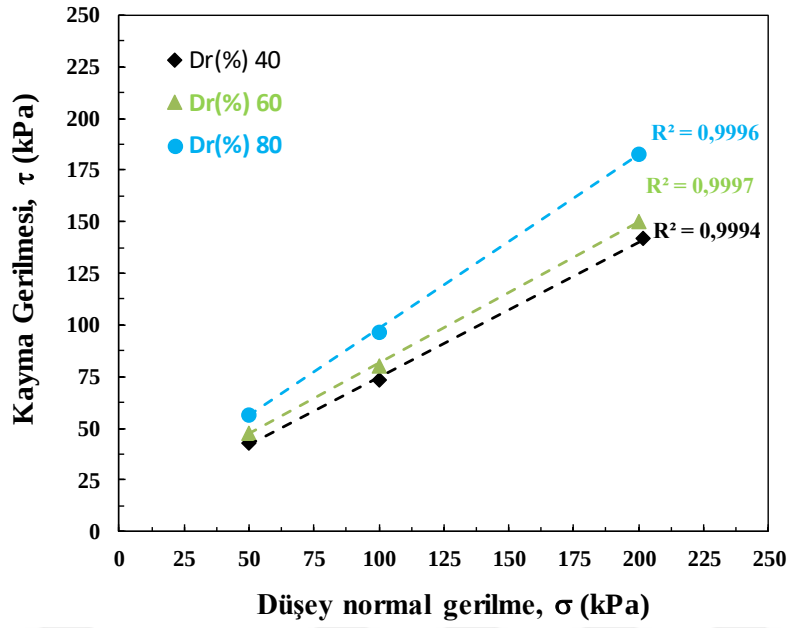
Şekil 2. 3 Dr (%) 40 için tekrarlı deneyler için sonuçlar

Tüm deneylere %10 yatay şekil değiştirme ($(30/300) \times 100 = \%10$) değerine kadar devam edilmiştir. Dr(%) 40 ve 50 kPa normal gerilme altında gerçekleştirilen deneyler için elde edilen gerilme-yer değiştirme ilişkisi gevşek durumdaki kum davranışını temsil etmektedir. Düşey gerilmelerin artışı kumda bir miktar sıkışmaya ve Dr (%) değerinde artışa neden olacağından, gevşek kum davranışından orta sıkı kum davranışına doğru bir yönelim söz konusudur. Dr(%) 40 için 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa düşey gerilme değerlerinde yapılan tekrarlı deneylerde pik kayma gerilme değerleri arasında sırasıyla $\approx 2,3$ kPa, ≈ 1 kPa ve ≈ 6 kPa farklar gözlemlenmiştir. Her gerilme seviyesi için elde edilen maksimum kayma gerilmelerinin ortalaması alınarak Dr(%) 40 için kayma düzlemi elde edilmiştir.

Deneylerin tekrarlanabilirliği test edildikten sonra Dr(%) 60 ve Dr(%) 80 için aynı deney prosedürü ve aynı düşey gerilmelerde deneyler yapılarak kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme ilişkileri belirlenmiştir (Şekil 2.4). Üç farklı Dr (%) için yapılan deneylerde %10 yatay şekil değiştirme değerine kadar olan alan düzeltmesi yapılmış maksimum kayma gerilmeleri kullanılarak belirlenen kayma düzlemleri Şekil 2.5'te, bu kayma düzlemlerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Tablo 2.2'de sunulmuştur.



Şekil 2. 4 Farklı Dr (%) için kayma gerilmesi-yatay yerdeğiştirme ilişkisi
a) Dr(%) 60 b) Dr(%) 80



Şekil 2. 5 Farklı Dr (%) değerleri için kayma düzlemleri

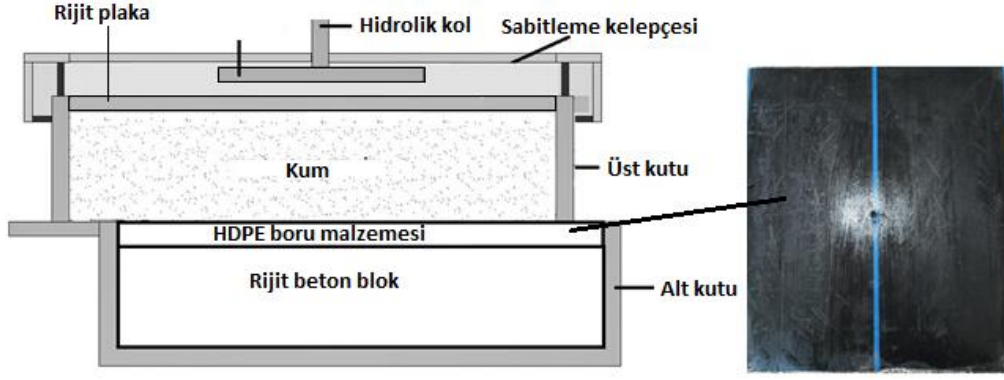
Tablo 2. 2 Farklı Dr (%) için belirlenen kayma mukavemeti parametreleri

Etkileşim	Dr (%)	Uygulanan düşey normal gerilme, σ (kPa)	Ölçülen kayma gerilmesi, τ (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)
Kum- Kum	≈40	≈50, ≈100, ≈200	≈43, ≈74, ≈142	33	9
Kum- Kum	≈60	≈50, ≈100, ≈200	≈48, ≈80, ≈150	35	13
Kum- Kum	≈80	≈50, ≈100, ≈200	≈57, ≈97 ≈183	40	

Deney kumuna ait kayma mukavemeti açıları belirlenirken Dr (%) 40 için 9 kPa; Dr(%) 60 ve Dr (%) 80 için 13 kPa kohezyon hesaplanmıştır. Teorik olarak temiz kumlar için sıfır olması gereken bu kohezyon değerlerinin kumdaki kenetlenme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

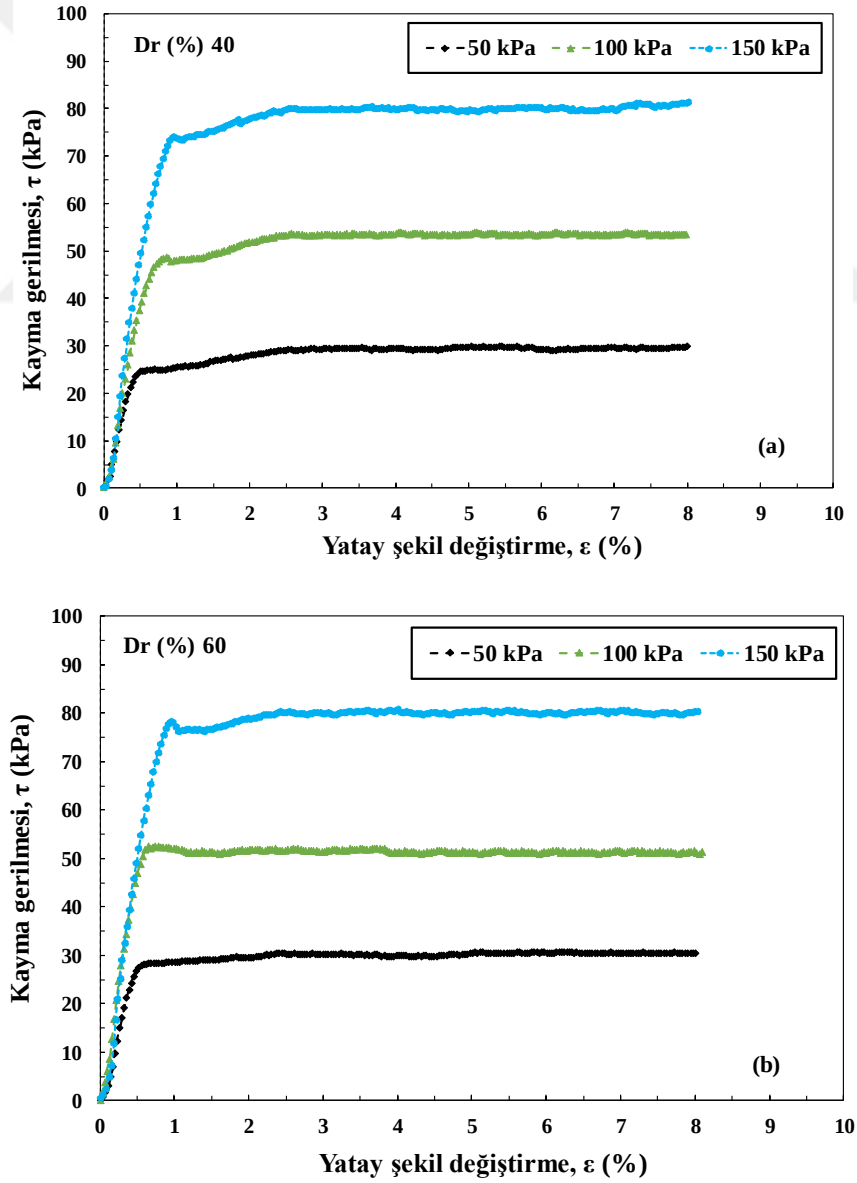
2.1.2.2 Kum-HDPE Malzemesi Ara düzey Kayma Mukavemeti Parametreleri

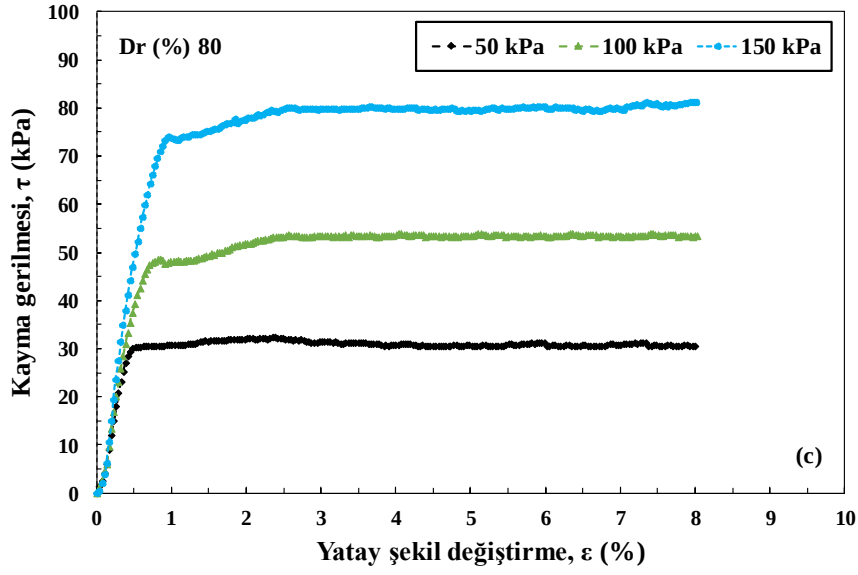
Kuzey Boru A.Ş.'den temin edilen PN10 özelliklerine sahip HDPE boru 30 cm x 30 cm boyutlarındaki deney aletine uygun olarak kesilmiştir. Kesilen boru malzemesi, rijit beton bloğa sabitlendikten sonra öngörülen deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). Boru malzemesinin sabitlendiği beton bloğun üretildiği aynı karışımdan hazırlanan 15 cm x 15 cm x 15 cm boyutlarındaki küp numunelerinin 7 günlük dayanımı 53 MPa olarak hesaplanmıştır.



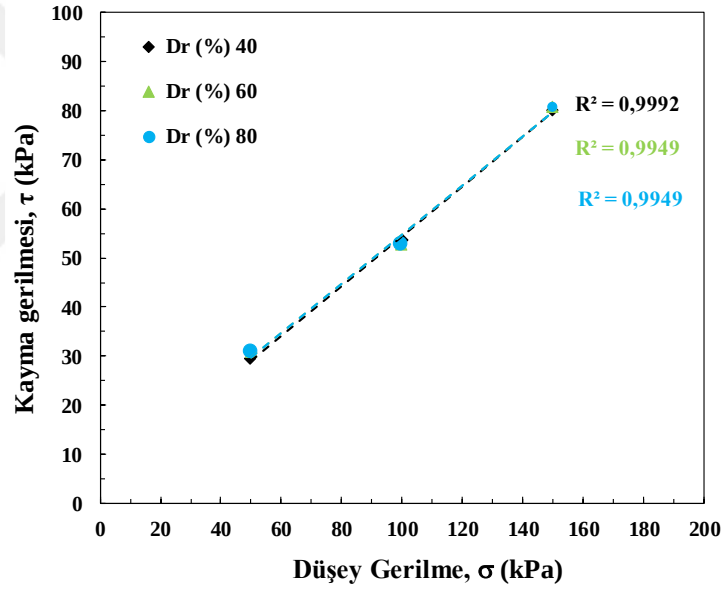
Şekil 2. 6 HDPE malzemesi ile kum ara yüzey deneyleri için deney koşulları

Kum deneylerinde olduğu gibi üç farklı Dr (%) ve üç farklı düşey gerilme altında yapılan toplam 9 deney için elde edilen gerilme - yatay yer değiştirme ilişkisi Şekil 2.7’de, kayma düzlemleri Şekil 2.8’de sunulmuştur.





Şekil 2. 7 Farklı Dr (%) için sonuçlar a)Dr (%) 40 b) Dr(%) 60 c) Dr(%) 80



Şekil 2. 8 Farklı Dr (%) değerleri için kum-HDPE deneyleri kayma düzlemleri

Şekil 2.8'den belirlenen kayma mukavemeti parametreleri Tablo 2.3'te özetlenmiştir.

Tablo 2. 3 Farklı Dr (%) için kum-HDPE kayma mukavemeti parametreleri

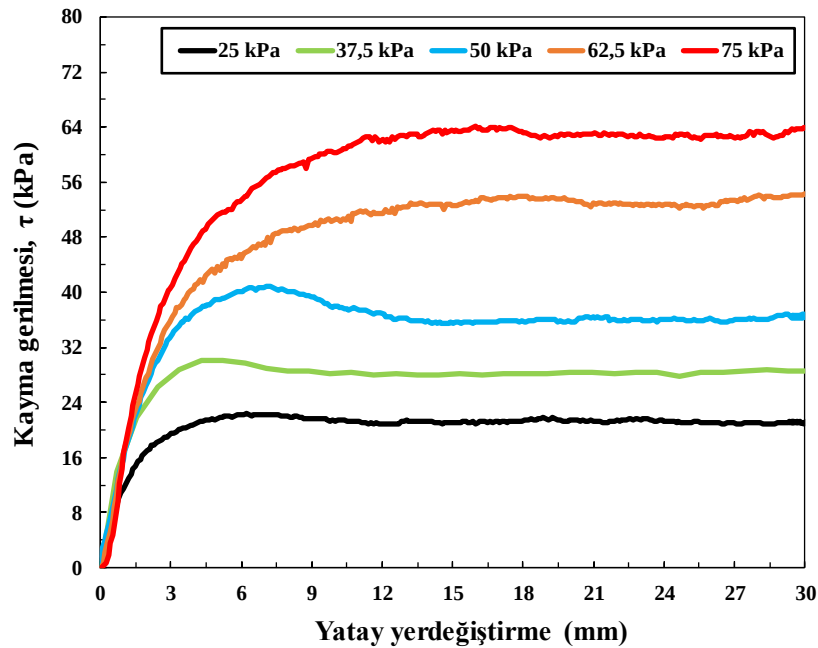
Etkileşim	Dr (%)	Düşey normal gerileme, σ (kPa)	Yatay kayma gerilme, τ (kPa)	δ (°)	c_a (kPa)	$R_{int} = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)}$
Kum- HDPE	≈40	≈50, ≈100, ≈150	≈29, ≈54, ≈80	26	≈0	0,57
Kum- HDPE	≈60	≈50, ≈100, ≈150	≈31, ≈54, ≈81			
Kum- HDPE	≈80	≈50, ≈100, ≈150	≈32, ≈59 ≈82			

Kum-HDPE ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri incelendiğinde δ değerinin D_r (%)’ye bağlı olarak değişmediği fakat c_a değerinde az da olsa artış olduğu gözlemlenmiştir. Hesaplanan c_a değerleri, danelerin HDPE malzemeye yüzeysel olarak penetrasyonu ve bu penetrasyon sonucu HDPE malzemeyi çizmesinden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde farklı özelliklere sahip geri dolgu-HDPE boru ara yüzey sürtünme açıları için Bhatia ve Kasturi (1996) 23,3°; Dove ve Frost (1999) 21,3°; Naeini vd. (2016) 22,6° ve Akınay 20,0° değerlerini dikkate almaktadır. Bu tez çalışması kapsamında büyük ölçekli direk kesme kutusundan kum-HDPE ara yüzey sürtünme açısı için belirlenen 25,6° değerinin bu değerlere yakın olduğu görülmektedir.

2.1.2.3 Kum-EPS Ara yüzey Kayma Mukavemeti Parametreleri

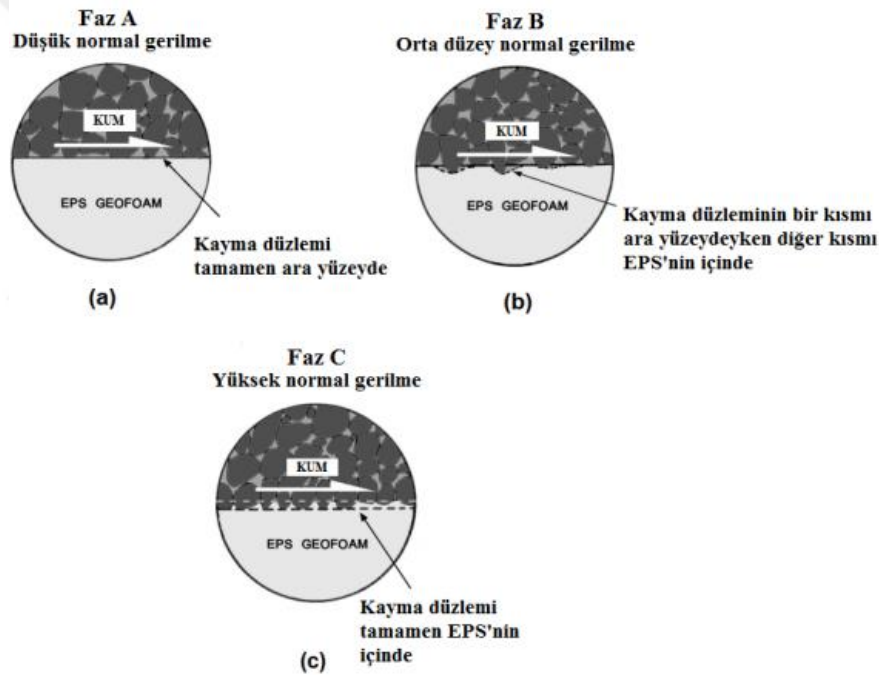
Kum-EPS ara yüzey sürtünme mukavemeti parametrelerini belirlemek için tam ölçekli laboratuvar deneylerinde soft zone olarak EPS15 ve EPS25 tercih edilmiştir.

EPS-kum ara yüzey deneylerinde uygulanacak düşey gerilmeleri belirlemek için EPS15 ve D_r (%) 40’ta kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde boyutları 30 cm x 30 cm x 7,5 cm olan EPS blok, deney aletinin alt kutusuna yerleştirilmiştir (Şekil 2.2b). Farklı düşey gerilme değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin uygulanan düşey gerilmelere bağlı olarak farklılık göstermiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2. 9 D_r (%) 40 için farklı düşey gerilmeler için deney sonuçları

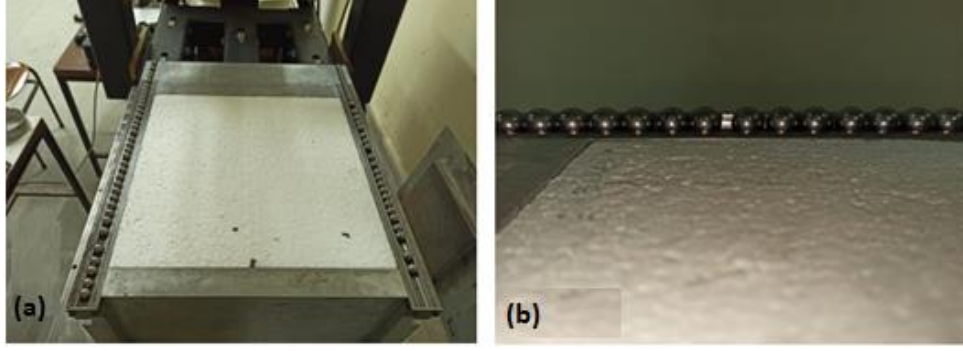
Özellikle düşük gerilme seviyeleri (25 kPa-37,5 kPa-50 kPa) için deney sonunda incelenen EPS'nin zemin ile temasta olan ara yüzeyinde danelerin EPS bloklarına penetrasyonu kısıtlıyken, yüksek gerilme seviyelerinde (62,5 kPa ve 75 kPa) artan kayma gerilmelerinin etkisiyle kayma doğrultusunda penetrasyonların genişlediği ve yer yer kopmalara neden olduğu gözlemlenmiştir. Uygulanan düşey gerilmelerin 50 kPa'dan daha yüksek olması durumunda EPS malzemesinde meydana gelen düşey deformasyonlar sonucu kum-EPS ara yüzey etkileşiminin kum-kum etkileşimine geçeceğinden EPS-kum deneyleri 25 kPa-37,5 kPa ve 50 kPa düşey gerilme değerlerinde sınırlandırılmıştır. Bu gerilme değerleri, EPS15 ve EPS25 için elastik davranış sergilediği gerilme aralığında yer almaktadır. Gerilme seviyesine bağlı olarak meydana gelecek EPS-kum etkileşimi için Xenaki and Athanasopoulos (2001) üç farklı etkileşim mekanizması tanımlamıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2. 10 Gerilme seviyelerine göre EPS-kum ara yüzey etkileşimleri a) düşük gerilme b) orta gerilme c) yüksek gerilme (Xenaki and Athanasopoulos, 2001)

EPS-kum ara yüzey deneyleri sonunda EPS bloğunun zeminle temasta olduğu yüzeyi incelenmiş ve meydana gelen etkileşim sonucu EPS yüzeyi Şekil 2.11'de sunulmuştur.

EPS15-dolgu için $Dr(\%)$ 40'ta yapılan deneyler $Dr(\%)$ 60 ve $Dr(\%)$ 80'de de gerçekleştirilmiştir. Aynı deney prosedürü EPS25-dolgu için uygulanmış ve Şekil 2.9'daki gerilme-şekil değiştirme eğrilerine benzer davranış elde edilmiştir.



Şekil 2. 11 EPS-kum ara yüzey etkileşimi sonucu EPS yüzeyide meydana gelen değişimler a) düşük gerilme seviyesi b) orta gerilme seviyesi

Farklı EPS yoğunlukları ve farklı D_r (%) değerleri için gerçekleştirilen EPS-kum ara yüzey deneyleri ve bu deneylerden hesaplanan kayma mukavemeti parametreleri Tablo 2.4'te toplu olarak özetlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde artan D_r (%) ve EPS yoğunluğuna bağlı olarak dane penetrasyonunun artması ile ölçülen kayma gerilmelerinde ve adhezyon (c_a) değerlerinde artışlar gözlemlense de ara yüzey sürtünme açısı değerinde önemli bir değişim meydana gelmemiştir. Bundan dolayı δ/ϕ oranları 0,90-0,95 aralığında kısıtlı bir değişim sergilemiştir.

Tablo 2. 4 EPS-kum ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri

Etkileşim	D_r (%)	Düşey normal gerilme, σ (kPa)	Yatay kayma gerilme, τ (kPa)	δ (°)	c_a (kPa)	$R_{int} = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)}$
Kum- EPS15	≈ 40	$\approx 25, \approx 37,5 \approx 50$	$\approx 22,3 \approx 30,1 \approx 41,0$	37,1	2,7	0,90
Kum- EPS15	≈ 60	$\approx 25, \approx 37,5 \approx 50$	$\approx 23,0 \approx 33,1 \approx 42,9$	38,6	2,9	0,95
Kum- EPS15	≈ 80	$\approx 25, \approx 37,5 \approx 50$	$\approx 25,6 \approx 34,6 \approx 45,0$	37,6	6,2	0,92
Kum- EPS25	≈ 40	$\approx 25 \approx 37,5 \approx 50$	$\approx 23, 4 \approx 32,3 \approx 42,3$	37,6	3,8	0,92
Kum- EPS25	≈ 60	$\approx 25, \approx 37,5 \approx 50$	$\approx 24,2 \approx 33,2 \approx 43,10$	37,6	4,8	0,92
Kum- EPS25	≈ 80	$\approx 25, \approx 37,5 \approx 50$	$\approx 25,8 \approx 36,5 \approx 45,3$	37,7	6,8	0,92

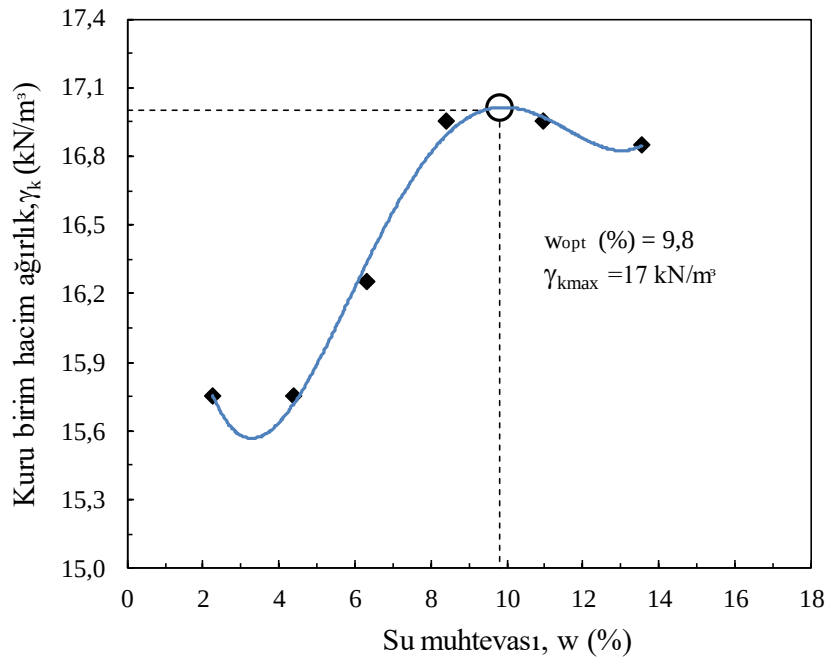
Literatür çalışmaları incelendiğinde daneli zeminler-EPS ara yüzey sürtünme açıları için Ari (2020) EPS15 için δ/ϕ oranını 1,10-1,26; AbdelSalam ve Azzam (2016) EPS20 için 1,08; Zou vd. (2001) EPS20 için 0,75; Beju ve Mandal (2018) EPS15 için 1,06; Khan ve Meguid (2018) EPS15 için 0,49; Atmatzidis vd. (2001) EPS20 için 0,84 oranlarını önermektedirler. Sonuçlar arasındaki bu farklılıklar EPS-granular zemin ara yüzey etkileşimindeki zeminin dane boyutu, deney aleti için boyut faktörü, şekilsel özellikleri ve boşluk oranının geniş bir aralıkta değişmesinden kaynaklanmaktadır.

2.1.3 Model Deneyler için Kumun Dr (%)’sinin Belirlenmesi

Tam ölçekli laboratuvar deneylerinde, SP kumunun sıkıştırma plakaları ile deney tankında sıkışabileceği maksimum sıkılık değeri iki farklı yöntemle belirlenmiştir.

2.1.3.1 Standart kompaksiyon deneyi ile Dr (%) tayini

Deney kumu için ASTM D-698’e uygun olarak standart kompaksiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon eğrisinden maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri (γ_{kmax}) 17 kN/m³ ve optimum su muhtevası (w_{opt}) %9,8 olarak belirlenmiştir (Şekil 2.12). Yapılan tekrarlı kompaksiyon deneylerinde γ_{kmax} 16,8-17,3 kN/m³ ve w_{opt} (%) 9,6 ile 11,5 aralığında değişkenlik göstermiştir.



Şekil 2. 12 SP için kompaksiyon eğrisi ve kompaksiyon parametreleri

Şekil 2.12’den belirlenen γ_{kmax} değerine karşılık gelen boşluk oranı (e) Eşitlik 2.1’den 0,54 olarak hesaplanmıştır.

$$\gamma_{kmax} = \frac{\gamma_w * G_s}{1 + e} \quad (2.1)$$

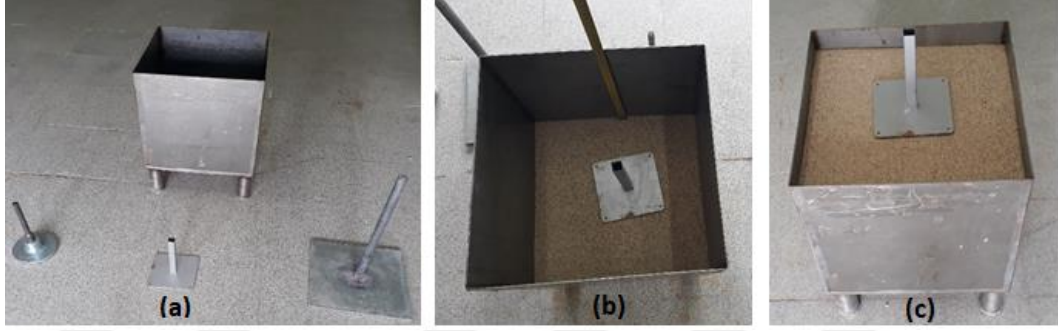
Eşitlik 2.1’den belirlenen e değeri ile Tablo 2.1’de yer alan e_{max} ve e_{min} değerlerinin Eşitlik 2.2’de yerine yazılması sonucu Dr (%) yaklaşık olarak 87 hesaplanmıştır.

$$Dr (\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2.2)$$

Tekrarlanan kompaksiyon deneyleri sonucunda belirlenen γ_{kmax} değerlerinin karşılık geldiği D_r (%) değerleri 80 ile 90 aralığında değişim göstermiştir.

2.1.3.2 Mini Tank İçinde D_r (%) Tayini

Boyutları 40 cm x 40 cm x 40 cm olan kare bir tank içerisinde deney kumu kademeli olarak serilerek farklı ağırlıklardaki plakalarla sıkıştırılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2. 13 Mini tank içerisinde D_r (%) tayini a) mini tank ve sıkıştırma aparatları b) kontrollü ve kademeli sıkıştırma c) sıkıştırması tamamlanan mini tank

Farklı kombinasyonlar denenerek yapılan bu sıkıştırma aşamaları için aşağıdaki koşullar dikkate alınarak tekrarlanmıştır;

- İlk sıkıştırma işlemi için kum mini tank içerisine en gevşek durumda ve kademeli olarak 10'ar kg dökülerek yüzeyi düzeltilmiştir. Toplam 9 kademedeki 10 kg ve son kademedeki yaklaşık 5 kg olacak şekilde en gevşek durumda yerleştirilen kumun hacmi ve kuru zemin kütlesi bilindiği için γ_k ve Eşitlik 2.1 kullanılarak e değeri hesaplanmıştır. Belirlenen e değerinin Eşitlik 2.2'de yerine yazılması ile D_r (%) yaklaşık %26-%27 olarak belirlenmiştir.
- 2. sıkıştırma işleminde kum her kademeye 10'ar kg olacak şekilde gevşek durumda yerleştirilmiştir. Her kademe için kumun sadece tank dış duvarına belirli sayıda çekiç-tokmak darbeleri ile sıkışması sağlanmıştır. Bu durum için D_r (%) yaklaşık %58-%60 hesaplanmıştır.
- 3. sıkıştırma işleminde kum mini tank içerisine benzer şekilde kademeli olarak dökülmüş ve yüzeyi düzeltilmiştir. Boyutları 20 cm x 20 cm olan ve ağırlığı 1 kg olan metal levha yardımıyla belirli bir vuruş sayısında sıkışması sağlanmıştır. Bu deneme için aynı işlem adımları metal levha ağırlığı değiştirilerek tekrarlanmıştır. Yapılan sıkıştırma işlemleri sonucunda D_r (%) yaklaşık %72-%75 olarak elde edilmiştir.

- 4. sıkıştırma işleminde, her kademe için mini tank içerisine dökülen kum miktarı 5 kg'a indirilmiş ve sıkıştırma işlemi için vuruş sayısı artırılmıştır. Belirli bir vuruş sayısından sonra bu sıkıştırma aşamasını temsil eden sıkı durum için D_r (%) yaklaşık 84 olmuştur.
- 5. sıkıştırma işleminde, 4. sıkışma işlemini temsil eden ve en ideal sıkışmayı sağlayan koşullara ek olarak tank duvarına çekiç-tokmak yardımıyla titreşim uygulanmıştır. Uygulanan titreşimler kumun daha fazla sıkışmasına neden olmuş ve nihai durumda en sıkı durumu temsil eden D_r (%) 90 olarak hesaplanmıştır. Fakat model deney sistemi boyutları dikkate alındığında, tank duvarlarından titreşim uygulamak mümkün olmayacağından bu sıkıştırma aşaması için belirlenen D_r (%) değeri dikkate alınmamıştır.

Tablo 1.1 ve kompaksiyon eğrisinden hesaplanan D_r (%) ile kumun farklı kombinasyonlar sonucu mini tank içerisinde sıkıştırılması sonucu belirlenen D_r (%) değerleri dikkate alındığında tam ölçekli laboratuvar deneylerinde kumun kademeli olarak D_r (%) 80 değerinde serilip sıkıştırılmasına karar verilmiştir.

2.1.4 Dolgu Parametrelerinin Üç Eksenli Deneylerle Belirlenmesi

Yapılacak sayısal analizler için gerekli olan dolgu mukavemet parametreleri (ϕ , E_{50}) Şekil 2.14'te gösterilen Geocomp marka üç eksenli deney aleti kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 2. 14 Üç eksenli deney sisteminin genel görünümü

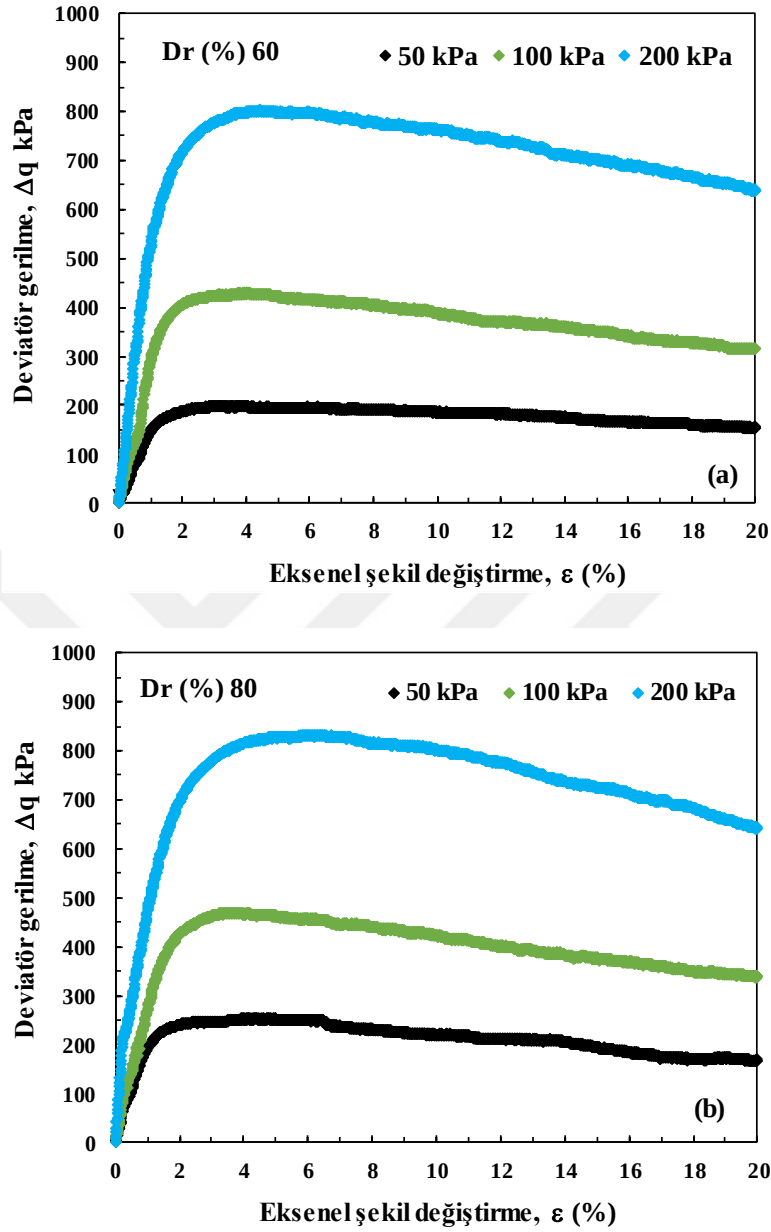
Üç eksenli deneyler için boy/çap oranı 2 olan (14 cm / 7 cm ve 8 cm / 4 cm) iki farklı silindirik numune Dr (%) 60 ve Dr (%) 80’de hazırlanmıştır (Şekil 2.15). Numune hazırlama aşamalarında kapiler etkilerden dolayı numunenin kendisini tutmasını sağlamak için yaklaşık %4 -%5 oranında su eklenmiştir. Numune hazırlama aşamasında membranın dış yüzeyinin metal çepere iyice yapışması için vakum uygulanarak istenilen sıklıkta numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca yapılan üç eksenli tüm deneylerde poroz taşlar ve poroz kağıtlar sıcak suda belirli bir süre bekletildikten sonra kullanılmıştır.



Şekil 2. 15 Üç eksenli numuneler için numune hazırlanması

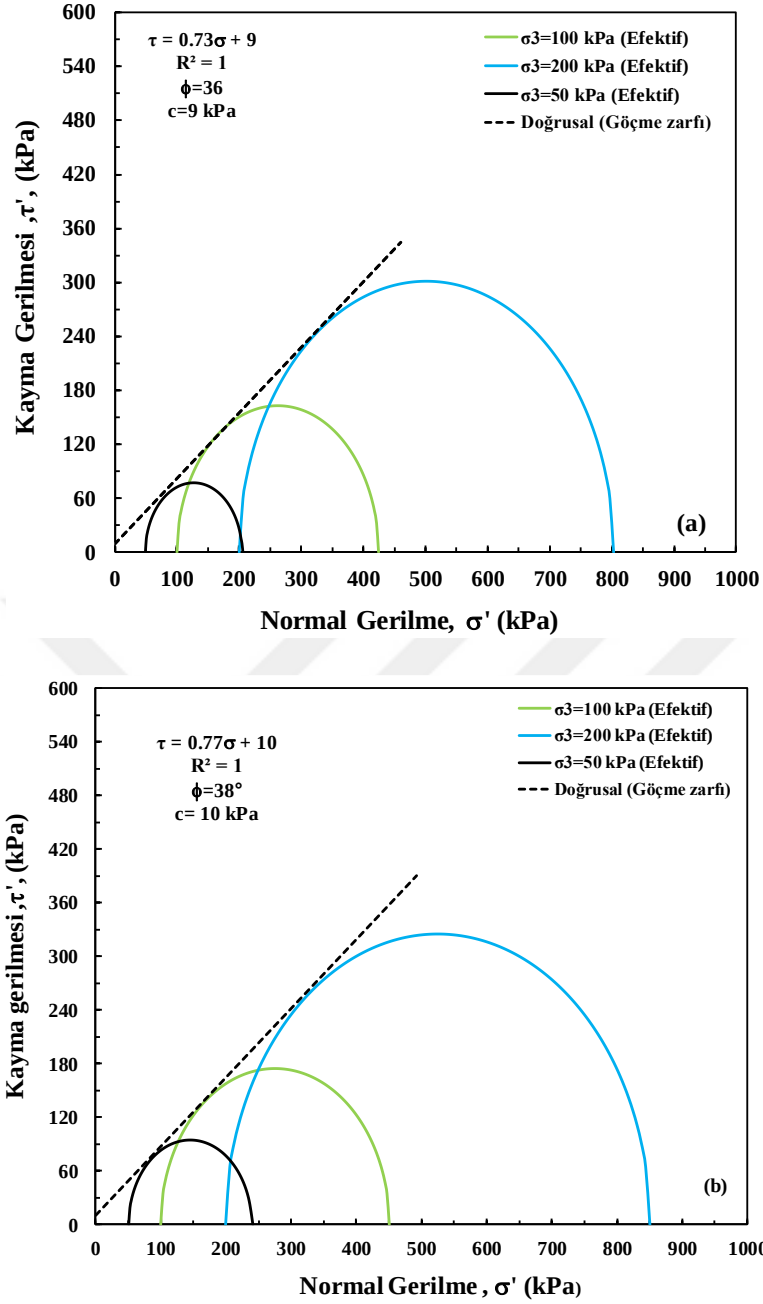
Tam ölçekli laboratuvar deneylerinde dolgu malzemesi tank içerisine kuru halde serilip sıkıştırılacağından, geleneksel üç eksenli deney prosedüründe bazı değişiklikler yapılmıştır. Normal şartlarda üç eksenli deneylere tabi tutulan zeminler suya doymun değilse, zeminlere kademeli olarak ters basınç (back pressure) uygulanır ve belirli bir doymunluğa ulaşması sağlanır. Akabinde konsolide edilen numune kesme aşamasına geçirilir. Belirli bir eksenel şekil değıştirme değerinde veya numune göçtüğünde de deney sonlandırılır. Fakat bu tez çalışması kapsamında %4-%5 su muhtevassında hazırlanan numuneler suya doymunmamış ve deneylere konsolidasyon aşamasından başlanmıştır. Numuneye uygulanan hücre basıncı etkisiyle hacim değışimi tamamlandığında, kesme hızı %0,095 ve %20 eksenel şekil değıştirme için kesme aşamasına geçilmiştir. Bu koşullar altında gerçekleştirilen deneylerde maksimum 1-2 kPa boşluk suyu basıncının oluştuğu gözlemlenmiştir. Dr (%) 60 ve Dr (%) 80 değerleri için hücre basınçları 50 kPa,

100 kPa ve 200 kPa alınarak yapılan deneylerden elde edilen deviator gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.16’da sunulmuştur.



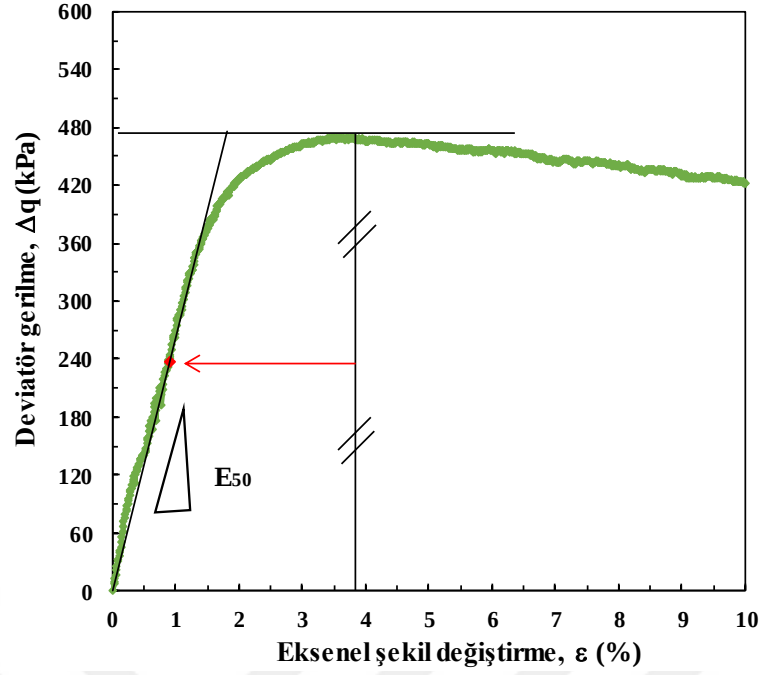
Şekil 2. 16 Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi a) Dr (%) 60 b) Dr (%) 80

Şekil 2.16’daki gerilme şekil değiştirme ilişkisinde %20 aksel şekil değiştirme için maksimum deviator gerilme değerleri kullanılarak elde edilen Mohr-Coloumb göçme zarfları Şekil 2.17’de sunulmuştur. Elde edilen kayma mukavemeti parametreleri, büyük ölçekli direk kesme kutusu deney aleti ile karşılaştırıldığında Dr (%) 80 için 2° küçük ve Dr (%) 60 için 2° büyük hesaplanmıştır. Ayrıca her iki deneyde de yaklaşık 9-10 kPa kohezyon elde edilmiştir.



Şekil 2. 17 Mohr-Coloumb göçme zarfı a) Dr (%) 60 b) Dr (%) 80

Geri dolgu malzemesi için Şekil 2.16'daki Dr (%) 80 ve 100 kPa hücre basıncında yapılan deneyden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi dikkate alınarak sekant elastisite modülü (E_{50}) hesaplanmıştır. Deneyde %3,8 eksenel şekil değiştirmede maksimum deviator gerilme 472 kPa olarak ölçülmüştür. Eğri üzerinde bu deviator gerilme değerinin yarısı ($472/2=236$) yaklaşık olarak %0,9 eksenel şekil değiştirmeye karşılık gelmektedir. Şekil 2.18'de detayları verilen bu nokta ile orjin noktası birleştirildiğinde elde edilecek doğrunun eğimi için Eşitlik 2.1'deki Hooke Kanunu uygulandığında E_{50} değeri 26.222 kPa hesaplanmıştır.



Şekil 2. 18 Gerilme şekil değiştirme eğrisinden E_{50} 'nin belirlenmesi

$$E_{50} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \left(\frac{236}{0,9} \right) * (100) = 26.222 \quad (2.3)$$

2.2 EPS Geofoam İçin Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi

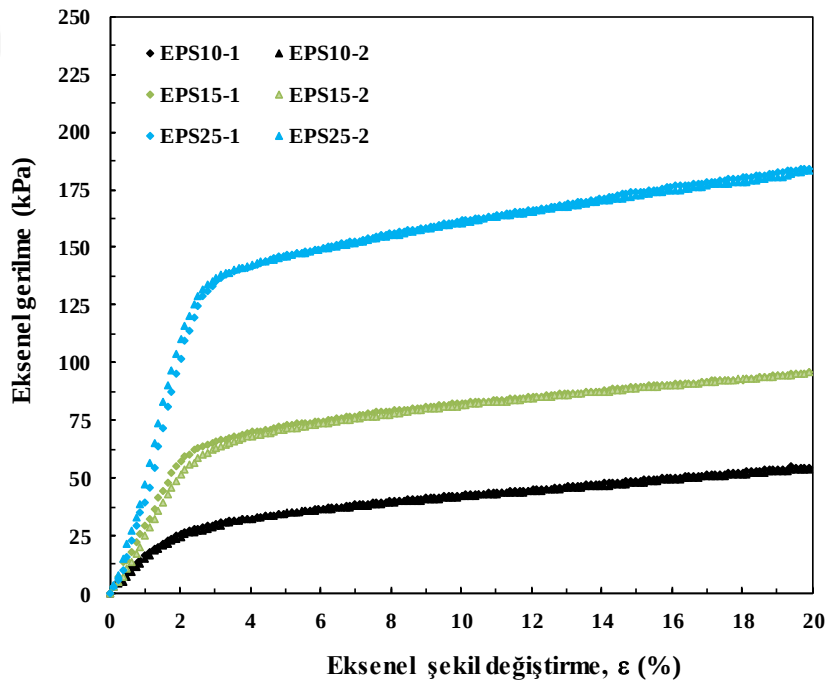
Tam ölçekli laboratuvar model deneylerinde yumuşak bölge (soft zone) olarak kullanılacak EPS Geofoamun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi serbest basınç ve üç eksenli deneylerden belirlenmiştir. Bu deneyler için yetkili firma tarafından üretilen farklı yoğunluk ve farklı boy/çap oranlarına sahip silindirik ve dikdörtgen numuneler kullanılmıştır (Şekil 2.19).



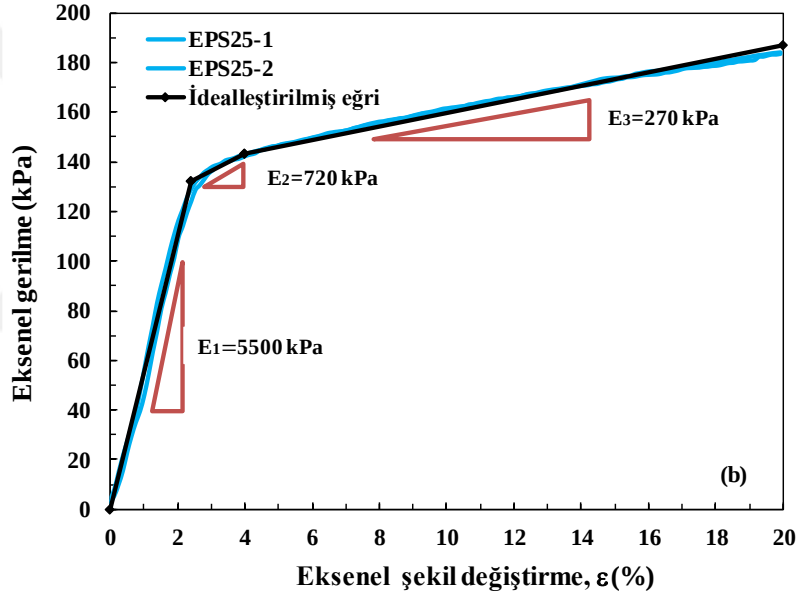
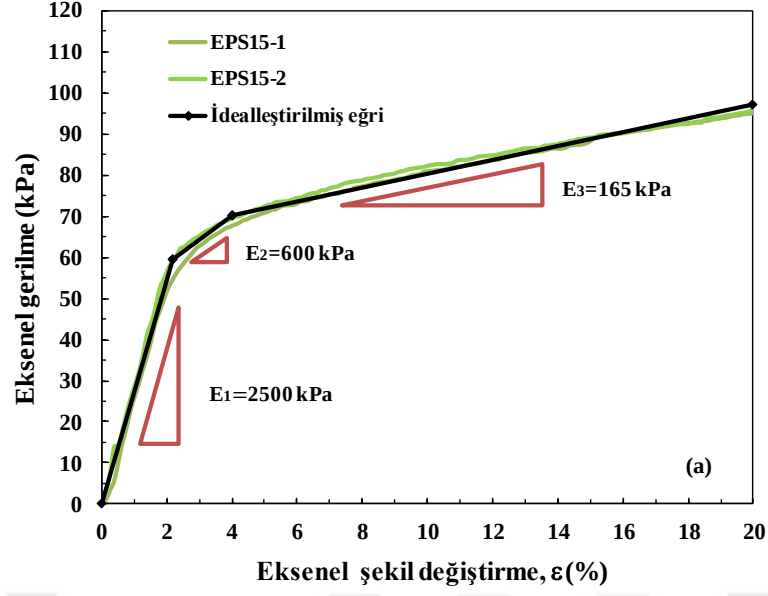
Şekil 2. 19 Farklı boy/çap oranları ve farklı yoğunluktaki EPS numuneler

2.2.1 Serbest Basınç Deneyleri

EPS Geofomun en önemli özelliklerinden biri poisson oranının çok düşük olmasıdır. Yapılan serbest basınç deneyleri sırasında ve deney sonucunda elde edilen yanal çap değişimleri numunenin yanal olarak deforme olmadığı veya çok az olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı yapılan gerilme hesaplamalarında alan düzeltmesi uygulanmamıştır. Tüm serbest basınç deneyleri en az iki numune üzerinde yapılmış ve değerlerin kendi içerisinde hem silindirik hem de dikdörtgen numuneler için oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 2.20’de boy/çap oranları 1 olan silindirik numunelerde yapılan serbest basınç deney sonuçları sunulmuştur. Farklı yoğunluklardaki EPS numuneleri için elde edilen gerilme şekil değiştirme ilişkileri incelendiğinde Şekil 1.29’da ifade edilen Bölge_1; Bölge_2 ve Bölge_3 ile oldukça uyumludur. Bu gerilme-şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak EPS10, EPS15 ve EPS25 için farklı bölgeleri temsil eden E değerleri Akınay (2017) tarafından önerilen yöntem uygulanarak hesaplanmıştır. Şekil 2.21’de bu durumu temsilen EPS15 ve EPS25 için H/D oranı 1 olan silindirik numunelerde gösterilmesine rağmen aynı işlem adımları tüm numunelere uygulanmıştır.



Şekil 2. 20 Boy/çap oranı 1 olan numunelere ait serbest basınç deney sonuçları

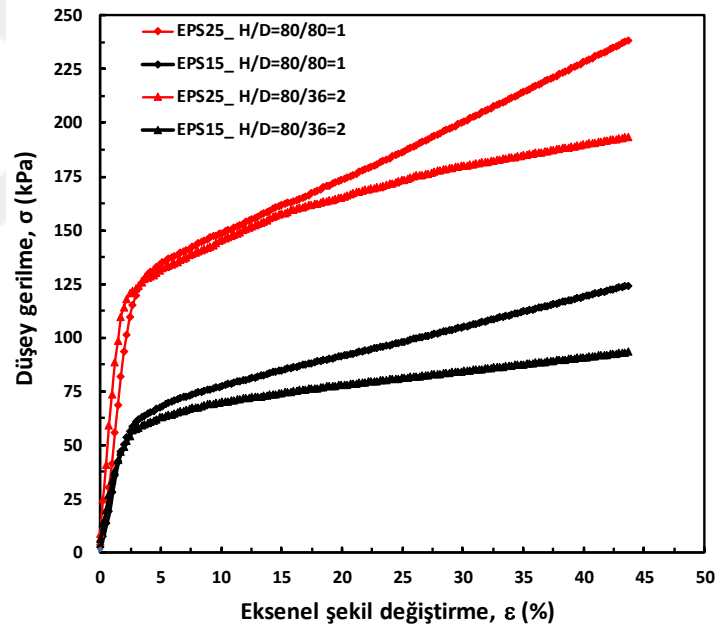


Şekil 2. 21 Farklı bölgeler için E modullerinin elde edilmesi a) EPS15 b) EPS25

H/D veya B/D oranları 2 olan numuneler için serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme şekil değiştirme ilişkileri ile H/D veya B/D oranları 1 olan numunelerden belirlenen gerilme şekil değiştirme ilişkileri yaklaşık olarak $\varepsilon = 5\%$ değerine kadar uyumludur. Fakat artan ε (%) değerlerinde Wong ve Leo (2006)'nın ifade ettiği gibi numunelerde belirgin şekilde eğilme davranışı meydana gelmiştir (Şekil 2.22). Silindirik ve dikdörtgen numunelerde meydana gelen bu eğilme davranışı gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinde farklılıklara neden olmuştur (Şekil 2.23). Bundan dolayı bu çalışma kapsamında H/D veya B/D oranları 1 olan numunelerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri dikkate alınmıştır.



Şekil 2. 22 Serbest basınç deneylerinde EPS Geofoamdaki eğilme davranışı



Şekil 2. 23 Farklı boy/çap ve yoğunluklardaki EPS Geofoam için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

2.2.2 Üç Eksenli Basınç (UU) Deneyleri

Serbest basınç deneylerine tabi tutulan aynı özelliklerdeki numuneler için Şekil 2.14'teki deney aleti kullanılarak üç eksenli (UU) deneyleri yapılmıştır. EPS Geofoamun su emme kapasitesi çok düşük olduğunda, deneyler kum deneylerinde olduğu gibi suya doyurulmadan gerçekleştirilmiştir. Numuneye hüce basıncı uygulandıktan sonra yaklaşık 2-3 dk beklenilmiş ve eksenel yükleme aşamasına

geçilmiştir. Uygulanacak hücre basıncı tayini için serbest basınç deneylerindeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılmıştır. Şekil 2.20'deki her EPS yoğunluğu için elastik bölgenin sınırları ve bu bölgedeki maksimum gerilme değeri belirlenmiş ve bu değerin yaklaşık %25, %50, %75, %100 değerleri hücre basıncı olarak uygulanmıştır. Hücre basıncının büyüklüğüne bağlı olarak kesme aşaması öncesi numunelerde de belirgin deformasyonlar meydana gelmiştir. Özellikle yüksek hücre basınçlarında numunelerin orta bölgelerinde ciddi hacim değişimleri gözlemlenmiştir (Şekil 2.24).

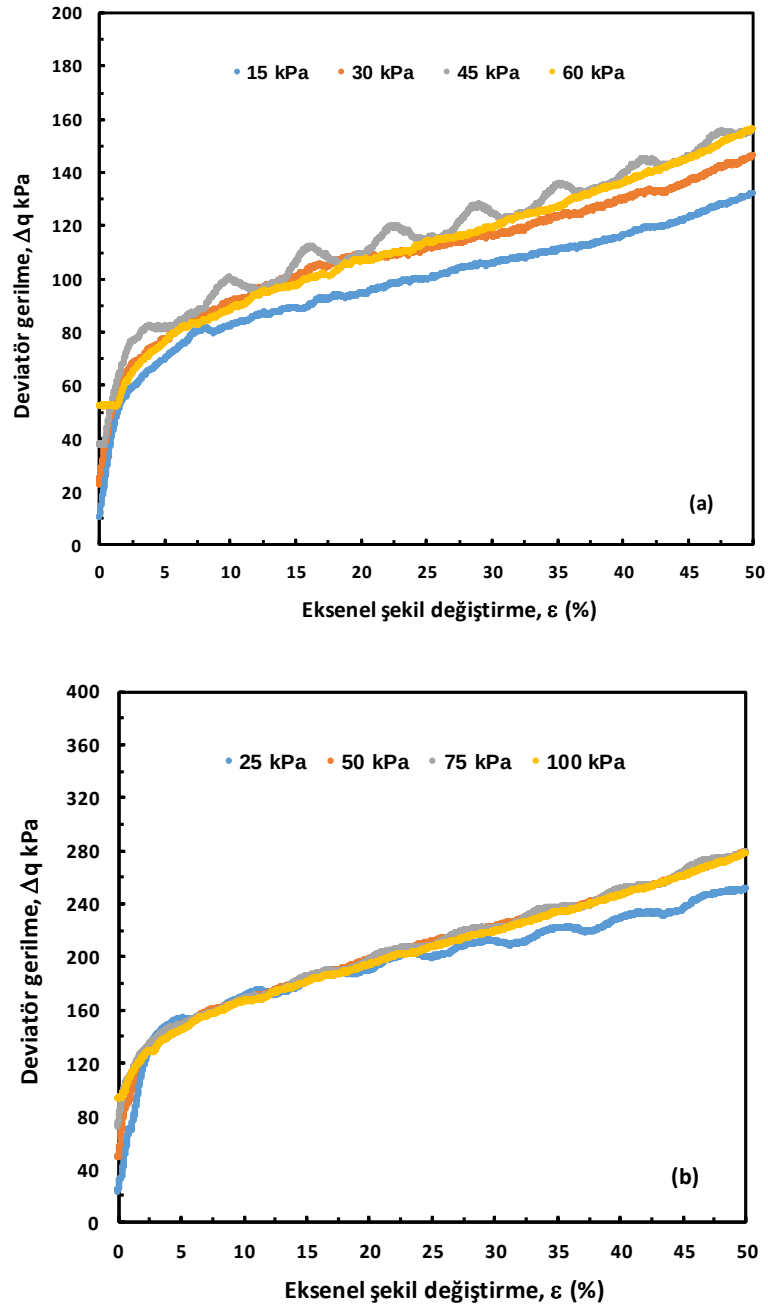


Şekil 2. 24 Hücre basınçlarına bağlı olarak EPS Geofoamdaki hacim değişimleri

Serbest basınç deneylerinde H/D oranı 2 olan numunelerdeki eğilme davranışı üç eksenli deneylerde de meydana gelmiştir. Fakat uygulanan hücre basınçları, bu eğilme davranışının serbest basınç deneylerindeki kadar belirgin olmasını engellemiştir. Numunenin orta bölgelerinde belirgin bir şekilde meydana gelen hacim değişimleri, numunenin alt ve üst noktalarına doğru azalım eğilimindedir. Özellikle numunelerin başlıklara temas ettiği bölgelerde bu değişim oldukça sınırlıdır. Şekil 2.25'te EPS15 ve EPS25 için boy/çap oranı 1 olan numuneler için farklı hücre basınçlarında gerçekleştirilen deneylere ait gerilme-şekil değiştirme ilişkileri sunulmuştur.

Eksenel yükleme aşamasına (kesme aşaması) geçilmeden, hücre basıncı etkisinden dolayı numunelerde meydana gelen eksenel şekil değiştirme değerleri, Şekil

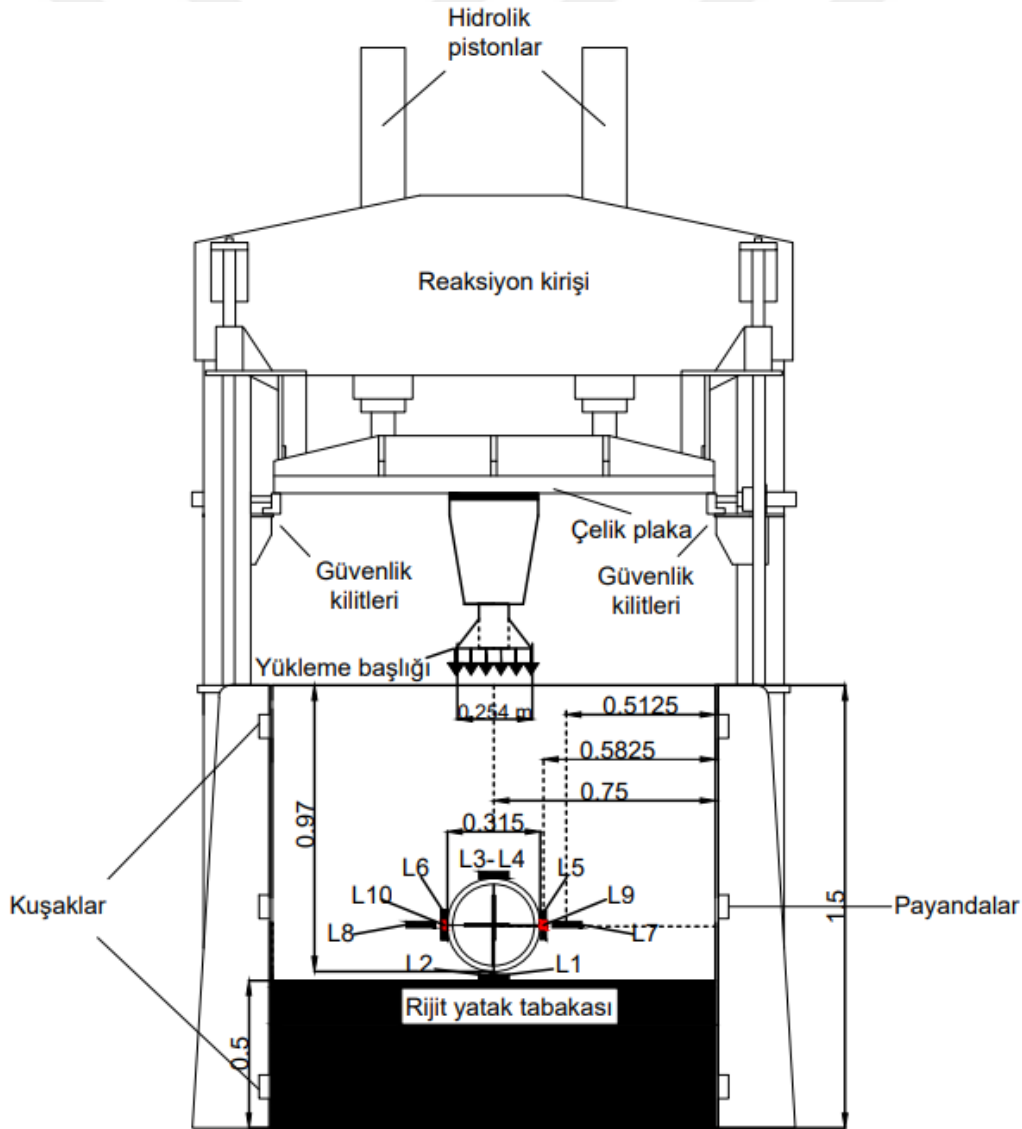
2.25'teki eğrilerin başlangıç noktalarındaki platolara karşılık gelmektedir. Deneylerde uygulanan hücre basıncındaki artış, ölçülen deviatör gerilmelerde EPS15'te %20, EPS25'te %10 artışa neden olmuştur. Elde edilen deviatör gerilme değerleri Şekil 2.20'deki değerlerle karşılaştırıldığında üç eksenli (UU) deney sonuçlarının serbest basınç deney sonuçlarından daha büyük olduğu görülmektedir. Benzer durum Beju ve Mandal (2012) tarafından yapılan deneylerde de gözlemlenmiştir.



Şekil 2. 25 Farklı hücre basınçlarında yapılan üç eksenli deneylere ait gerilme şekil değiştirme ilişkisi a) EPS15 b) EPS25

3.1 Tam Ölçekli Model Deney Sistemi

Boru esneme davranışının ve boru tepesinde farklı yoğunluğa sahip EPS Geofoam kullanımının kemerlenmeye, gerilmelerin dağılımına ve yanıl toprak basıncı katsayısına etkileri Yıldız Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN Geoteknik Laboratuvarında yer alan tam ölçekli model deney sistemi kullanılarak incelenmiştir. Ölçekli çizilen ve tüm ölçüleri metre (m) cinsinden olan deney aletine ait detayları Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3. 1 Tam ölçekli model deney sistemi

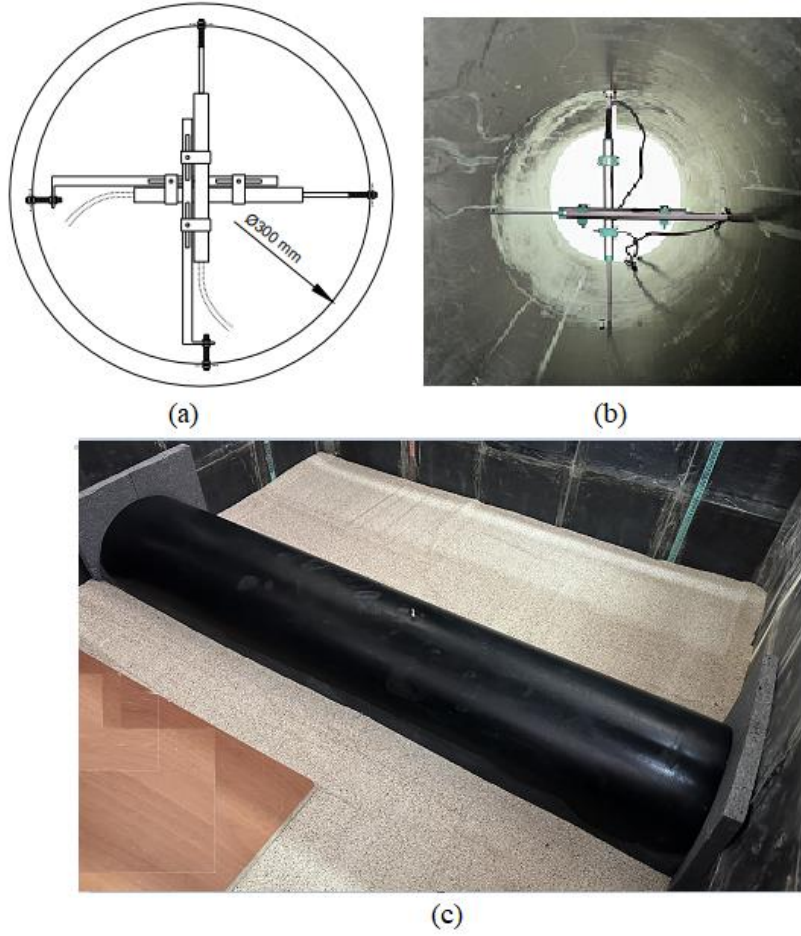
Deney düzeneği 1,5 m x 1,5 m x 1,5 m boyutlarında, üç duvarı 10 mm kalınlığında çelik ve bir duvarı 30 mm kalınlığında saydam pleksiglas olan bir tanktan ve bu tankın üzerinde yer alan toplam 50 ton yükleme kapasitesine sahip iki adet hidrolik pistondan oluşmaktadır. Deney tankının alt noktasından üste doğru ilk 0,50 m'lik kısmı rijit yatak tabakasından oluşmaktadır. Pistonların ucunda düşey yükü zemin yüzeyine unifom yayılı olarak iletecek çelik bir yükleme başlığı yer almaktadır. Bu yükleme başlığının datayları Bölüm 3.2'de ifade edildiği gibi şerit yükleme koşulları için eni 0,254 m, boyu 1,46 m ve yüksekliği 0,05 m olan çelik bir başlık entegre edilmiştir. Pistonların üzerinde yer aldığı reaksiyon kirişi diğer elemanlarla birlikte bir yük çerçevesi oluşturmaktadır. Tank duvarlarının yanal yükler altında dışa doğru hareketini engellemek ve deneyler boyunca Ko koşulunu sabit tutmak için çelik payandalar ve kuşaklar ile güçlendirme yapılmıştır. Ölçekli çizilen ve tüm birimleri metre cinsinden olan tam ölçekli model deney sisteminin detayları Şekil 3.1'de sunulmuştur. Gerçekleştirilen deneylerde belirlenen noktalardaki gerilme ölçümleri için gerilme ölçerler kullanılırken, boru esnemelerini belirlemek için boru içerisine potansiyometreler ve yüzeysel oturmaları ölçmek için lineer değişken diferansiyel transformatörler (LVDT) kullanılmıştır.

3.2 Hazırlık Aşamaları

Bu bölümde tam ölçekli laboratuvar deneyler için yapılan hazırlıklar ve deney sistemi ile ilgili detaylar sunulacaktır. Yapılan hazırlık aşamaları sırasıyla deney borusunun temini ve boru içerisine potansiyometrelerin sabitlenmesi, deneyler sırasında yüzeysel oturmaların belirlenmesi için deney sistemine LVDT'lerin yerleştirilmesi, tank duvarlarının her deney öncesi Tognon vd. (1999) tarafından önerilen şekilde iyileştirilmesi, gerilme ölçümleri için kullanılacak gerilme ölçerlerin kalibrasyonu, yükleme başlığının ve deney sistemine ait yazılımın revizyonu olarak alt başlıklar halinde açıklanacaktır.

3.2.1 Deney Borusu ve Potansiyometrelerin Yerleştirilmesi

Deneylerde yüksek yoğunluklu polietilen ham maddesinden üretilmiş düz duvarlı, dış çapı 0,315 m, iç çapı 0,275 m, et kalınlığı 0,02 m ve yoğunluğu 970 kg/m³ olan HDPE boru kullanılmıştır (PN10). Tam ölçekli laboratuvar deneylerinde borunun orta kesitinde meydana gelen yatay ve düşey çap değişimleri iki adet Burster 8709-5100 marka potansiyometre ile belirlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2 Deney borusu ve potansiyometreler a) potansiyometrelerin şematiği
b) potansiyometrelerin boru içerisindeki görünümü c) deney borusu

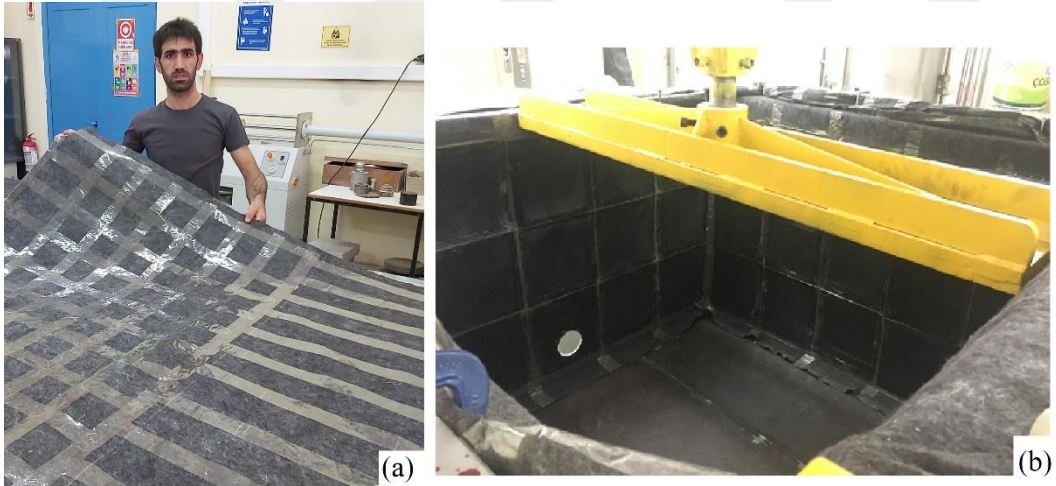
3.2.2 Tank Duvarlarının İyileştirilmesi

Tam ölçekli deneylerde zemin yüzeyinden uygulanan yükün bir kısmı zemin-tank duvarı ara yüzey etkileşimi sonucu sürtünmeye harcanacaktır. Bu sürtünmeyi minimize etmek için Tognon vd. (1999) tarafından önerilen yöntem her deney öncesinde tank duvarlarına uygulanmıştır. Önerilen uygulama için Dow Corning Molykote 44 High Temperature Bearing Grease-Medium ile kayganlaştırılmış iki kat 0.008 mm kalınlığındaki polietilen film, danelerin bu filme batmasını ve ya zarar vermesini önlemek için bu katmanın üstüne örgüsüz geotekstil ve 2 mm kalınlığında HDPE geomembran koruyucu tabakadan oluşmaktadır (Şekil 3.3). Önerilen bu uygulama için öncelikle şeffaf polietilen filmlerden biri çift taraflı yapışkan bant kullanılarak tank duvarına sabitlenir ve Dow Corning Molykote 44 High Temperature Bearing Grease-Medium kayganlaştırıcı, ince başlıklı fırça ile sürülür. İkinci polietilen film bu kayganlaştırıcı tabaka üzerine yapıştırılır.

Akabinde koruyucu geotekstil ve geomembran tabakası ile iyileştirme işlemi tamamlanır (Şekil 3.4).



Şekil 3. 3 Tank duvarlarının iyileştirilmesi a) özel kayganlaştırıcı b) polietilen c) örgüsüz geotekstil d) HDPE geomembran



Şekil 3. 4 Tank duvarlarının iyileştirilmesi a) örgüsüz geotekstilin koli bandı ile güçlendirilmesi b) nihai durumda iyileştirilmiş katman

Tognon vd. (1999) tarafından önerilen bu yöntemin uygulanması sonucu ara yüzey sürtünme açısının 5° 'ye kadar azaldığını ifade etmiştir. Önerilen bu yöntemin olumlu katkısından dolayı farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalarda uygulanmıştır (Brachman vd, 2001; Akınay, 2017). Özellikle Akınay

(2017) büyük ölçekli direk kesme kutusunda Tognon vd. (1999) tarafından önerilen yöntemi test etmiş ve ara yüzey sürtünme açısını 6° olarak hesaplamıştır. Bu değer Tognon vd. (1999) tarafından belirtilen değere oldukça yakındır.

3.2.3 Gerilme Ölçerlerin Kalibrasyonu

Tam ölçekli deneylerde boru çevresindeki spesifik noktalardan gerilme ölçümleri için 3 farklı özellikte toplam 12 gerilme ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3. 5 Gerilme ölçümleri için kullanılan farklı boyutlardaki loadceller

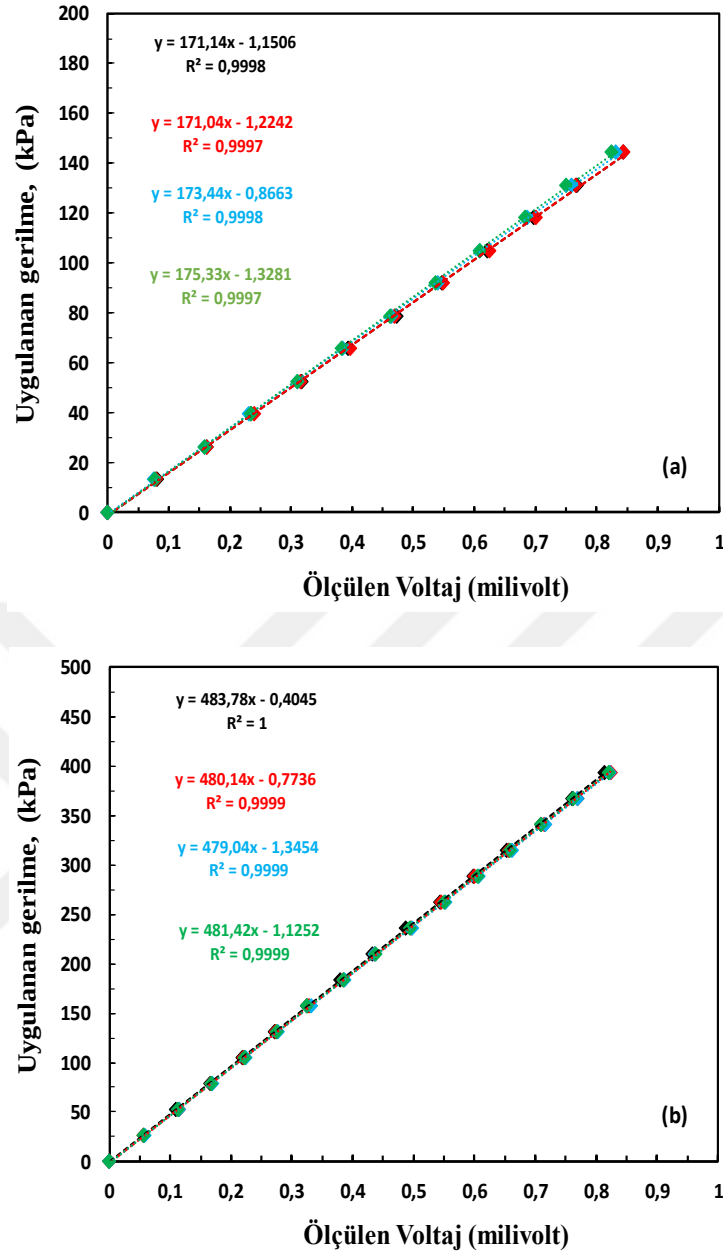
Bu üç tip gerilme ölçerlerden ilki TML KDG marka gerilme ölçerlerin dış çapı 10 cm, ölçüm alan efektif iç çapı 8 cm, yüksekliği 2 cm'dir. 4'ü 200 kPa ve 4'ü 500 kPa kapasiteli olan bu gerilme ölçerler L (large) sembolü ile gösterilmiştir. İkinci tip gerilme ölçerlerin ölçüm alan efektif iç çapları 3 cm, yüksekliği 2 cm'dir. Kapasiteleri 3000 kPa olan ve iki adet olan bu gerilme ölçerleri için M (medium) sembolü kullanılmıştır. Son olarak dış ve efektif çapı 0,75 cm, yüksekliği 0,2 cm olan 2 adet mini TML KDG 500 kPa kapasiteli gerilme ölçer tercih edilmiştir. Diğer gerilme ölçerlere göre oldukça küçük olan bu gerilme ölçerler S (small) simgesi ile temsil edilmiştir. Kullanılan toplam 12 adet gerilme ölçerlerin maksimum çalışma sıcaklığı 60°C ve minimum çalışma sıcaklığı -20°C 'dir. Deneyler boyunca laboratuvar sıcaklığı gerilme ölçerlerin çalışma sınırları içinde kalmış, böylece ortam sıcaklığının performansları üzerindeki etkisi en aza indirgenmiştir. Ayrıca gerilme ölçerlerin belirli sıcaklık aralıkları için kalibrasyon sertifikaları ilgili firmalardan temin edilse de, tüm gerilme ölçerler laboratuvar ortamında serbest basınç deney aleti ve dolgu içerisinde kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Kalibrasyon aşamalarından elde edilen sonuçlar, kalibrasyon sertifikasındaki değerlere yakın olsa da tez çalışması kapsamında yapılan hesaplamalarda deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.



Şekil 3. 6 Gerilme ölçerlerin kalibrasyon aşamalarına ait kesit

TML KDG ve 500 kPa ve 200 kapasiteli L tipi gerilme ölçerler için bu kalibrasyon işlemleri aşağıda özetlenmiştir;

- Kullanılan tüm gerilme ölçerler milivolt cinsinden bir kapasiteye sahiptir. Yani bilgisayar destekli veri toplama sistemine (SPARTAN) bağlı olarak çalışan bu gerilme ölçerlerin yükleme altındaki çıktı verisi milivolt cinsindendir. Başka bir deyişle 500 kPa kapasiteye sahip bir gerilme ölçerinin milivolt cinsinden kapasitesi 1 milivolttur.
- Kalibrasyon aşamaları için gerilme ölçerlerin efektif alanı ve bu alana uygulanan yük değeri bilinmektedir. Uygulanan yük, efektif alana bölünerek gerilme ölçere uygulanan gerilme değerleri hesaplanmıştır.
- Gerilme ölçerler, bu gerilme değerinin büyüklüğüne bağlı olarak milivolt üretir. SPARTAN’da toplanan bu veriler bilgisayar destekli İMC Studio yazılımı ile her aşamada kaydedilmiştir.
- Uygulanan gerilme değeri ile ölçülen milivolt değerleri arasında lineer bir ilişki vardır ve bu ilişki kullanılarak gerilme değeri- milivolt değişimi çizilmiştir.
- Elde edilen doğrunun denklemi kullanılarak milivolt değerlerinden gerilme değeri hesaplanmıştır (Şekil 3.7).
- Gerilme ölçerlerin kapasiteleri, kalibrasyon işlemlerinde göz önünde bulundurulmuştur. Kalibrasyon aşamalarında gerilme ölçerlere uygulanan maksimum gerilmeler, hücre kapasitenin yaklaşık %80’i mertebesinde.

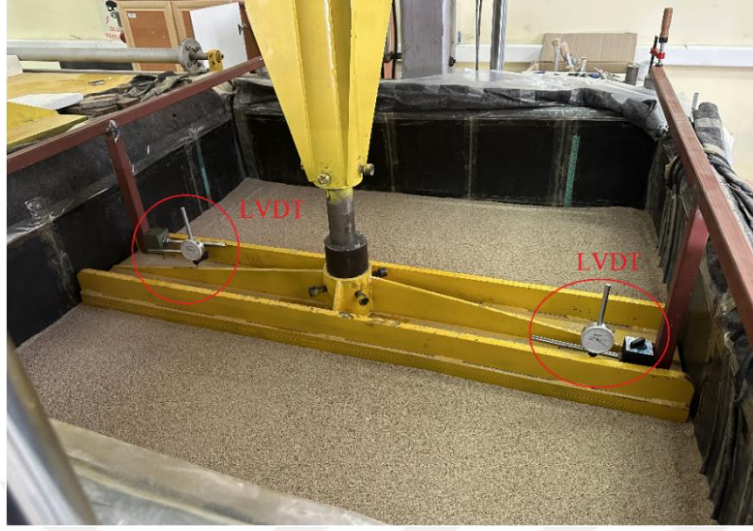


Şekil 3. 7 L tipi gerilme ölçer için kalibrasyon sonuçları a) 200 kPa kapasiteli
b) 500 kPa kapasiteli

3.2.4 Deney Sistemine LVDT'lerin Yerleştirilmesi

Hizmet süresi boyunca gömülü boru sistemlerinde meydana gelecek yüzeysel oturmalar yol üst yapısının performansı ve hizmet verebilirliği için önemli bir parametredir. Dolgu, boru ve EPS kullanımına bağlı olarak meydana gelecek yüzeysel oturmaların belirlenmesi için 10 cm uzama-kısalma kapasitesine sahip 2 adet LVDT kullanılmıştır. Deney tankının üst kısmındaki metal kirişlere mıknatıs yardımıyla sabitlenen bu LVDT'ler boru boyuna doğrultusunda yer alan tank

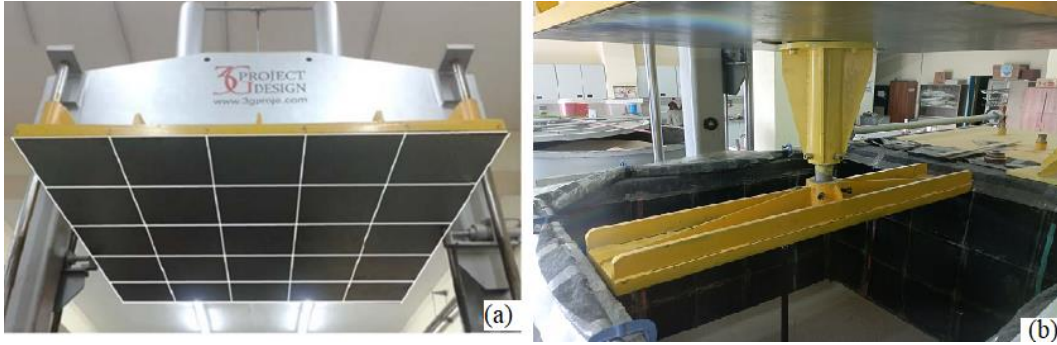
duvarlarından 35 cm öteye yerleştirilmiştir (Şekil 3.8). Deneyler sırasında yükleme kademelerine bağlı olarak manuel alınan ölçümler deney boyunca kaydedilmiştir.



Şekil 3. 8 Yüzeysel oturmalar için kullanılan LVDT'lerin konumu

3.2.5 Yükleme Başlığının ve Yazılımın Revizyonu

Gömülü boru sistemlerinin gömülme derinliği dikkate alındığında farklı yükleme koşullarına maruz kalır. Bundan dolayı laboratuvarımızda uniform yayılı yükleme koşulları için elverişli olan yükleme başlığında revizyonlar yapılarak şerit yükleme koşullarına uygun bir başlık entegre edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3. 9 Yükleme başlığındaki revizyon a) öncesi b) sonrası

Hidrolik basınç sistemine sahip model deney sisteminin yükleme aşamaları otomatik ve ya manuel olarak kontrol panelinden ayarlanabilmektedir. Kontrol paneli için ilgili firma tarafından geliştirilen yazılım sayesinde tam ölçekli deneyler farklı yükleme kademelerinde, her yükleme kademesinde istenilen sürede ve istenilen gerilme seviyesinde ayarlanabilir duruma getirilmiştir (Şekil 3.10). Deney

öncesi yazılıma deney prosedürü tanımlandıktan sonra deney süresi boyunca ilerleme otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 10 Deney sistemi için control paneli ve yazılım ara yüzü

3.3 Tam Ölçekli Laboratuvar Model Deneyleri

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tam ölçekli model deneyler; kum deneyi (S deneyi), borulu deney (P deneyi) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler (E1 ve E2 deneyleri) olmak üzere üç başlık altında açıklanacaktır. EPS Geofoam kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ise kendi içerisinde EPS yoğunluğu ve kullanım yeri dikkate alınarak adlandırılmıştır. Boru taç bölgesinde EPS15 ve EPS25 kullanılarak yapılan deneyler sırasıyla EPS1-15 ve E1-25 deneyleri olarak ifade edilirken, boru çevresinde EPS15 ve EPS25 kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ise sırasıyla E2-15 ve EPS2-25 deneyleri olarak adlandırılmıştır.

3.3.1 Kum Deneyi (S Deneyi)

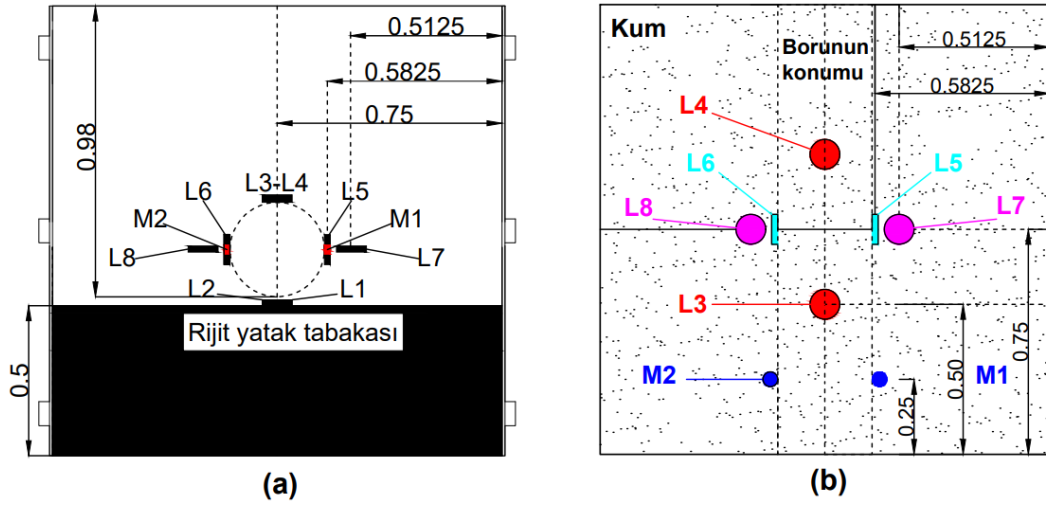
Borulu (P) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde (E1 ve E2 deneyleri) gerilme ölçerlerden sağlıklı veri elde edilmesi, deney sisteminin çalışma performansının test edilmesi ve kumun malzeme özelliklerinin (E, ϕ) kontrol edilmesi amacıyla kum deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde uygulanan deney kurulum prosedürü P ve E deneylerinde de aynen uygulandığı için bu bölüm detaylandırılacaktır.

Tam ölçekli deneylerde kumun %80 rölatif sıkılıkta sıkıştırılacağı Bölüm 2’de nedenleri ile ifade edilmiştir. Belirlenen bu D_r (%) için kumun kuru birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak 17 kN/m^3 ’tür. Tognon vd. (1999) tarafından önerilen yöntem kullanılarak iyileştirilen tank duvarlarının boyutları $1,48 \text{ m} \times 1,48 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ’dir. Geri dolgunun kontrollü ve kademeli sıkıştırılması sağlamak için bu tank duvarları ölçeklendirilmiştir. Bu işlemden sonra kademeli olarak 5 cm yüksekliğindeki tabakalar halinde serilip plakalarla sıkıştırılması öngörülmüştür. Bu sıkıştırma işlemleri sonucunda kumun kuru birim hacim ağırlığının 17 kN/m^3 olması için $1,48 \text{ m} \times 1,48 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$ boyutlarındaki hacme yaklaşık olarak 190 kg kumun kontrollü sıkışması sağlanmıştır. Dolgunun istenen birim hacim ağırlık değerinde sıkışıp sıkışmadığını kontrol etmek için sıkıştırma öncesinde çapı $0,05 \text{ m}$ ve yüksekliği $0,045 \text{ m}$ olan sekiz kalıp tank içersinde farklı bölgelere yerleştirilmiş ve deneylerden sonra dikkatli bir şekilde çıkarılarak tartılmıştır (Şekil 3.11a).



Şekil 3. 11 Kumun kontrollü sıkıştırılması a) γ_k kontrolü b) sıkıştırma plakaları ve tank duvarlarının ölçeklendirilmesi

Kademeli olarak gerçekleştirilen sıkıştırma işlemleri özel olarak imal edilen 2 adet çelik sıkıştırma plakası kullanılarak yapılmıştır. Bu plakalardan biri $2,5 \text{ kg}$ ve boyutları $0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$ iken, diğeri $4,5 \text{ kg}$ ve boyutları $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 0,02 \text{ m}$ ’dir (Şekil 3.11b). Bu sıkıştırma işlemleri boru çapı dikkate alınarak boru taç bölgesinin üstünde boru çapı ($D=31,5 \text{ cm}$) kadar bir mesafeye kadar devam edilmiştir. Yani nihai durumda kum deneylerinde toplam $2D$ (63 cm) yüksekliğindeki kum 5 cm kalınlığındaki tabakalar halinde serilip sıkıştırılmıştır. Gerilme ölçümleri için kullanılan gerilme ölçerler bu sıkışma aşamalarında ilgili konumlara yerleştirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3. 12 Kum deneyi için gerilme ölçerlerin konumu a) kesit b) plan

Borunun konumu göz önüne alındığında, TML KDG-500 kPa kapasiteli dört gerilme ölçer stratejik olarak borunun uç noktalarının temas ettiği tank duvarından 0,50 m uzağa yerleştirilmiştir. Bunlardan L3 ve L4 gerilme ölçerleri borunun taç bölgelerindeki ve L1 ve L2 gerilme ölçerleri borunun tabanındaki düşey gerilmeleri belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 3.12b’de görülmeyen L1 ve L2 gerilme ölçerleri L3 ve L4 ile benzer konumlarda yer almaktadır. Yüksekliği 2 cm olan L1 ve L2’in sıkıştırma aşamalarında plaka darbelerine bağlı olarak konumlarının değişmemesi için rijit tank tabanına çift taraflı yapışkan bant ile sabitlenmiştir. Boru yatay simetri eksenindeki (springline) yatay zemin gerilmeleri TML KDG-200 kPa kapasiteli L5 ve L6 kullanılarak belirlenmiştir. Bu hücreler kum deneylerinde kum içersinde serbest haldeyken borulu deneylerde çift taraflı yapışkan bant kullanılarak boru duvarına sabitlenmiştir. Ayrıca, boru çevresindeki düşey gerilmeleri ölçmek için dört hücreden oluşan başka bir set kullanılmıştır. Bunlardan ilk ikisi TML KDG-200 kPa kapasiteli L7 ve L8 olup merkezleri yatay simetri ekseninden 8 cm sağında ve 8 cm solunda yer almaktadır. L tipi gerilme ölçerlere oranla daha küçük olan M1 ve M2 gerilme ölçerlerin merkezleri boru yatay simetri ekseninin 1,5 cm sağına ve 1,5 cm soluna yerleştirilmiştir. Özellikle yükleme kademelerine bağlı olarak gerilme ölçerlerden sağlıklı ve uyumlu veri elde edilmesi amacıyla kullanılan gerilme ölçerler ince kum kullanılarak yastık yapılmıştır. Gerilme ölçerler yastıklı ve yastıksız kullanımını içeren tekrarlı kum deneyleri sonucunda başlık uygulaması ile gerilme ölçerlerin daha efektif çalışması sağlanmıştır.



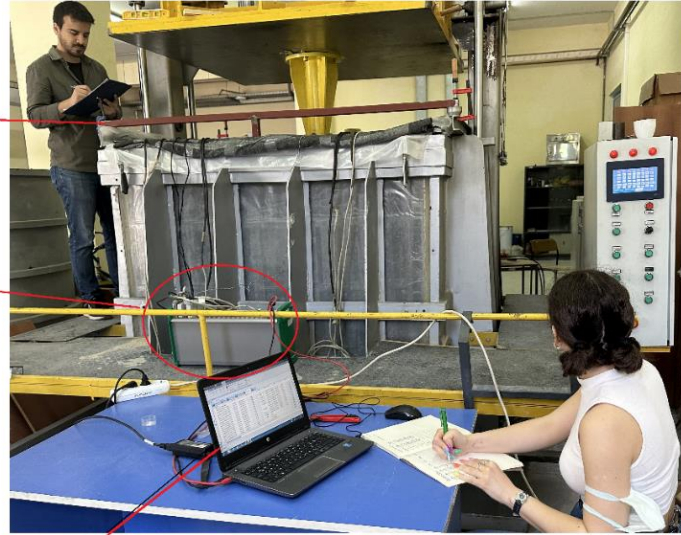
Şekil 3. 13 Gerilme ölçerlerin daha efektif çalışması için başlık uygulaması

Dolgunun kontrollü bir şekilde kademeli olarak sıkıştırılması ve gerilme ölçerlerin belirlenen konumlara yerleştirilmesinden sonra zemin üst kotu düzeltilmiş ve yükleme başlığı zemin üst kotuna temas ettirilmiştir. LVDT'lerin yükleme başlığına yerleştirilmesinden sonra yükleme aşamalarına geçilmiştir. Şerit yükleme koşulları altında gömülü bir boru sistemine etki eden yükler Şekil 3.11b'de gösterildiği gibi borunun orta kesiti ile tam olarak hizalanan ve boyutları 0,254 m x 1,45 m x 0,05 m olan yükleme başlığı yardımıyla zemin üst kotuna aktarılmıştır. Toplamda 8 aşamada gerçekleştirilen yükleme aşamaları için ilk kademede 22,5 kN'lük bir yük (yaklaşık 60 kPa) uygulanmıştır. Bir sonraki yükleme kademesi, bu ilk yükleme aşamasındaki yüzeysel oturmalar tamamlandığında başlamıştır. Her aşaması yaklaşık 10 dakika süren yükleme aşamalarında sırasıyla 34 kN (90 kPa), 49 kN (130 kPa), 64 kN (170 kPa), 79 kN (210 kPa), 94 kN (250 kPa), 109 kN (290 kPa) ve 120 kN (320 kPa) yükler uygulanmıştır (Şekil 3.10). Deney sisteminin efektif kapasitesi ve yüzeysel oturmaların derecesi uygulanan yüklerin büyüklüğünün belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Deneyler sırasında her yükleme adımı için gerilme ölçerlerden ve potansiyometrelerden alınan ölçümler veri toplama sistemine (SPARTAN) bağlı olan bilgisayarda İMC Sstudio yazılımıyla; LVDT okumaları manuel olarak anlık kaydedilmiştir (Şekil 3.14).

Yüzeysel oturumaların
manue olarak
kaydedilmesi

64 kanallı veri
toplama sistemi

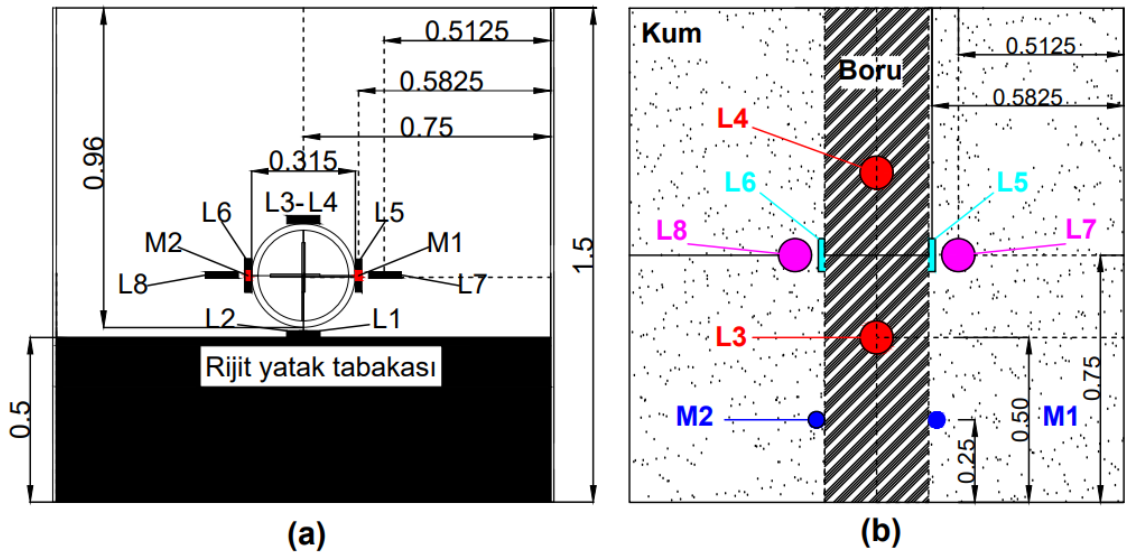
Bilgisayar destekli İMC
Studio yazılımı



Şekil 3. 14 Yükleme aşamasına ait görsel

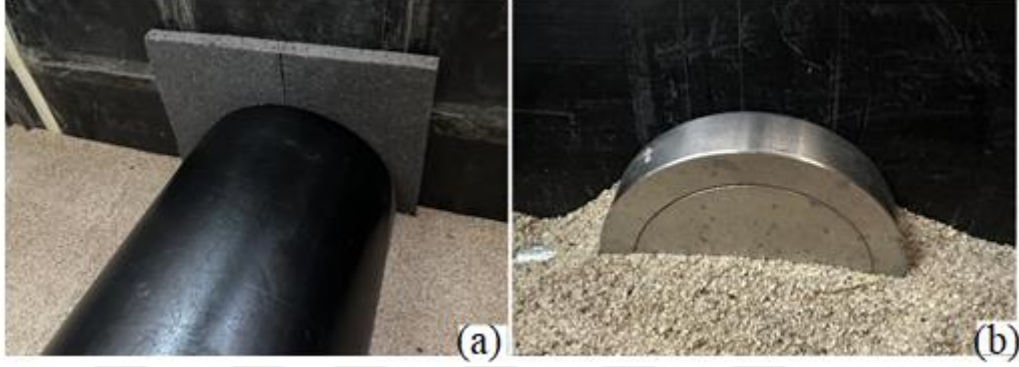
3.3.2 Borulu Deney (P Deneyi)

Kum deneylerinde izlenen deney prosedürü borulu deneyde de aynen uygulanmıştır. Deney tankında borunun olması nedeniyle bazı küçük değişiklikler yapılmıştır. Rijit tank tabanında kullanılan L1 ve L2 gerilme ölçerlerinin yüksekliği 2 cm olduğundan, borunun bu rijit gerilme ölçerlerden etkilenmemesi için L1 ve L2 tank tabanına sabitlendikten sonra 3-4 cm kum ile doldurup sıkıştırılmıştır. Nihai durumda gerilme ölçerler tamamen zemin içerisine gömülmüş ve boru tabanı zemin tabakasına oturtulmuştur (Şekil 3.15).



Şekil 3. 15 Borulu deneyde gerilme ölçerlerin ve borunun konumu a) kesit b) plan

142 cm uzunluğundaki boru sıkıştırılan bu kum tabakası üzerine konumlandırılmıştır. Yükleme kademelerine bağlı olarak meydana gelecek boru esnemelerinden dolayı boru içersine kum girişini engellemek için XPS25 kullanılarak başlık yapılmıştır (Şekil 3.16a). Ayrıca boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmeleri belirlemek için kullanılan L5 ve L6 gerilme ölçerlere yastık tabakası uygulanmadan boru duvarına sabitlenmiştir (Şekil 3.16b).

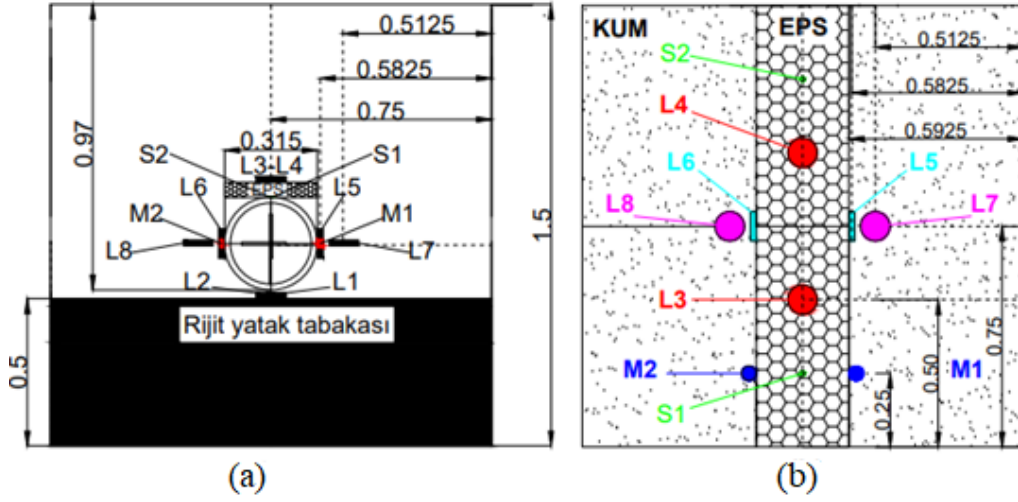


Şekil 3. 16 Borulu deney için görseller a) boru içersine zemin girişi önlemek için yapılan uygulam b) L5-L6 gerilme ölçerlerin konumu

Geri dolgu malzemesinin kontrollü sıkıştırılması ve gerilme ölçerlerin konumlandırılması sonucunda yükleme aşamalarına geçilmiş ve borulu deney başarı ile tamamlanmıştır.

3.3.3 EPS Geofoam ile Desteklenen Borulu Deneyler (E1 ve E2 Deneyleri)

Borulu deneyde uygulanan deney prosedürü, boru tepesinde EPS15 ve EPS25 kullanılarak E1 deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde genişliği 1D, uzunluğu 142 cm ve kalınlığı 5 cm olan EPS Geofoam kullanımından dolayı bazı gerilme ölçerlerin konumunda değişiklik yapılmıştır. Kum (S) ve borulu (P) deneylerinde boru taç kotunda kullanılan L3 ve L4 EPS Geofoamun üst kotunda konumlandırılırken, borunun taç bölgesinde yani EPS Geofoamun hemen altında S tipi iki adet mini gerilme ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.17). Kurulumu tamamlanan E1-15 ve E1-25 deneyleri kum (S) ve borulu (P) deneylerinde olduğu gibi kademeli yüklemeye tabi tutulmuştur. Gerekli ölçümler elde edildikten sonra bu deney aşaması başarı ile tamamlanmıştır.



Şekil 3. 17 EPS Geofoam ile desteklenen borulu deney için gerilme ölçerlerin ve EPS'nin konumu a) kesit b) plan

EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler tamamlandıktan sonra boru çevresinde EPS Geofoam kullanımını içeren ve detayları Şekil 3.18'de verilen E2-15 ve E2-25 deneylerine geçilmiştir. Boruyu çepeçevre saran EPS Geofoam için kalınlıklar taç ve tabanda 5 cm iken yatay simetri ekseninde 2 cm'dir. Deneylerde EPS Geofoamun aşırı oturması ve deney sisteminden kaynaklanan yükleme hatalarından dolayı sağlıklı veri alınamamıştır. Tekrarlanan deneylerde aynı sorunlarla karşılaşmıştır. Bundan dolayı E2 deneyleri bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.



Şekil 3. 18 E2 deneylerine ait görseller

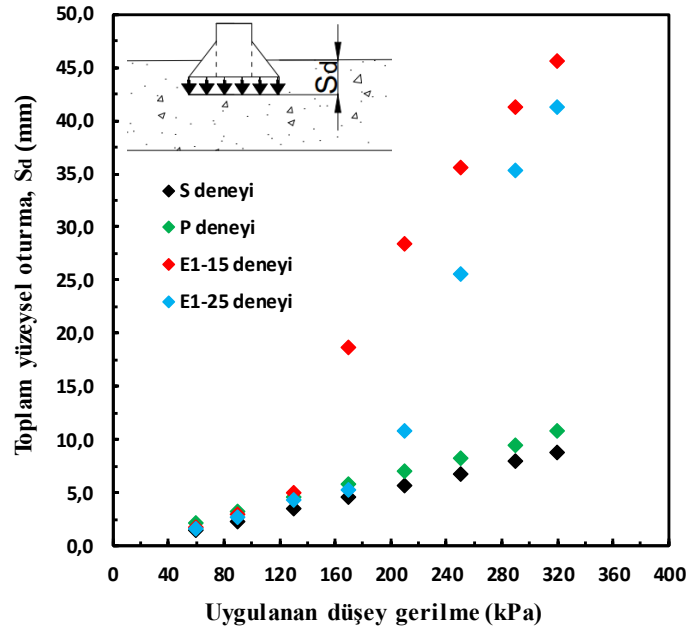
Tam ölçekli model deneyler tamamlandıktan sonra elde edilen tüm millivolt çıktı verileri kalibrasyon aşamalarından elde edilen denklemler kullanılarak gerilme ve deformasyonlara dönüştürülmüştür. Bu sonuçlar sayısal analizlerden elde edilen değerlerle karşılaştırmalı olarak Bölüm 5'te sunulacaktır.

DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Şerit yüklemeye maruz kalan tam ölçekli model kum (S), borulu (P) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu (E1) deneylerine ait gerilme ve deformasyon ölçümleri bu bölümde sunulacaktır. Ölçümlere ait değerlendirmeler Bölüm 6’da sayısal analiz sonuçları ile birlikte yapılacaktır. Gerilme ölçümleri için simetrik olarak yerleştirilen aynı özelliklere sahip gerilme ölçerlerden ve yüzeysel oturmalar için LVDT’lerden elde edilen ölçümlerin ortalaması alınarak tek bir değer olarak dikkate alınmıştır.

4.1 Yüzeysel Oturmalar (S_d)

Kum (S), borulu (P) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu (E1-15 ve E1-25) deneylerindeki yüzeysel oturmalar Şekil 3. 8’de gösterildiği gibi yükleme plakası üst kotuna yerleştirilen 2 adet LVDT kullanılarak ölçülmüştür. Şerit yükleme koşullarına maruz kalan tam ölçekli deneylerden ölçülen yüzeysel oturmalar ve bu yüzeysel oturmaların uygulanan sürşarj gerilmelerine bağlı olarak değişimi Şekil 4.1’de sunulmuştur.

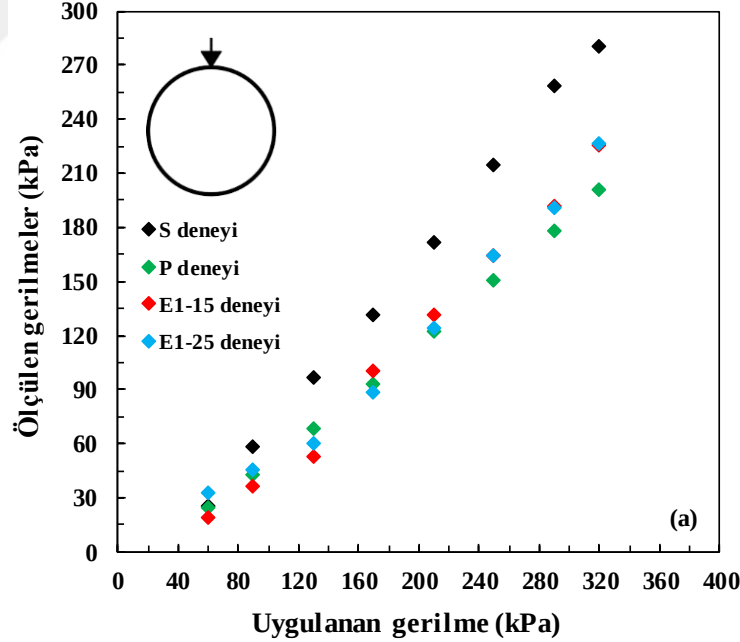


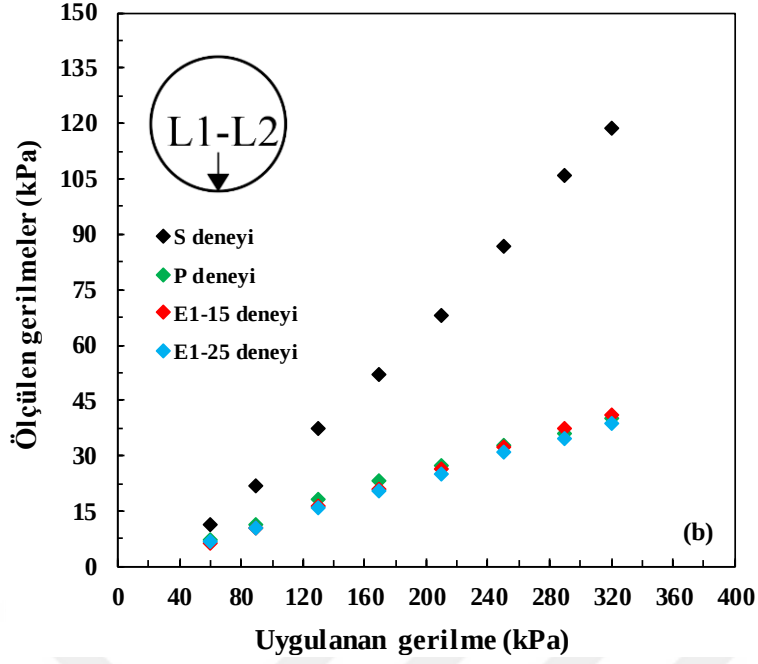
Şekil 4. 1 Tam ölçekli model deneylerden ölçülen yüzeysel oturmaların değişimi

Veriler incelendiğinde şerit olarak uygulana 320 kPa sürşarj gerilmesi için S deneyinde 8,71 mm ve P deneyinden 10,71 mm yüzeysel oturmalar ölçülmüştür. Özellikle bu değerlerin uygulanan sürşarj gerilmelerinin artışına paralel olarak artmaktadır. Benzer yükleme koşulları için boru taç bölgesinde boru çapı kadar bir genişlikte ve 5 cm kalınlığında EPS Geofoam kullanılarak gerçekleştirilen tam ölçekli E1-15 ve E1-25 deneylerinden ölçülen yüzeysel oturmalar sırasıyla 46 mm ve 41 mm'dir. Fakat bu yüzeysel oturmalar E1-15 deneyinde ilk üç yük kademesinde ve EPS1-25 deneyinde ise ilk dört yükleme kademesinde uygulanan gerilmelerle uyumlu olarak artarken, bu yükleme kademelerinden sonra yüzeysel oturmaların ani olarak arttığı görülmektedir.

4.2 Düşey Gerilmeler

Kum (S) ve borulu (P) deneylerde boru taç bölgesinde L3 ve L4'ten; EPS Geofoam ile desteklenen borulu (E1-15 ve E1-25) deneylerde ise S1 ve S2'den ölçülen düşey gerilmelerin şerit olarak uygulanan sürşarj gerilmelerine bağlı değişimi Şekil 4.2a'de; benzer yükleme koşulları için boru tabanında konumlandırılan L1 ve L2 gerilme ölçerlerden elde edilen gerilmelerin değişimi Şekil 4.2b'de sunulmuştur.

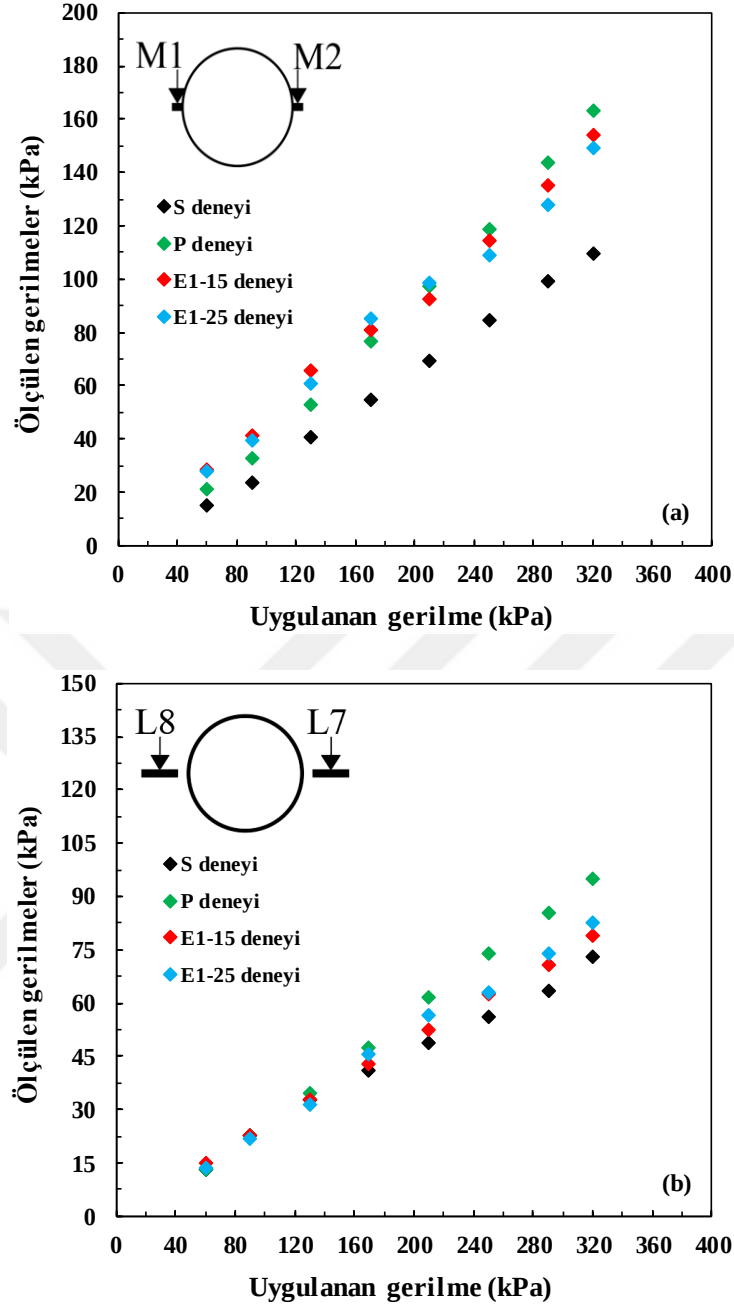




Şekil 4. 2 S, P, E1-15 ve E1-25 deneyleri için düşey gerilmeler a) taç b) taban

Şerit olarak kademeli uygulanan 320 kPa sürşarj gerilme için boru taç kotunda S, P, E1-15 ve E1-25 deneylerindeki gerilmeler sırasıyla 280 kPa, 201 kPa, 225 kPa ve 227 kPa olarak ölçülmüştür. S ve P deneyleri için ölçülen bu gerilmeler uygulanan gerilmelere paralel olarak artış gösterirken E1-15 için ilk üç yükleme kademesinde ve E1-25 için ilk dört yükleme kademesinde bu drum geçerlidir ve bu gerilme kademelerinde ölçülen gerilmeler P deneyinde ölçülen gerilmelerden daha küçük olmaktadır. Belirtilen bu gerilme seviyelerinden sonra E1-25 ve E1-25 deneylerinden ölçülen gerilmeler artarak P deneyinden ölçülen gerilmelerden büyük olmaktadır (Şekil 4.2a). Boru tabanındaki gerilmeler için ise P, E1-15 ve E1-25 deneylerinden ölçülen değerler birbiri ile uyumlu ve yaklaşık 40 kPa mertebesinde olmasına rağmen bu değer S deneyden ölçülen gerilmelerin %35'i mertebesinde dir.

Merkezleri boru yatay simetri ekseninden 1,5 cm uzaklıkta yer alan M1 ve M2 gerilme ölçerlerden S, P, E1-15 ve E1-25 deneyleri için düşey gerilmeler ölçülmüştür (Şekil 4.3a). Benzer şekilde komşu zemin prizmasındaki düşey gerilmelerin boru yatay simetri ekseninden tank duvarına doğru değişimini öngörmek için boru yatay simetri ekseninden 8 cm uzaklığa L7 ve L8 gerilme ölçerler yerleştirilerek bu konumdaki düşey gerilmeler belirlenmiştir (Şekil 4.3b).

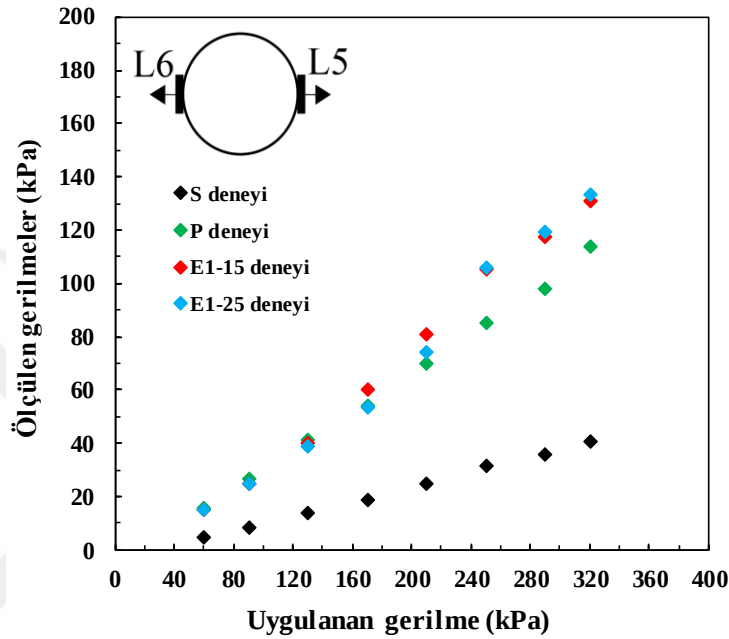


Şekil 4. 3 Yatay simetri eksenindeki düşey gerilmelerin değişimi a) M1 ve M2
b) L7 ve L8

S, P, E1-15 ve E1-25 deneyleri için M1 ve M2 ile L7 ve L8'den belirlenen gerilmeler referans alındığında, boru yatay simetri ekseninden uzaklaştıkça gerilmelerde farklı oranlarda azalmalar meydana gelmektedir Özellikle E1-15 deneyinde ilk üç yük kademesinde ve EPS1-25 deneyinde ise ilk dört yükleme kademesinden sonra ölçülen gerilmelerde azalmalar meydana gelmektedir.

4.3 Yatay Gerilmeler

Kum (S), borulu (P) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu (E1-15 ve E1-25) deneylerinde boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmeler L5 ve L6 gerilme ölçerlerden belirlenmiştir. Deney yükleme koşulları dikkate alındığında tam ölçekli deneylerden ölçülen yatay gerilmeler ve bu yatay gerilmelerin uygulanan sürşarj gerilmelerine bağlı olarak değişimi Şekil 4.4'te sunulmuştur.



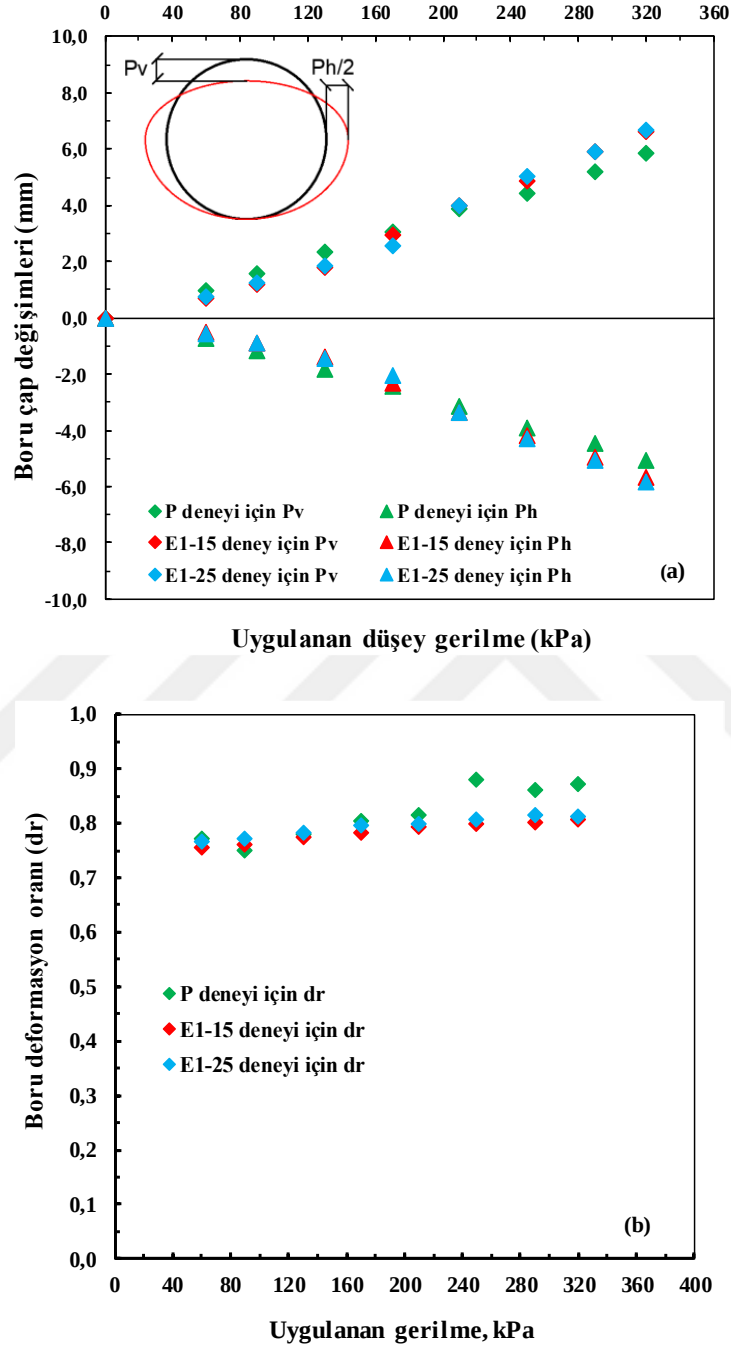
Şekil 4. 4 Yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişimi

Kademeli olarak 320 kPa'ya kadar sürşarj uygulanan P, E1-15 ve E1-25 deneylerinden ölçülen yatay gerilmeler, S deneyinden ölçülen yatay gerilmelerden yaklaşık üç kat büyüktür. Bu durum detayları Bölüm 6'da sunulacak olan boru yatay çap değişiminden kaynaklanmaktadır. E1-15 ve E1-25 için alınan diğer ölçümlerde olduğu gibi Düşey gerilme ölçümlerinde olduğu gibi E1-15 deneyinde ilk üç yük kademesinde ve EPS1-25 deneyinde ise ilk dört yükleme kademesinden sonra ölçülen yatay gerilmelerde farklılıklar (artışlar) meydana gelmektedir.

4.4 Boru Yatay ve Düşey Çap Değişimleri

Zemin üst kotunda yol üst yapı kaplaması olmadan şerit yüklemelere maruz kalan sığ gömülü HDPE bir borudaki çap değişimleri detayları Şekil 3.2'de gösterilen potansiyometrelerden ölçülmüştür. Sığ gömülü esnek borular içi geleneksel boru deformasyon formu ve tam ölçekli P ve E1 deneylerine ait ölçümler dikkate alındığında boru düşey çap değişimlerinin (P_v) yatay çap değişimlerinden (P_h)

büyük olduğunu göstermektedir (Şekil 4.5a). Boru yatay çap değişimlerinin düşey çap değişimlerine oranı (P_h/P_v) olarak tanımlanan deformasyon oranının (dr) farklı yükleme kademeleri için dar bir aralıkta değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.5b).



Şekil 4. 5 P ve E1 deneyleri için boru deformasyonları a) P_h ve P_v b) dr

Şekil 4.5 incelendiğinde şerit olarak kademeli uygulanan 320 kPa sürşarj gerilme için P, E1-15 ve E1-25 deneylerindeki boru çap değişimleri sırasıyla düşeyde 5.8 mm, 6.6 mm ve 6.7 mm olurken; yatayda 5.1 mm, 5.6 mm ve 5.8 mm ölçülmüştür.

Borulu deneyden ölçülen boru çap değişimlerinin uygulanan sürşrj gerilmelerinin artışına paralel olarak arttığı ve uygulanan gerilmeler ile ölçülen çap değişimlerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer yükleme koşulları için boru taç bölgesinde boru çapı kadar bir genişlikte ve 5 cm kalınlığında EPS Geofom kullanılması ile ölçülen boru çap değişimleri E1-15 için ilk üç yükleme kademesinde P deneylerinden ölçülen boru çap değişimlerinden küçükken artan gerilme seviyelerin tam tersi bir durum geçerlidir. Benzer şekilde E1-25 için ilk dört yükleme kademesinde ölçülen boru çap değişimleri borulu deneyden ölçülen değerlerden küçük ve artan gerilme seviyelerinde E1-15'tekine benzer bir durum gerçekleşmiştir.



5

SAYISAL ANALİZLER

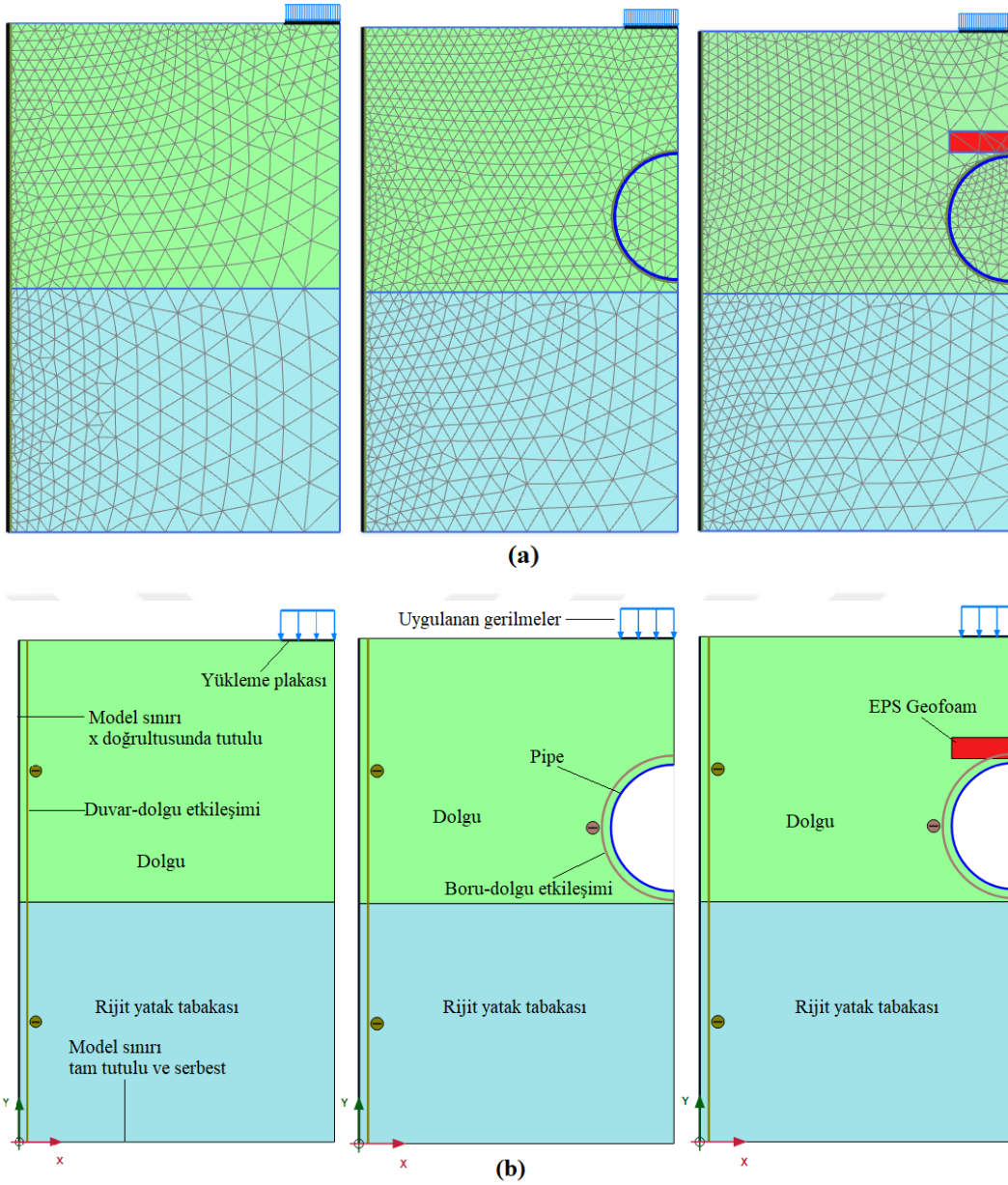
5.1 Tam Ölçekli Model Deneylerin Doğrulanması

Şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü esnek boruyu temsil eden tam ölçekli laboratuvar model deneyleri sonlu elemanlar yazılımı Plaxis 2D (2021) düzlem şekil değiştirme idealizasyonu dikkate alınarak geri analizleri yapılmıştır. Kullanılarak doğrulanmıştır. Bu analizler için oluşturulan geometri, yapılan kabuller, sonlu elemanlar ağı, malzeme özellikleri, sınır durum koşulları, kurulumu ait detaylar ve parametrik çalışmalar alt başlıklar halinde sunulacaktır.

5.1.1 Model Genel Geometrisi, Mesh ve Sınır Durum Koşulları

Bölüm 3'te detayları verilen deneysel model simetrik olduğundan sonlu eleman sayısını azaltmak için sayısal modelin yarı geometrisi dikkate alınmıştır. S, P ve E deneylerinin her biri için ayrı ayrı oluşturulan sayısal modelde 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar ağı S, P ve E deneyleri için sırasıyla 717, 1219, 913 eleman ve 2464, 1298, 1724 düğüm içermektedir (Şekil 5.1a). Tam ölçekli laboratuvar deneylerindeki gerçek sınır koşulları analizlere de yansıtılmıştır. Deneylerde rijit tank duvarları sistemin yatay hareketini sınırlandırdığından sayısal modelin yatay doğrultudaki hareketi sabit tutulmuştur. Tabanda ise her iki doğrultudaki hareket sabit tutulmuştur (Şekil 5.1b).

Büyük ölçekli direk kesme kutusu deney aletinden belirlenen HDPE boru malzemesi-dolgu ara yüzey sürtünme açısı ve Tognon vd. (1999) tarafından önerilen yöntemin tank duvarlarına uygulanması ile meydana gelen etkileşim için "ara yüzey elemanları" (interface) tanımlanmıştır. Ek olarak, EPS Geofom-dolgu ara yüzey sürtünmesi için 0,95 olan "ara yüzey azaltma katsayısı" ($R_{int} = \tan(\delta) / \tan(\phi)$) 1 kabul edilerek "ara yüzey elemanı" tanımlanmamıştır. Kum (S), borulu (P) ve EPS Geofom ile desteklenen borulu (E1) deneylerine ait geometri, sonlu elemanlar ağı ve sınır durumlar Şekil 5.1'de sunulmuştur.

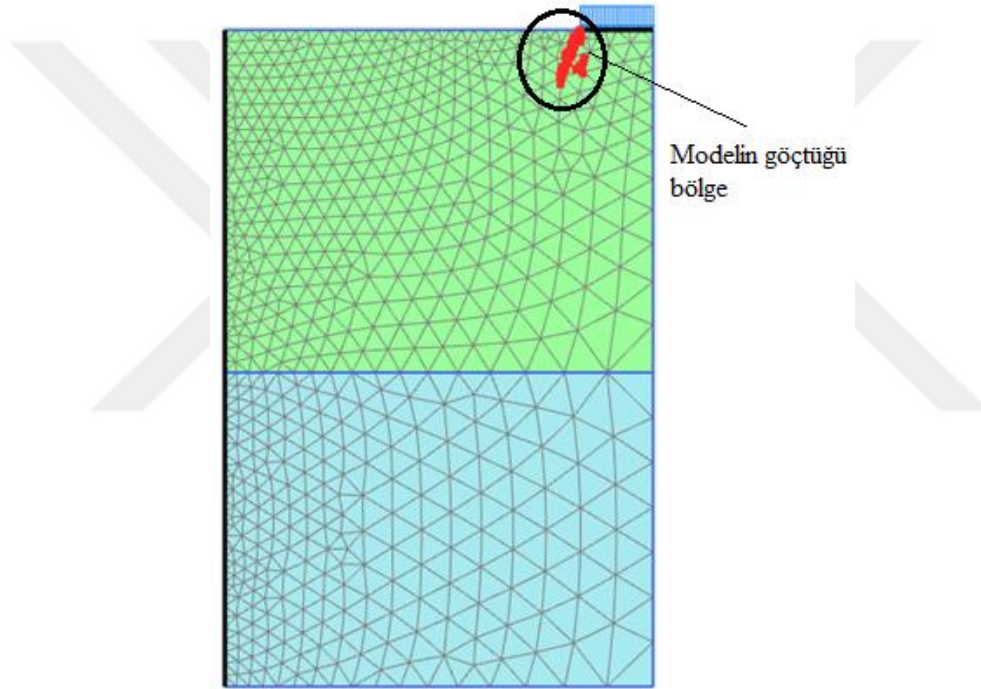


Şekil 5. 1 S, P ve E deneylerine ait modelleme bilgileri a) sonlu elemanlar ağı
b) model geometrisi ve sınır durum koşulları

Tam ölçekli laboratuvar model deneylerinde gerilmeler rijit yükleme plakası yardımıyla zemin yüzeyine uygulanmıştır. Bu durumu analizlere yansıtabilmek amacıyla boru merkezi referans alınarak yarı genişliği 12,7 cm, ağırlıksız, boyutsuz ve rijit bir "plaka eleman" zemin üst kotuna tanımlanmış ve öngörülen gerilmeler bu "plaka eleman" üstüne uniform yayılı olarak uygulanmıştır.

Analizlerin doğruluğunu değerlendirmek için çok ince, ince, orta ve kaba olmak üzere farklı sonlu eleman ağlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Fakat ince ve çok ince sonlu elemanlar ağı kullanıldığında, gerilmeleri zemin yüzeyine aktarmak için

kullanılan plaka eleman ile zemin arasında göçmeler meydana gelmiştir (Şekil 5.2). Analizleri aynı sonlu elemanlar ağında gerçekleştirebilmek için orta (medium) sonlu elemanlar ağı tüm analizlerde kullanılmıştır. Buna rağmen bazı analizlerde benzer sorun devam etmiştir. Plaka eleman ile zemin arasında meydana gelen bu sorunun çözümü için farklı yöntemler denense de, nihai durumda dolgu malzemesine 8 kPa kohezyon değeri tanımlanarak giderilmiştir. Bu değer S, P ve E deneylerinde sabit tutulmuştur. Sonlu elemanlar ağının sonuçlara etkisini öngörebilmek için aynı model ve farklı sonlu elemanlar ağı kullanılarak yapılan analizlerde orta ağı ile çok ince ağı kullanımında deformasyonlarda %2'ye varan farklılıklar gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 2 Sonlu elemanlar ağına bağlı olarak meydana gelen göçmeler

5.1.2 Malzeme Özellikleri

Literatür çalışmaları ve üç eksenli (CD) testlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi dikkate alınarak Plaxis 2D kütüphanesinden hiperbolik pekleşen zemin modeli (Hardening Soil) tercih edilmiştir. Hardening Soil model için gerekli elastisite modülleri, Şekil 1.18'de sunulan üç eksenli (CD) deney ve Eşitlik 2.3'ten 26.222 kPa olarak belirlenen E_{50} referans alınarak Eşitlik 5.1'ten hesaplanmıştır.

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} * \left(\frac{c \cos(\phi) - \sigma_3 \sin(\phi)}{c \cos(\phi) + p^{\text{ref}} \sin(\phi)} \right)^m \quad (5.1)$$

Eşitlik $m=0,5$ ve $p^{ref} = 100$ kPa değerleri için çözüldüğünde $E_{50} = E_{50}^{ref}$ 'ye eşit olur. E_{50}^{ref} değeri 26.222 kPa olarak hesaplanmasına rağmen, kum deneyi ve analizinden belirlenen yüzeysel oturmalarla göre kalibre edilmiştir. Nihai durumda deney ve analizler için en uyumlu yüzeysel oturmalar $E_{50}^{ref} = 28.000$ kPa'da belirlendiği için tüm analizlerde bu değer dikkate alınmıştır (Tablo 5.1). HS model için tanjant ödometrik modülü $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ ve yükleme-boşaltma modülü $E_{ur}^{ref} = 2,5 * E_{50}^{ref}$ eşit kabul edilmiştir. Dolgunun ve dolgu-diğer yapısal elemanlar ara yüzey sürtünme açıları için detayları Bölüm 2'de sunulan büyük ölçekli direk kesme kutusundan elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

Tablo 5. 1 Geri dolgu malzeme modeli ve parametreleri

Dolgu Özellikleri								
γ_k (kN/m ³)	Bünye Modeli	ν	c (kPa)	ϕ (°)	E_{50} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{ur} (MPa)	Rint-1 tank -zemin
17	HS	0,2	8	40	28	28	70	0,17

Bölüm 1.5'te ifade edildiği gibi gömülü borular ve yükleme başlıkları genellikle beam-colum veya shell elemanlar olarak modellenmektedir. Plaxis 2D'de yer alan "plaka elemanlar" eksenel (EA) ve eğilme rijitliğini (EI) dikkate alan yapısal elemanlardır. Termoplastik boruların davranışının zamana ve sıcaklığa bağlı olması nedeniyle, gerçek boru davranışını yansıtmak için viskoelastik bir malzeme modelinin kullanılması önerilse de analizleri basitleştirmek ve karışıklığı önlemek için sekant elastisite modülünü dikkate alan lineer elastik malzeme modeli tercih edilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan düz duvarlı HDPE boruya ait malzeme özellikleri ve tasarım parametreleri Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 HDPE boru malzeme modeli ve parametreleri

Boru Malzeme Özellikleri						
Yoğunluk (kg/m ³)	Bünye Modeli	ν	E (MPa)	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	Rint-2 boru-zemin
970	LE	0,45	450	9000	0,3	0,50

EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde kullanılan EPS15 ve EPS25'in LE malzeme modeli için gerekli E değerleri Şekil 2.21'den ve ν değeri Tablo 1.4'ten hesaplanmıştır (Tablo 5.3).

Tablo 5. 3 EPS Geofoam malzeme modeli ve parametreleri

EPS Geofoam Özellikleri								
Yoğunluk (kg/m ³)	Bünye Modeli	ν	c (kPa)	ϕ (°)	E ₁ (kPa)	E ₂ (kPa)	E ₃ (kPa)	Rint-3 EPS-zemin
15	LE	0,008	-	-	2500	600	165	1
25	LE	0,014	-	-	5500	720	270	1

5.1.3 Kurulum Aşamaları

Kum (S), borulu (P) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu (E1) deneylerinde dolgunun sıkıştırma plakaları ile kademeli olarak yerleştirilmesi sırasında potansiyometrelerden alınan ölçümler borunun hem yatay hem de düşey çap değişimlerinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, kurulum aşamaları 2D analizlerinde detaylandırılmamıştır. Analizlerde Ko koşulu olarak adlandırılan başlangıç aşaması, yükleme için hazır olma durumunu ifade etmektedir. Analizlerde, tam ölçekli model deneylerdeki yükleme adımlarına göre kademeli inşa (staged consruction) dikkate alınmıştır. Diğer kontrol parametreleri için Plaxis tarafından önerilen değerler kullanılmıştır. Tablo 5.4'te analizlerde dikkate alınan inşa adımları ve başlangıç gerilme hesap adımları verilmiştir.

Tablo 5. 4 Analiz aşamasına ait detaylar

Aşama	Hesaplama tipi	Yükleme tipi	Sürşarj (kPa)
Başlangıç	Plastik	Ko	0
Phase-1	Plastik	Kademeli inşa	60
Phase-2	Plastik	Kademeli inşa	90
Phase-3	Plastik	Kademeli inşa	130
Phase-4	Plastik	Kademeli inşa	170
Phase-5	Plastik	Kademeli inşa	210
Phase-6	Plastik	Kademeli inşa	250
Phase-7	Plastik	Kademeli inşa	290
Phase-8	Plastik	Kademeli inşa	320

5.1.4 Parametrik Çalışmalar

Plaxis 2D'de tam ölçekli laboratuvar deneyine ait oluşturulan sayısal modelde sistemin davranışını etkileyen faktörler parametrik çalışmalar incelenmiştir. Parametrik çalışmalarda, boru deformasyonu ve kemerlenme etkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan gömülme derinliği, kaplaman rijitliği, dolgu ve boru malzeme özellikleri ile en ideal EPS Geofoamun boyutları dikkate alınmıştır.

6.1 Kum ve Borulu Deneylere Ait Verilerin Değerlendirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında şerit yüklemeye maruz kalan kum (S), borulu (P) ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu (E1) deneyler ile sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar iki farklı başlık altında değerlendirilecektir. İlk aşamada EPS Geofoam kullanımını içermeyen kum (S) ve borulu (P) deneylerine ait veriler karşılaştırılacaktır. Boru esneme davranışı sonucu boru tacı ve eksenel simetri eksenindeki gerilmelerin, kum deneyine göre değişimi dikkate alınarak iki ana durum incelenmiştir. İlk durumda, *Terzaghi Kemerlenme Teorisi* 'nin taç bölgesine etki eden gerilmeleri hesaplamak için kullanılabilirliği test edilmiştir. Gerekli hesaplamalar için boru çap değişimleri ve boru deformasyon formuna bağlı olarak merkez zemin prizmasındaki K değerindeki değişim dikkate alınmıştır. İkinci durumda ise boru yatay çap değişimine bağlı olarak boru yatay simetri eksenindeki gerilmelerin değişimi incelenmiştir. Tam ölçekli laboratuvar deneylerden elde edilen tüm sonuçlar, doğrulanan 2D sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Ayrıca boru yatay simetri eksenindeki gerilmeler ile borunun esneme davranışı sonucu meydana gelen kemerlenme arasındaki sayısal ilişki gösterilmiştir. Bu ilişki, şerit yükleme koşullarına maruz kalan esnek bir boru için zemin davranışı, boru deformasyonu ve gerilme dağılımları arasındaki karmaşık etkileşim hakkında bilgi edinilmesine yardımcı olmaktadır.

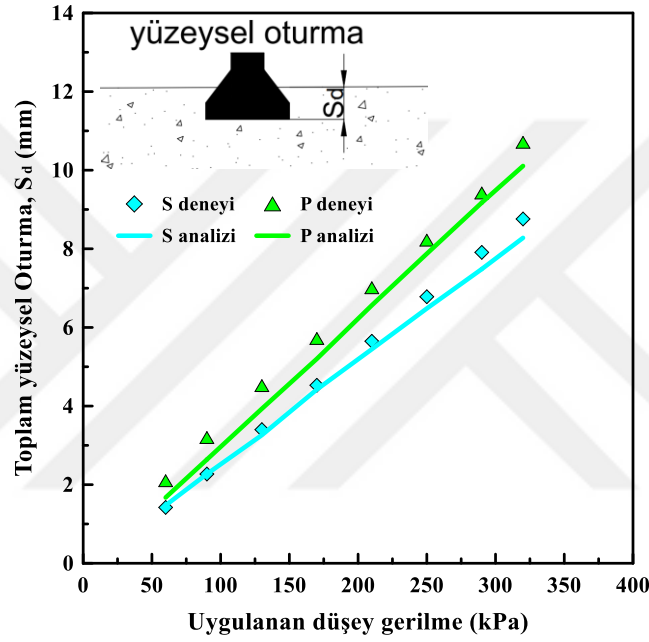
Tam ölçekli deneylerde gerilme ölçümleri için simetrik olarak yerleştirilen aynı özelliklere sahip gerilme ölçerlerden ve yüzeysel oturmalar için LVDT'lerden belirlenen ölçümlerin ortalaması alınarak tek bir değer olarak dikkate alınmıştır.

6.1.1 Yüzeysel Oturmalar

Kum (S) ve borulu (P) deneylerinden ölçülen yüzeysel oturmalar (S_d) Eşitlik 6.1'de ifade edildiği gibi kumun düşey oturması (u_{sd}) ve boru düşey yer değiştirmesi (u_{pd}) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Kum deneyinden ölçülen yüzeysel oturmalar, dolgunun malzeme parametrelerini kalibre etmek için kullanıldığı Bölüm 4.1.2'de detaylandırılmıştır.

$$\Sigma S_d = u_{sd} + u_{pd} \quad (6.1)$$

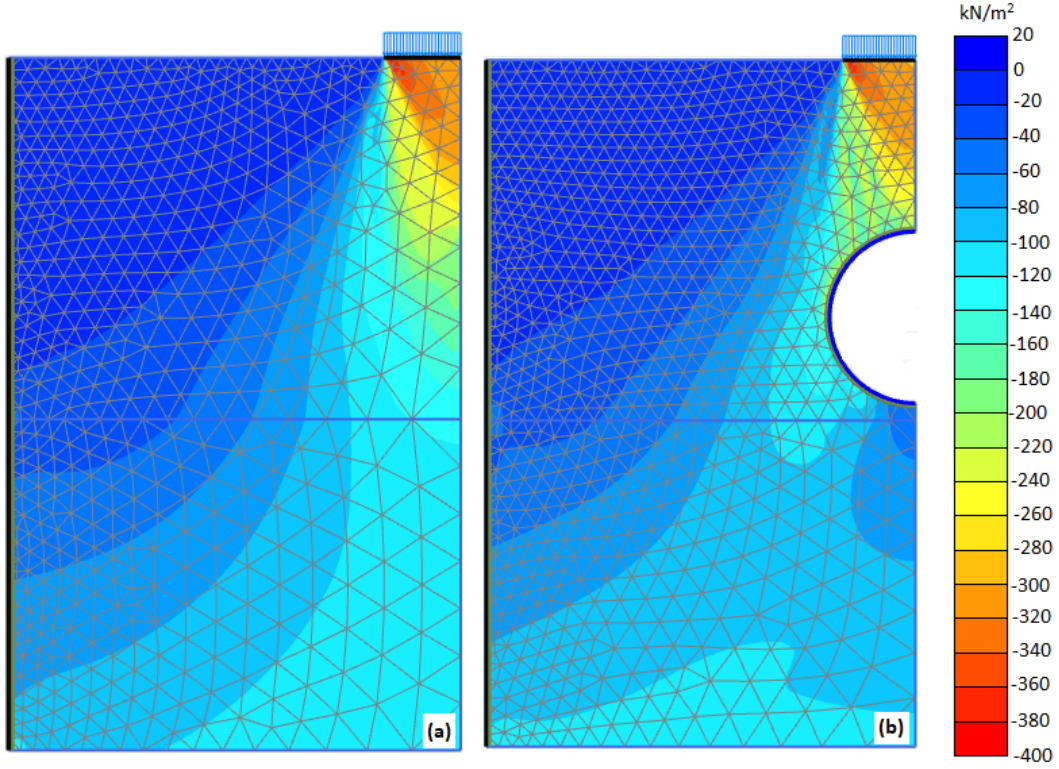
Şerit ve kademeli olarak 320 kPa düşey gerilmeye maruz kalan kum (S) ve borulu (P) deneyler için deney ve analizlerden elde edilen yüzeysel oturmaların değişimi Şekil 6.1’de sunulmuştur. Bu gerilme değeri altında Kum deneyinden ölçülen yüzeysel oturma değeri 8,76 mm iken borulu deney için 10,71 mm’dir. Bu değerler analizlerden hesaplanan sonuçlarla oldukça uyumludur. Deney ve analizlerden belirlenen veriler incelendiğinde borulu durumdaki yüzeysel oturmalar, borusuz durumdan daha büyük olmakla birlikte yakın bir uyum göstermektedir.



Şekil 6. 1 Gerilmelere göre ölçülen ve hesaplanan yüzeysel oturmaların değişimi

6.1.2 Düşey Gerilmeler

Kum (S) ve borulu (P) deneyler boyunca taç bölgesinde L3 ve L4’ten ve boru tabanında L1 ve L2’den ölçülen gerilmelerin aynı bölgeler için analizlerden hesaplanan gerilmelerle karşılaştırılması Şekil 6.2’de sunulmuştur. Analizler, şerit yükleme koşullarına maruz kalan kum (S) ve borulu (P) deneyler için deneyi için gerilmelerin yükleme plakasının altından aşağıya doğru daha geniş bir alanda dağıldığını ortaya koymaktadır (Şekil 6.2a). Fakat borulu deneyde zeminden daha fazla yüzeysel oturmaya neden olan HDPE borunun kullanılması, borunun komşu zemin prizmasına göre daha fazla düşeyde yer değiştirmesine neden olur. Bu durum, boru çapı kadar bir genişlikte ve düşey düzlemlerdeki kayma gerilmelerinin etkisini artırarak boru taç bölgesindeki gerilmeleri azaltmaktadır (Şekil 6.2a).



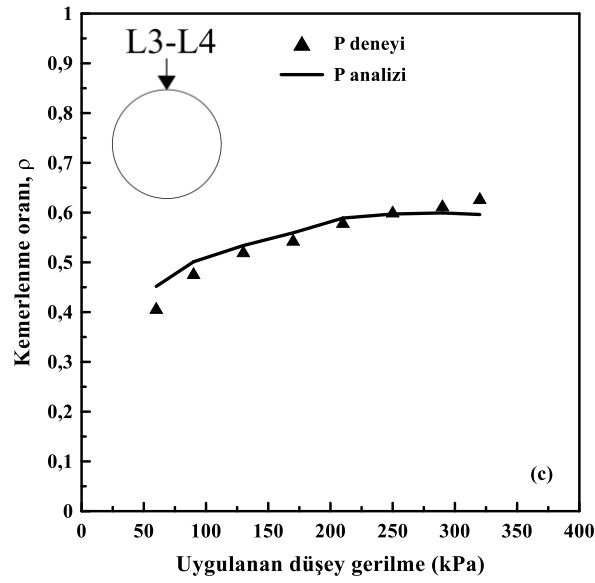
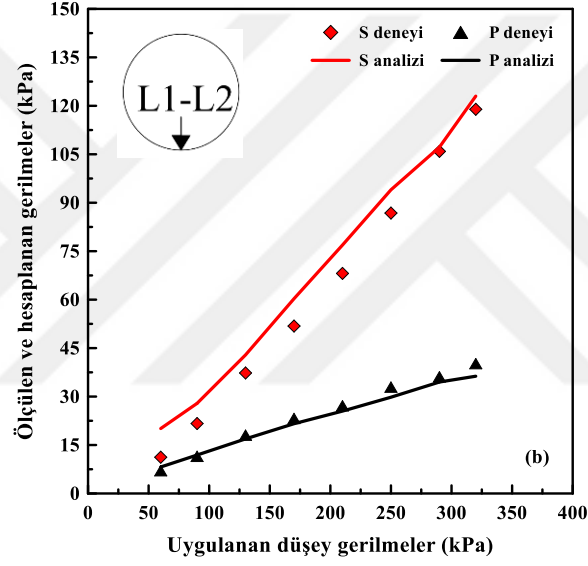
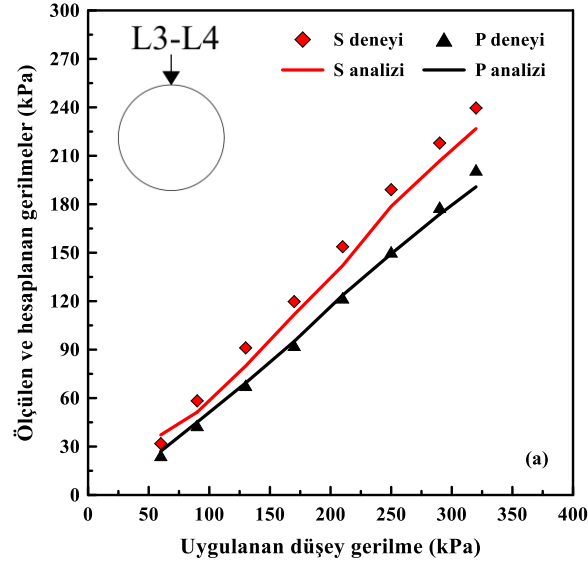
Şekil 6. 2 Analizler için düşey gerilmelerin değişimi a) S deneyi b) P deneyi

Benzer şekilde, tam ölçekli S ve P deneylerinde kemerlenme etkisinin artması ve boru esnemesine bağlı olarak gerilmelerin komşu zemin prizmasına transfer edilmesi boru taç ve tabandaki gerilmeleri kayde değer şekilde azaltmıştır (Şekil 6.3).

Borulu deney için taç bölgesine etkiyen gerilmelerin, kemerlenme etkisine bağlı olarak değişimi Eşitlik 6.2’de ifade edilen kemerlenme oranı ile hesaplanmış ve Şekil 6.3c’de ifade edilmiştir. Kemerlenme oranının (ρ) 1’e eşit olması kemerlenmenin olmadığını; bu oranın 0 olması maksimum kemerlenme durumunu ifade etmektedir.

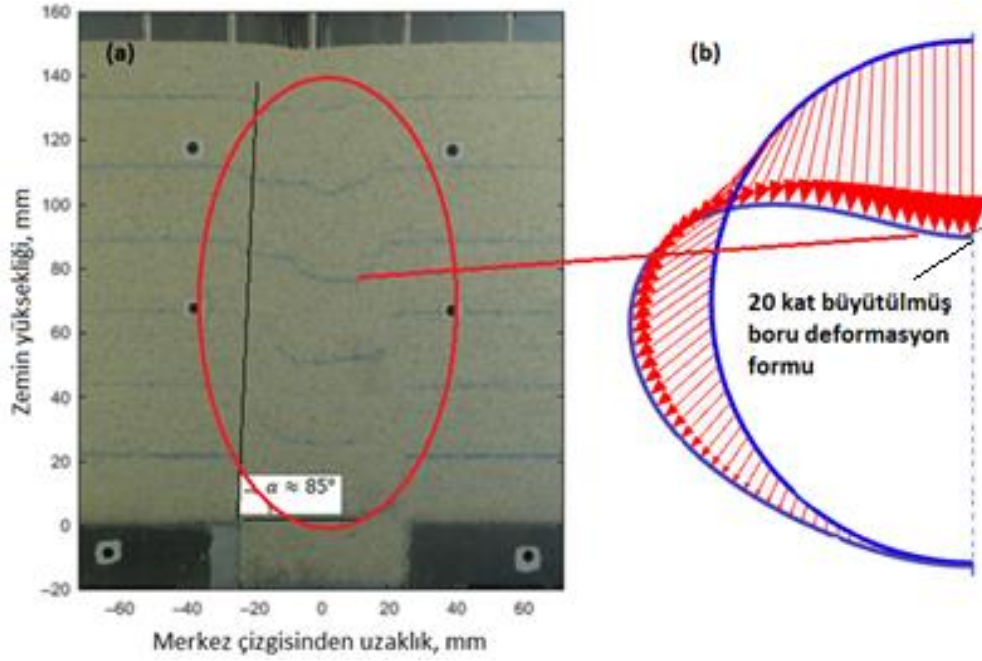
$$\rho = \frac{\sigma_v}{\Delta q + \gamma * h} \quad (6.2)$$

Eşitlikte yer alan ρ kemerlenme oranı, σ_v referans alınan nokta için ölçülen ve ya hesaplanan gerilme değeri, Δq yüzeyden uygulanan sürşarj gerilmesi, $\gamma x h$ örtü yükü kalınlığından dolayı meydana gelen gerilme



Şekil 6. 3 Ölçülen ve hesaplanan gerilmelerin değişimi a) taç b) taban c) ρ

Şerit yüklemeye maruz kalan HDPE borunun deformasyonu ve buna bağlı olarak merkez zemin prizmasındaki zemin davranışı, trapdoor olarak adlandırılan deney sisteminin çalışma mekanizması ile benzerlik gösterir. George ve Dasaka (2022) tarafından görüntü işleme teknikleri kullanılarak yapılan tam ölçekli trapdoor deneyinden belirlenen merkez zemin prizmasındaki danelerin deformasyon formu ve davranışı (Şekil 6.4a) ile şerit yüklemeye maruz kalan HDPE bir boru için analizlerden belirlenen boru deformasyon formu (Şekil 6.4b) sunulmuştur.

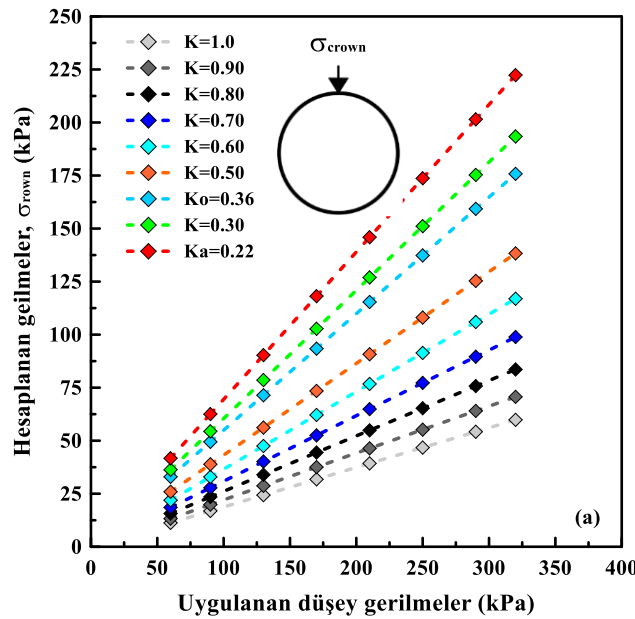


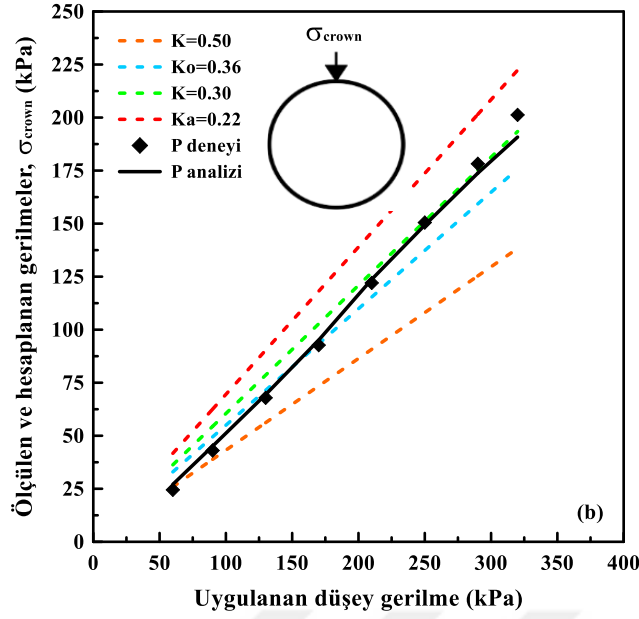
Şekil 6. 4 Merkez zemin prizması için deformasyon davranışı a) trapdoor b) analiz

Başka bir deyişle borunun düşey yer değiştirmesi ile trapdoor deneyindeki hareketli kapağın aşağı yöndeki hareketi aynı işlevi görür ve bu durum kemerlenmenin oluşmasını sağlayan en önemli parametredir.

Terzaghi Kemerlenme Teorisi'nden belirli sınır durum koşulları için türetilen *Eşitlik 1.4* (syf. 17) iki bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen zemin gerilmelerini ifade ederken, ikinci bileşen sürşarj gerilmelerini temsil etmektedir. Bu eşitlik sıg gömülü esnek bir borunun taç bölgesine etki eden gerilmelerin hesaplanması için kullanıldığında B değeri borunun yarıçapına ve h ise örtü yükü kalınlığına (1D) karşılık gelir. Özellikle eşitlikte yer alan tüm parametreler incelendiğinde tek değişkenin K olduğu görülmektedir. Boru esneme davranışına bağlı olarak meydana gelen boru düşey yer değiştirmesi (Pv) ve deformasyon formu, merkez zemin prizmasındaki dolgunun gerilme dağılımında ve yanal toprak basıncı

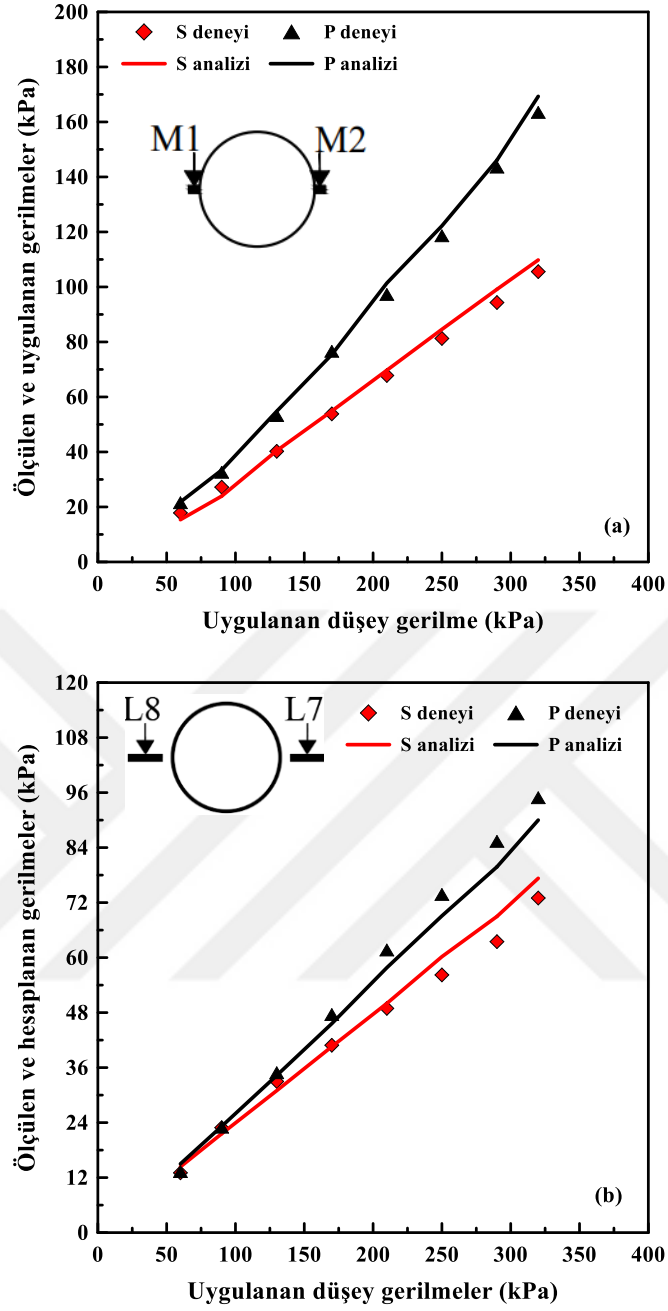
katsayında değişimlere neden olur. K_a ile 1 aralığında değişen farklı yanal toprak basıncı katsayılarının Eşitlik 1.4'te yerine yazılması sonucu taç bölgesi için hesaplanan gerilmelerin ($\sigma_{taç}$) değişimi Şekil 6.5a'da sunulmuştur. K değerindeki artış merkez zemin prizmasındaki düşey gerilmelerin yanal etkisini ($K \times \sigma_v = \sigma_h$) artırarak f_s ve kemerlenme etkisini olumlu yönde etkiler. Bu durum taç bölgesindeki gerilmelerin kademeli olarak azalmasına neden olur. Benzer şekilde Şekil 6.5a'da $\sigma_{taç}$ değerlerinin tam öçekli deneyden ve analizden belirlenen $\sigma_{taç}$ değerleri ile karşılaştırılması Şekil 6.5b'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi deney ve analizden belirlenen gerilmelerin farklı yükleme kademelerinde farklı K değerlerine karşılık gelmesine rağmen genellikle K_o ile K_a arasında bir değişim söz konusudur. Tek bir boru tipi ve dolgu malzemesi için yapılan bu değerlendirme, merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki etkileşimin boru çapı kadar bir genişlikte ve düşey düzlemlerde olduğu kabul edilerek yapılmıştır. Fakat merkez zemin prizmasındaki K değişiminin detayları Bölüm 1.3.1'de verilen farklı kemerlenme oluşumları, sınırları ve konfigürasyonları için de incelenek mümkündür. Özellikle gömülü boru sistemleri için kullanılan farklı rijitliklerdeki ve boyutlardaki boruların varlığı ile farklı özelliklere sahip dolgu malzemelerinin kullanımı göz önünde bulundurulduğunda daha kapsamlı bir değerlendirme için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç olduğu açıkça görülmektedir.





Şekil 6. 5 Boru taç bölgesindeki gerilmelerin değişimi a) farklı K değerleri için sonuçlar b) gerilmelerin karşılaştırılması

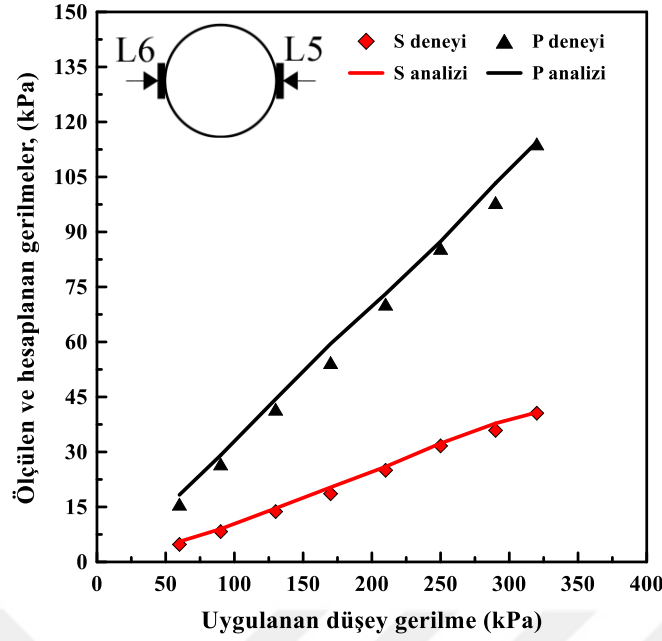
Boru esneme davranışı sonucu meydana gelen düşey çap değişimleri daha efektif bir kemerlenmenin oluşması için hayati öneme sahiptir. Dolayısıyla merkez zemin prizmasındaki gerilmelerin komşu zemin prizmasına transfer edilmesi, boru yanlarındaki düşey gerilmelerde artışlara neden olur (Şekil 6.2). Merkezleri boru yatay simetri ekseninden 1,5 cm uzaklıkta yer alan M1 ve M2'den ölçülen düşey gerilmeler için borulu deney ve analiz sonuçları kum deney ve analiz sonuçlardan daha büyük olması, bu durumun en büyük göstergesidir (Şekil 6.6a). Özellikle komşu zemin prizmasına aktarılan düşey gerilmeler ile yüzeyden şerit olarak uygulanan gerilmelerin etkisi, boru yatay simetri ekseninden tank duvarına doğru azalmaktadır. Bu durum merkezleri boru yatay simetri ekseninden 8 cm uzaklıkta yer alan L7 ve L8'den belirlenmiştir (Şekil 6.6b). Kum (S) ve borulu (P) deneyler için M1 ve M2 ile L7 ve L8'den belirlenen gerilmeler referans alındığında, boru yatay simetri ekseninden uzaklaştıkça meydana gelen azalmalar borulu deneyde %45 civarında iken kum deneyinde %35 civarındadır.



Şekil 6. 6 Boru yay hattındaki gerilmelerin değişimi a) M1 ve M2 b) L7 ve L8

6.1.3 Yatay Gerilmeler

Yüklemeler altında boru kesitinde meydana gelen boru çap değişimleri merkez zemin prizmasında olduğu gibi boru yatay simetri eksenindeki yanal toprak basıncı katsayısında da değişimlere neden olur. Bu değişimlerin belirlemek için M1 ve M2'den ölçülen düşey gerilmelere ek olarak yatay gerilmelerde gereklidir. Şekil 6.7'de kum (S) ve borulu (P) deneyler için L5 ve L6'dan ölçülen yatay gerilmeler ile analizden hesaplanan gerilmelerin değişimi sunulmuştur.



Şekil 6. 7 Boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişimi

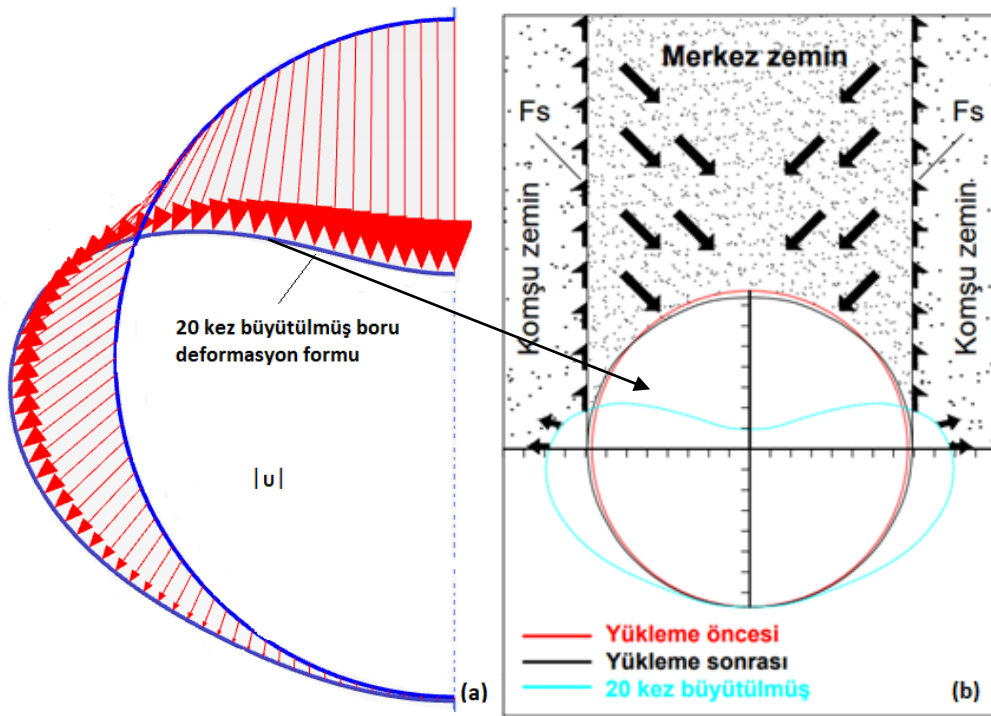
Kademeli olarak 320 kPa'ya kadar sürşarj uygulanan kum ve borulu deneylerinde L5 ve L6'dan ölçülen ve analizden hesaplanan gerilmeler arasında üç kata varan ciddi farklar bulunmaktadır. Kum deneyi için analizden boru yatay simetri eksenindeki yatay ötelenme değeri yaklaşık olarak 0,85 mm; borulu deneyde ve analizinde boru esneme davranışına bağlı olarak yaklaşık olarak 5 mm'dir. Kum deneyinde sınırlı miktarda meydana gelen yanıl zemin ötelenmesi ve yanıl zemin gerilmeleri başlangıçta Ko koşulunda olan sistemde önemli bir değişim meydana getirmezken, borulu deneydeki yatay ötelenme değeri zemin danelerinin boru yatay simetri ekseninden tank duvarına doğru hareket etmesine ve danelerin sıkışma davranışı göstermesine neden olur. Özellikle borulu deneyde meydana gelen bu davranış pasif itkilerin oluşmasını sağlayarak K'da önemli değişimlere neden olur.

Boru çap değişimleri ve gerilmelerin dağılımı dikkate alındığında kum (S) ve borulu (P) deneylerinde ve analizlerinde aynı ölçüm noktaları için belirlenen gerilmeler arasında ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir. Kemerlenme etkisinin artması ile merkez zemin prizmasındaki gerilmelerin komşu zemin prizmasına transfer edilmesi sonucu taç (L3 ve L4) ve taban (L1 ve L2) bölgelerindeki gerilmeler azalmıştır. Benzer şekilde gerilmelerin komşu zemin prizmasına aktarılması M1, M2, L7 ve L8'den ölçülen gerilmelerde artışlara neden olmuştur. Nihai durumda düşey gerilme ölçümleri için kullanılan tüm gerilme ölçerler göz önüne alındığında, ifade edilen bu durum en bariz etkisini M1 ve M2'de

göstermiştir. Buna ek olarak, boru esnemesi ile yatayda meydana gelen boru çap değişimi gerilmelerdeki en büyük değişimin meydana getirmiştir.

6.1.4 Boru Yatay ve Düşey Çap Değişimleri

Tam ölçekli laboratuvar deneyleri ve analizler referans alındığında şerit yükleme koşullarına maruz kalan ve zemin üst kotunda yol üst kaplaması bulunmayan HDPE bir borudaki deformasyonlar ve boru çevresindeki gerilmelerin dağılımı Şekil 6.8’de sunulmuştur.

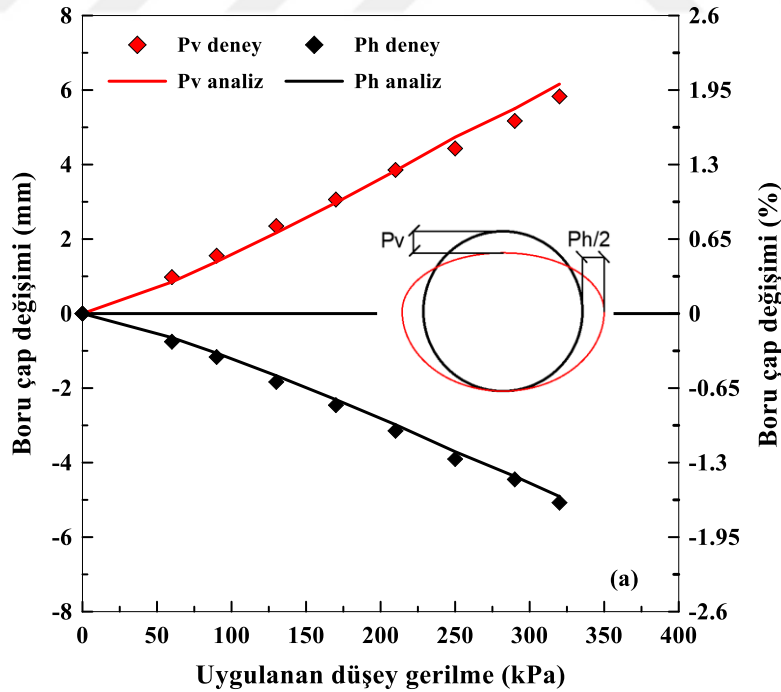


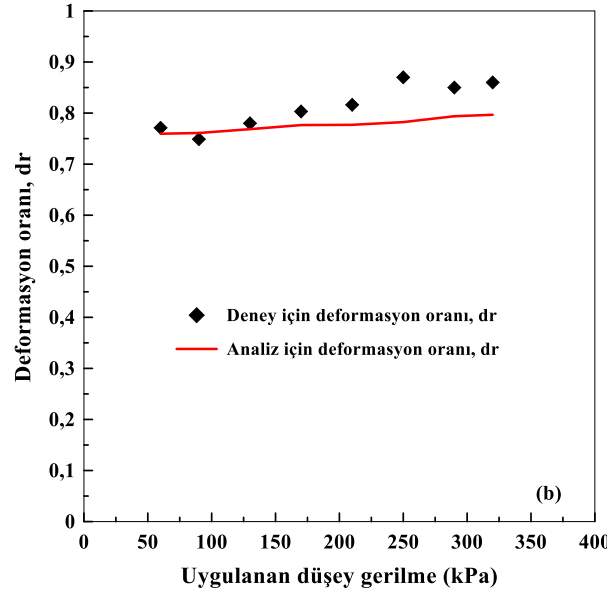
Şekil 6. 8 Şerit yüklemelere maruz kalan HDPE boru için deformasyonların dağılımı a) analiz b) idealleştirilmiş

Yapılan analizler, gerilmelerin dağılımına bağlı olarak boru deformasyonlarının boru çeperi boyunca uniform olmadığını ve taç bölgesinde yoğunlaştığını göstermiştir (Şekil 6.8). Bu durum boru deformasyon formunun kalp şeklini almasına, merkez zemin prizmasındaki danelerin taç bölgesine yönelmesine ve gerilmelerin bu bölgede yoğunlaşmasına neden olur (Şekil 6.8). Özellikle danelerin bu yönelimi, kemerlenme etkisinde azalmalara neden olmaktadır. Başka bir deyişle detayları Şekil 1.14b’de gösterildiği gibi f_s değerini belirleyen parametrelerden biri olan ve merkez zemin prizmasına etkiyen gerilmelerin yatay etkisini temsil eden K değeri de azalır. Dolayısıyla boru tepesindeki göreceli oturmalar taç bölgesinde ne kadar fazla olursa kemerlenme, f_s ve K ’deki azalma o derece fazla olur.

Boru düşey çap değişimi ile birlikte meydana gelen ve maksimum değere yaklaşık olarak boru yatay simetri ekseninde ulaşan boru yatay çap değişimi, bu bölgede yer alan danelerin davranışını belirleyen en önemli parametredir. Boru esneme davranışı ve borunun yataydaki çap değişimi yatay simetri ekseninde yer alan danelerin tank duvarına doğru hareket etmesine neden olur. Rijit tank duvarlarının varlığı danelerin boru yatay simetri eksenine ile tank duvarı arasında sıkışmasına neden olur. Dolayısıyla danelerin bu davranışı boru yatay simetri ekseninden tank duvarına doğru pasif etkilerin oluşmasını sağlar.

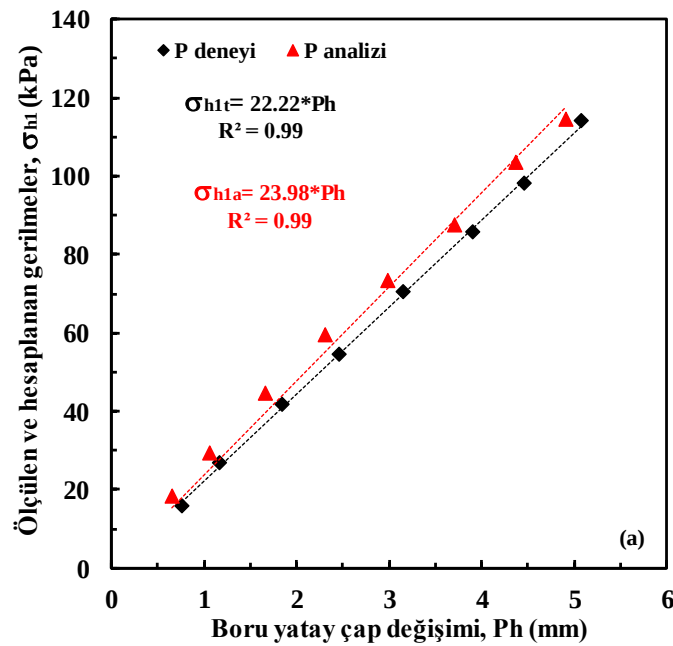
Boru deformasyon formu dikkate alındığında deneysel ölçümler ve analizler boru düşey çap değişimlerinin (P_v) yatay çap değişimlerinden (P_h) daha büyük olduğunu göstermiştir (Şekil 6.9a). Boru yatay çap değişimlerinin düşey çap değişimlerine oranı (P_h/P_v) olarak tanımlanan deformasyon oranının (d_r) farklı yükleme kademeleri için dar bir aralıkta değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 6.9b). Bu oran analiz için 0,76 ile 0,81 arasında (ortalama 0,79); deney için ise 0,76 ile 0,87 arasında (ortalama 0,81) değişmektedir. Uygulanan gerilmelere bağlı olarak boru deformasyonlarının arttığı görülmektedir. Artan deformasyonlar kalp şeklindeki deformasyon formunun belirginleşmesini sağlar.

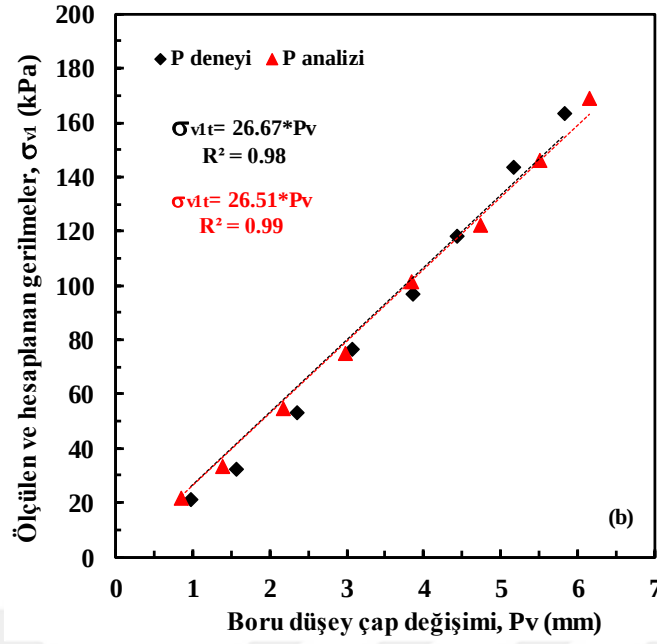




Şekil 6. 9 Farklı yükleme kademeleri için boru çap değişimleri a) Pv ve Ph b) dr

Borulu deney ve analizi için boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmeleri belirleyen en önemli parametre boru yatay çap değişimidir (Şekil 6.10a). Benzer şekilde boru düşey çap değişimleri zemindeki kayma gerilmelerini harekete geçirerek merkez zemin prizmasından komşu zemin prizmasına gerilmelerin transfer edilmesini ve boru yatay simetri eksenindeki düşey gerilmelerin artmasını sağlar (Şekil 6.10b). Bu durumu detaylandırmak için boru yay hattındaki M1 ve M2 gerilme ölçerlerin konumu, SP-1 ölçüm noktası olarak tanımlanmıştır. SP-1 ölçüm noktası için yatay gerilmeler σ_{h1} ve düşeydeki gerilmeler σ_{v1} ile temsil edilmiştir.





Şekil 6. 10 SP-1 için boru çap değişimleri göre gerilmelerin değişimi a) σ_{h1} ve P_h
b) σ_{v1} ve P_v

Şekil 6.10'deki deney ve analiz için SP-1 ölçüm noktasındaki yatay gerilmeler (σ_{h1}) ve boru yatay çap değişimi (P_h) ilişkisi Eşitlik 6.3'te; SP-1 ölçüm noktasındaki düşey gerilmeler (σ_{v1}) ve boru düşey çap değişimi (P_v) ilişkisi Eşitlik 6.4'te ifade edilmiştir. Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4'teki σ_{h1a} , σ_{v1a} , P_{ha} ve P_{va} analizlerden hesaplanan değerleri ifade ederken, σ_{h1t} , σ_{v1t} , P_{ht} ve P_{vt} ise deney ölçümlerini ifade etmektedir.

$$\sigma_{h1t} = 22,22 * P_{ht} \quad (6.3a)$$

$$\sigma_{h1a} = 23,98 * P_{ha} \quad (6.3b)$$

$$\sigma_{v1t} = 26,67 * P_{vt} \quad (6.4a)$$

$$\sigma_{v1a} = 26,51 * P_{va} \quad (6.4b)$$

Özellikle yukarıda ifade edilen eşitlikler bu çalışmada dikkate alınan dolgu ve boru özellikleri ile yükleme koşulları için geçerlidir. Gömülü boru sistemlerindeki malzeme özellikleri ve yükleme koşulları değişken olduğundan daha kapsamlı bir değerlendirme için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç olduğu açıktır.

6.1.5 Yanal Toprak Basıncı Katsayısının Değişimi

Bölüm 1.3.1’te sunulan Terzaghi Kemerlenme Teorisi ve trapdoor deney sistemi için hareketli kapağın aşağı yöndeki hareketi sonucu K değişimi Şekil 1.13b’de görüldüğü gibi kapağın aşağı yöndeki hareketine bağlı olarak K_o ile 1.6 arasında değişim göstermektedir (syf.15). Fakat farklı mühendislik yapılarında (tüneller, istinat duvarları, temeller, kazıklı temeller vd.) ve trapdoor deney sisteminde kemerlenme mekanizması, oluşumu, aşamaları ve sınırları farklı kabuller için farklı araştırmacılar tarafından da incelenmiştir (He ve Zhang, 2015; Cai vd., 2017; Lai vd., 2018; Wang vd. 2018; Wang ve Chen; 2019). Kemerlenmenin meydana geldiği bölge dikkate alındığında kemerlenmenin etkisini sayısallaştırmak için K değerine ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda K değeri için hesaplama formülleri ile önerilen değerler Tablo 6.1’de özetlenmiştir. Yapılan kabuller dikkate alındığında K değerinin sabit olmadığı ve geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Özellikle Lin vd. (2019), tünellerdeki kemerlenme etkisi için merkez zemin prizmasındaki K ’nin sabit olmadığını ve gömülme derinliğine bağlı olarak K_o ’dan K_p ’ye yönelim gösterdiğini belirtmiştir. Bu çalışma kapsamında tam ölçekli laboratuvar deney sonuçları ve Terzaghi Kemerlenme Teorisi’ndeki Eşitlik 1.4 kullanılarak merkez zemin prizmasındaki K belirlenmiştir. Şekil 6.11 incelediğinde K için iki durum söz konusudur. İlk dört yükleme kademesinde boru düşey çap değişimlerinin düşük olması ve boru deformasyonlarının henüz kalp şeklini almaması, boru tepesindeki deformasyonların daha uniform bir dağılım göstermesini sağlar. Borudaki bu davranış, merkez zemin prizmasındaki zemin kütlelerinin aşağı yönde hareketine ve merkez zemin prizması içersinde K_o koşuluna yakın bir davranış sergilemesine neden olur. Fakat gerilmelerdeki artış, taç bölgesinin daha fazla aşağı yönde hareketine ve boru deformasyon formunun kademeli olarak kalp şeklini almasına neden olur. Merkez zemin prizmasındaki danelerin bu hareketi sonucu yanal toprak basıncı katsayısı K_o ’dan K_a ’ya doğru bir yönelim gösterir.

Tablo 6. 1 Literatürde K'nin belirlenmesi için önerilen formüller ve K değerleri

Referans	Yanal toprak basıncı katsayısı		
	Formülasyon	Anahtar parametre	Önerilen
Bierbaumer (1913)	$K_a \rightarrow \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$	ϕ	K_a
Marston ve Anderson (1913)	$K_a \rightarrow \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$	ϕ	K_a
Terzaghi (1936, 1943)	-	-	1~1,6
Krynine (1945)	$K_E \rightarrow \frac{\cos(\phi)}{1 + \sin^2(\phi)}$	ϕ	K_E
Ladanyi ve Hoyaux (1969)	$K_E \rightarrow \frac{\cos^2(\phi)}{1 + \sin^2(\phi)}$	ϕ	K_E
Evans (1983)	-	-	$K_o \sim 1,2$
Vardoulakis vd. (1981)	$K \rightarrow \frac{1 - \sin(\phi_c)\cos^2(\theta + \frac{\pi}{2})}{1 + \sin(\phi_c)\cos^2(\theta + \frac{\pi}{2})}$	ϕ_c, θ	-
Handy (1985)	$K_w \rightarrow 1,06 [\cos(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2}) + K_a \sin(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2})]$	ϕ	K_w
ATV A 161 (1990)	-	-	K_o
Paik ve Salgado (2003)	$K_{av}^{min} \rightarrow \frac{\cos^2(\theta) + K_a \sin^2(\theta)}{1 - \frac{1}{3}(1 - K_a)\cos^2(\theta)}$	θ	K_{av}
Dewoolkar vd. (2007)	Geri hesaplama	-	> 1
Iglesia vd. (2011)	Geri hesaplama	-	> 1
Chevalier vd. (2012)	-	-	1~1,3
Iglesia vd. (2014)	$K_E \rightarrow \frac{\cos^2(\phi)}{1 + \sin^2(\phi)}$	ϕ	K_E
Chen vd. (2015)	$K_{av}^{max} \rightarrow \frac{\cos^2(\theta) + K_a \sin^2(\theta)}{\frac{1}{3}(1 - K_a)\sin^2(\theta) + K_a}$	θ	K_{av}
Han vd. (2017)	-	-	1
Lin vd. (2019)	-	-	$K_o \sim K_p$
Liang vd. (2020)	-	-	1
Lin vd. (2022)	$K_{av}^{min} \rightarrow \frac{\cos^2(\theta) + K_a \sin^2(\theta)}{1 - \frac{1}{3}(1 - K_a)\cos^2(\theta)}$	θ	K_{av}
	$K_{av}^{max} \rightarrow \frac{\cos^2(\theta) + K_a \sin^2(\theta)}{\frac{1}{3}(1 - K_a)\sin^2(\theta) + K_a}$	θ	K_{av}
Gülen ve Kılıç (2024)	-	-	$K_a \sim K_p$

Kum (S) ve borulu (P) deneyleri için SP-1'deki yatay ve düşey gerilmeler kemerlenme, boru esnemesi ve dane hareketine bağlı olarak değişir. Boru yatay simetri eksenindeki yatay ve düşey gerilmelerin farklı oranlarda değişmesi Eşitlik 6.5'te ifade edilen yanal toprak basıncı katsayısında farklılıklar meydana getirir. Eşitlik 6.5'te SP-1 ölçüm noktasındaki yatay ve düşey gerilmeler (σ_{h1} ve σ_{v1}) yerine Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4'teki değerler yazıldığında Eşitlik 6.6 ve Eşitlik 6.7 elde edilir.

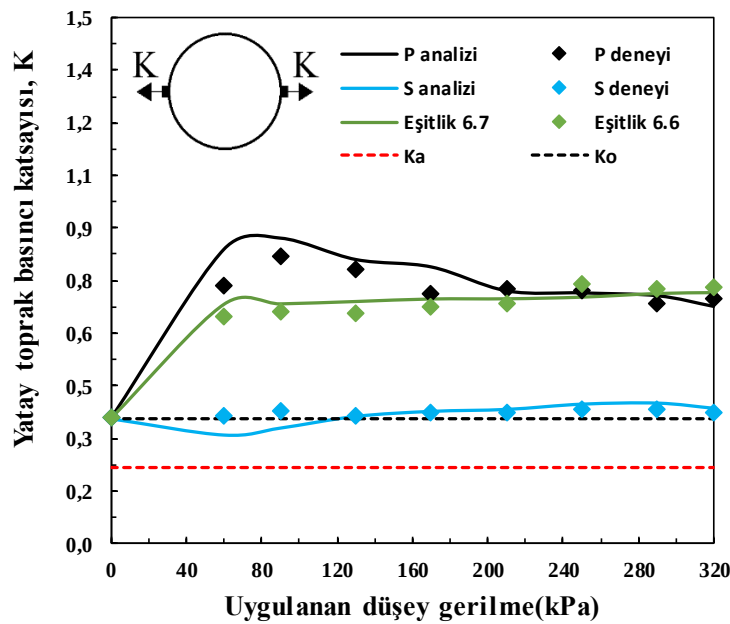
$$K = \frac{\sigma_{h1}}{\sigma_{v1}} \quad (6.5)$$

$$K_t = \frac{22,22Ph_t}{26,67Pv_t} = c_1 dr = 0,83dr \quad (6.6)$$

$$K_a = \frac{23,98Ph_a}{26,51Pv_a} = c_1 dr = 0,90dr \quad (6.7)$$

Eşitliklerde yer alan c_1 boru çap değişimleri ile komşu zemin prizmasındaki gerilmelerin ilişkisini gösteren katsayı, K_a analizler için geri hesaplamalardan belirlenen yanal toprak basıncı katsayısı, K_t deney ölçümlerinden belirlenen yanal toprak basıncı katsayısı

Şekil 6.9b'de deney ve analizden belirlenen dr 'nin fonksiyonu olarak Eşitlik 7'den hesaplanan K ile Eşitlik 6.5'ten geri hesaplamalardan elde edilen K değerlerinin değişimi Şekil 6.11'de sunulmuştur.



Şekil 6. 11 Uygulanan gerilmelere bağlı olarak K'nin değişimi

Şekil 6.7 incelendiğinde kum deneyi (S) ve analizi için SP-1 noktasında ölçülen ve hesaplanan yatay gerilme değeri 40 kPa civarındadır. 40 kPa yatay gerilme etkisinde SP-1'deki zemin danelerinin yanal ötelenmesi ise yaklaşık olarak 0,85 mm'dir. Danelerin tank duvarına doğru bu kısıtlı hareketi, başlangıçta Ko koşulunda olan yanal toprak basıncı katsayısında önemli bir değişim olmamıştır.

Şerit yüklemelere maruz kalan bir boru için az miktarda meydana gelen boru yatay çap değişimi, boru yay hattındaki zeminin tank duvarına doğru yönelmesine ve yanal toprak basıncı katsayısının artmasına neden olur. Bundan dolayı borulu deney ve analizi için ilk dört yükleme kademesinde boru yatay simetri eksenini civarındaki yatay gerilmelerin artışı düşey gerilmelerin artışından daha fazladır. Eşitlik 6.6 dikkate alındığında K artış eğilimindedir. Fakat uygulanan gerilme artışına bağlı olarak kemerlenmenin arttırılması, komşu zemin prizmasına aktarılan düşey gerilmeleri artırır. Bu durum yatay ve düşey gerilmelerdeki artışları yaklaşık olarak dengeler ve σ_h / σ_v oranının dar bir aralıkta değişmesine neden olur. Özellikle 5. yükleme kademesinden itibaren (210 kPa) yatay ve düşey gerilmelerin artışı daha stabil olur ve K belirli bir değere ulaşarak sabit kalır. Borulu deney için ilk dört yükleme kademesindeki K değerleri analizlerden belirlenen K değerlerinden daha düşük olsa da uygulanan düşey gerilmelerin artışı ile birlikte değerler daha tutarlı olur ve uygulanan düşey gerilmelerden etkilenmez.

Son olarak ilk dört yükleme kademesi için σ_h ve c_1 'in bir fonksiyonu olarak analiz ve deneylerden belirlenen K değerleri ile Eşitlik 6.6 kullanılarak deney ve analizlerden elde edilen K değerlerinden daha düşük ve artan gerilme seviyelerinde daha tutarlı hale gelmektedir.

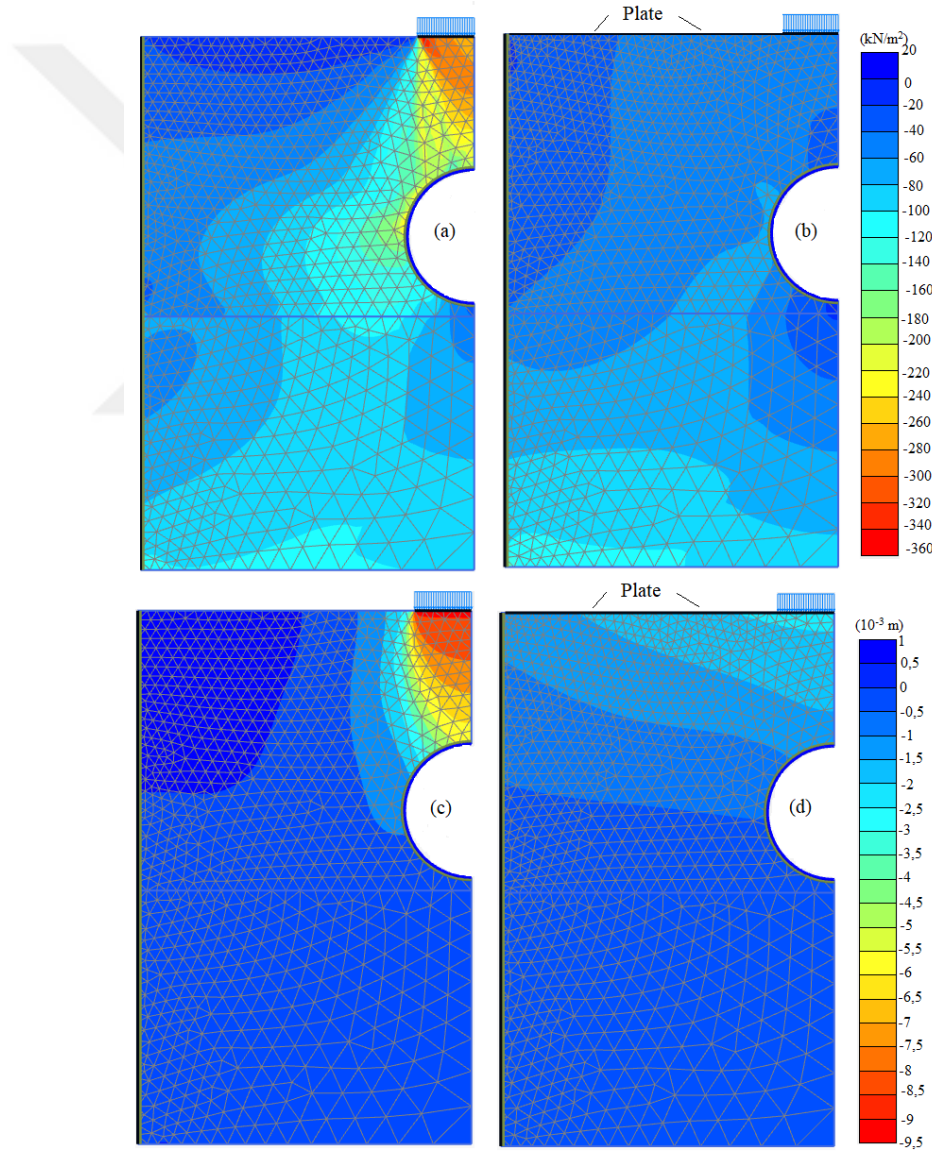
6.1.6 Parametrik Çalışmalar

Tam ölçekli laboratuvar deneylerini doğrulamak için oluşturulan Şekil 5.1'deki modeller, sınır durum koşulları ve malzeme özellikleri parametrik çalışmalarda değiştirilmeden kullanılmıştır. Başka bir deyişle, yapılan tüm analizlerde dikkate alınan değişken dışındadır tüm parametreler sabit tutulmuştur.

6.1.6.1 Yol Üst Kaplamasının Etkisi

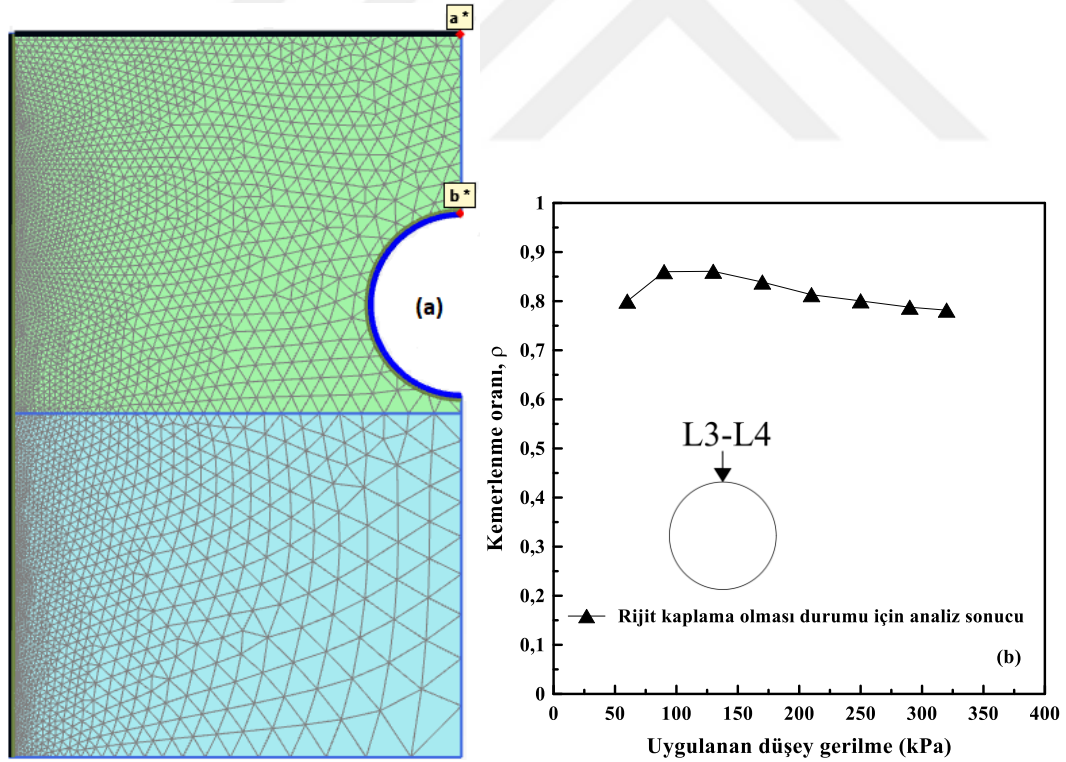
Şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü boru sistemlerinde yükün uygulandığı bölgede yol üst yapısının varlığı ve rijitliği gömülü boru sisteminin hizmet süresi boyunca hizmet verebilirliğini etkileyen parametrelerin başında gelir.

Boru davranışı, gerilmelerin dağılımı ve büyüklüğünden kayde değer derece etkilendiği için yüzeyden uygulanan yüklerin altında rijit bir yol üst kaplamasının varlığı boruya etkiyen gerilmeleri ve boru deformasyonlarını etkiler (Mahgoud ve El Naggar, 2020). Bu çalışma kapsamında rijit üst yapı kaplamasının şerit yüklemeye maruz kalan sığ gömülü HDPE boru davranışına etkisini araştırmak için gömülme derinliği, uygulanan düşey yükün büyüklüğü ve etki alanı ile model sınır durum koşulları değiştirilmeden yüzeyden uygulanan yükün altına boyutsuz ve ağırlıksız rijit bir "plaka eleman" tanımlanmıştır. Bu plaka eleman, rijit yol üst kaplamasını temsil etmektedir. Şekil 6.12’de borulu deney için plaka’lı ve plaka’sız analizlere ait gerilme ve deformasyonların dağılımı sunulmuştur.



Şekil 6. 12 Yol üst kaplamasının gerilme ve deformasyonlara etkisi a) plakasız gerilme b) plakalı gerilme c) plakasız deformasyon d) plakalı deformasyon

Rijit plaka tabakasının varlığı Şekil 6.12b’de görüldüğü üzere, gerilmelerin sistem içersinde daha homojen bir dağılım göstermesini sağlamıştır. Uygulanan düşey yük değeri değiştirilmeden gerilmelerin daha büyük bir alanda ve uniform bir dağılım göstermesi sonucu gerilmelerde ve deformasyonlarda önemli azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalma miktarı gerilmelerde %80, yüzeysel oturmalarda %84, boru yatay ve düşey çap değişimlerinde ise %82’dir. Özellikle Şekil 6.12d’de görüleceği üzere plaka tabakasının varlığı, boru taç bölgesi ile komşu zemin prizması arasında farklı oturmaları önemli derecede ortadan kaldırmıştır. Bu durum zemindeki kayma gerilmelerini mobilize edememiş ve f_s değerinin oluşmasını engellemiştir. Nihai durumda kemerlenmenin oluşması için elzem olan boru tepesi ile komşu zemin prizması arasındaki göreceli oturmalar meydana gelmediği için kemerlenme büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Bu durumu kemerlenme oranı ile ifade edecek olursak Şekil 6.13a’da belirtilen a ve b noktaları için Eşitlik 6.2’den hesaplanan kemerlenme oranının değişimi Şekil 6.13b’de gösterilmiştir. 0,8 ile 0,9 arasında değişim gösteren bu oran 1’e oldukça yakındır.



Şekil 6. 13 Rijit kaplamanın etkisi a) referans noktalar b) ρ değişimi

Gerçekleştirilen analizlerde plaka tanımlanmadan önceki boru gerilme ve deformasyonlarını plaka tanımlandıktan sonraki değerlerle karşılaştırmak amacıyla

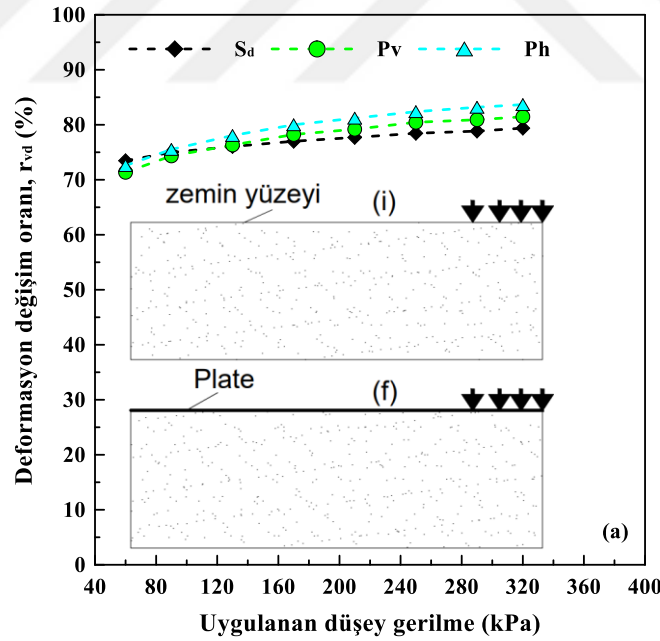
Eşitlik 6.8'deki gerilme değişim oranı (r_{vs}) ve Eşitlik 6.9'daki deformasyon değişim oranı (r_{vd}) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 6.14).

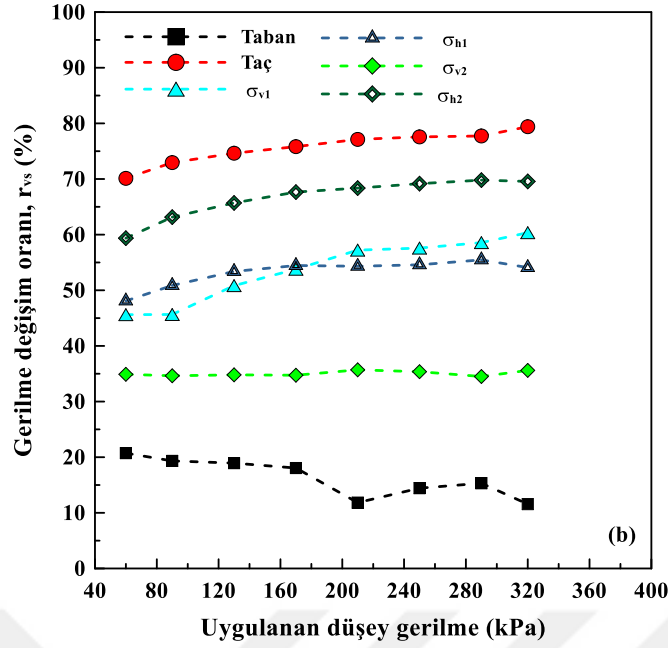
Boru yatay simetri ekseninden tank duvarına doğru düşey gerilmelerin değişimini belirlemek için L7 ve L8 gerilme ölçerlerin yer aldığı ve yatay simetri ekseninden 8 cm uzaklıktaki lokasyon analizler boyunca SP-2 ölçüm noktası olarak adlandırılmıştır. Bu nokta için belirlenen düşey gerilmeler σ_{v2} ile temsil edilirken yatay gerilmeler σ_{h2} ile temsil edilmiştir.

$$r_{vs} = \frac{\sigma_i - \sigma_f}{\sigma_i} \quad (6.8)$$

$$r_{vd} = \frac{d_i - d_f}{d_i} \quad (6.9)$$

Eşitliklerde yer alan d_i plaka'sız durum için boru deformasyonu ve ya yüzeysel oturmayı, d_f plaka'lı durum için boru deformasyonu ve ya yüzeysel oturmayı, σ_i plakasız durum için referans alınan ölçüm noktasındaki gerilmeyi, σ_f plakalı durum için referans alınan ölçüm noktasındaki gerilmeyi göstermektedir.



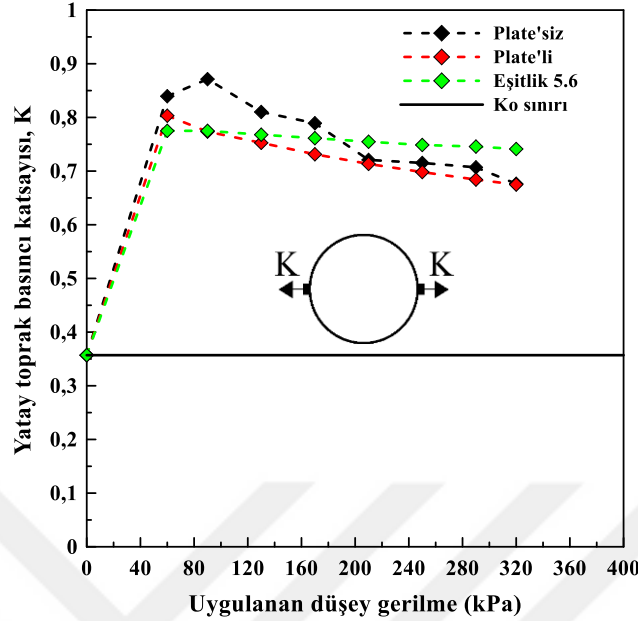


Şekil 6. 14 Rijit plaka tabakasının gerilme ve deformasyonlara etkisi a) r_{vd} b) r_{vs}

Boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişmesini sağlayan en önemli parametre boru yatay çap değişimleridir. Dolayısıyla boru yatay çapında meydana gelen %82 azalma, SP-1 ölçüm noktasındaki yatay gerilmelerde (σ_{h1}) % 55'e varan azalmalara neden olmuştur. Zemin üst kotunda rijit plaka olmadığında, boru esnemesine bağlı olarak oluşan σ_{h1} değerleri tank duvarına yakın bir bölgede %30 azalmaktadır. Fakat rijit plaka tabakasının varlığı ile önemli derecede azalan σ_{h1} , boru yatay simetri ekseninden 0,5D mesafeden sonra etkisini önemli derece kaybeder. Bu mesafeden sonra yanıl torak basıncı katsayısı tank duvarına doğru Ko koşuluna yakın bir yönelim gösterir. Nihai durumda Şekil 6.14a'daki boru yatay ve düşey çap değişimleri arasındaki değişim ile Şekil 6.14b'deki SP-1 ölçüm noktasındaki yatay ve düşey gerilmeler (σ_{h1} ve σ_{v1}) arasındaki değişim paralellik göstermektedir.

Şekil 6.14b'de SP-1 ölçüm noktasındaki yatay ve düşey gerilmeleri temsil eden σ_{h1} ve σ_{v1} değerlerindeki değişim yaklaşık olarak benzerdir. Eşitlik 6.5'te ifade edildiği gibi bu iki değer K değerini belirleyen temel gerilmelerdir. Dolayısıyla σ_{h1}/σ_{v1} oranı yani K değişimi oldukça sınırlıdır. Benzer şekilde, Eşitlik 6.7'deki K değerini belirleyen d_r ve c_1 değerlerinde bazı değişimler olmuştur. Deformasyon değişim oranı farklı yükleme kademeleri dikkate alındığında 0,69 ile 0,72 arasında kısıtlı bir değişim sergilerken, c_1 değeri artarak 1,07 değerine ulaşır. K'yi oluşturan iki

bileşenden birinin artması ve diğerinin azalması sonucu K değerinde önemli bir değişim meydana gelmemiştir (Şekil 6.15).



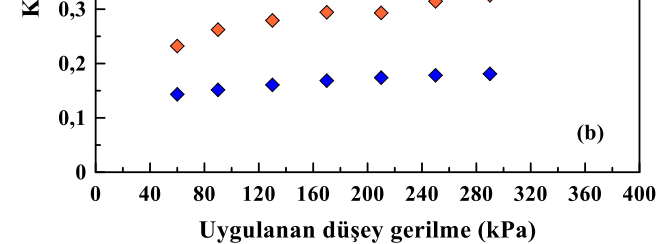
Şekil 6. 15 Rijit kaplama tabakasının K 'ye etkisi

6.1.6.2 Örtü Yükü Kalınlığının Etkisi

Şerit yüklemeye maruz kalan sığ gömülü boru sistemleri için örtü yükü başka bir deyişle gömülme derinliği boru davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüklemeler altında meydana gelen maksimum yüzeysel oturmalar (S_d) Eşitlik 6.1'de ifade edildiği gibi dolgunun oturmasının (u_{sd}) ve borunun düşey yer değiştirmesinin (u_{pd}) toplamıdır. Gömülme derinliğindeki artış, dolgu kalınlığının artmasına dolayısıyla dolgu oturmasının artışına neden olur. Benzer şekilde şerit uygulanan gerilmelerin derinlikle azalması ile boruya etkileyen gerilmeler yani boru düşey yer değiştirmesi azalır. Nihai durumda yüzeysel oturmalarda önemli bir değişim meydana gelmemesine rağmen boru düşey yer değiştirmesi kemerlenme etkisini önemli derecede etkilemektedir.

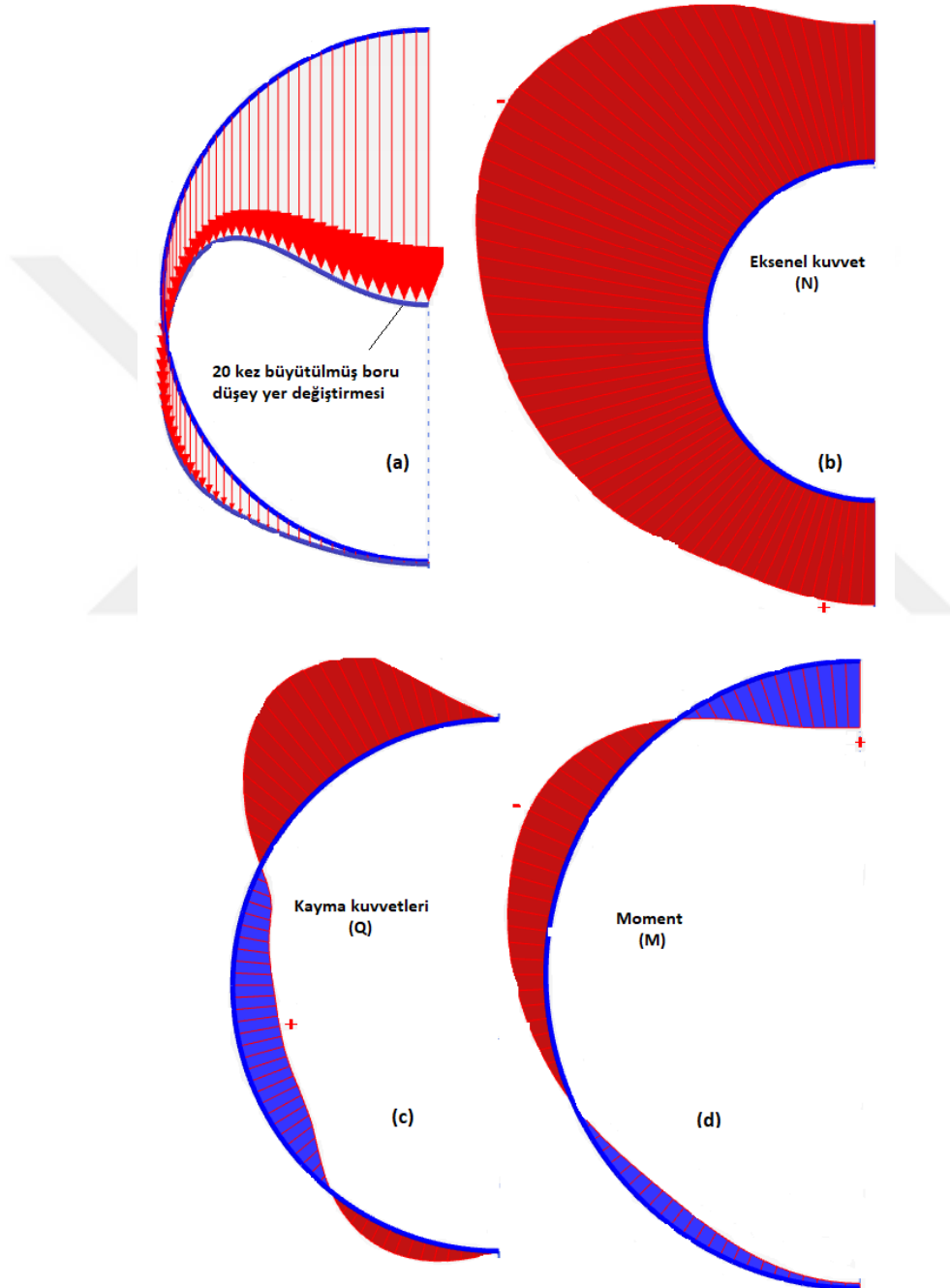
Trafik yüklerini temsil eden şerit yükleme koşulları için örtü yükü kalınlığındaki artış, boruya etkileyen gerilmelerde önemli değişimlere neden olur (Mahgoud ve El Naggar, 2020; Chaallal vd., 2015; Fang vd., 2020). Gömülme derinliğindeki artışla birlikte boruya etkileyen gerilmelerin azalması, boru düşey çap değişimi ve kalp şeklindeki deformasyon formu kademeli olarak azalır. Boru tepesinde nispeten daha homojen deformasyon formu, danelerin taç bölgesine yönelmesini kısıtlar.

Figure 10 consists of two parts. Part (a) is a line graph showing the vertical stress distribution in the pipe. The x-axis represents the applied vertical stress (Uygulanan düşey gerilme) in kPa, ranging from 0 to 400. The y-axis represents the vertical stress in the pipe (Boru tacındaki düşey gerilme) in kPa, ranging from 0 to 60. Six data series are plotted for different pipe diameters: 0.5D (black diamonds), 1D (green diamonds), 2D (orange diamonds), 3D (blue diamonds), 0.75D (red diamonds), and 1.5D (cyan diamonds). The stress increases with the applied stress, and the rate of increase is higher for smaller diameters. Part (b) is a schematic diagram of the pipe cross-section showing the vertical stress distribution. The diagram shows a semi-circular cross-section of the pipe with a downward arrow indicating the applied stress. The stress distribution is shown as a curve that peaks at the top of the pipe and decreases towards the bottom.



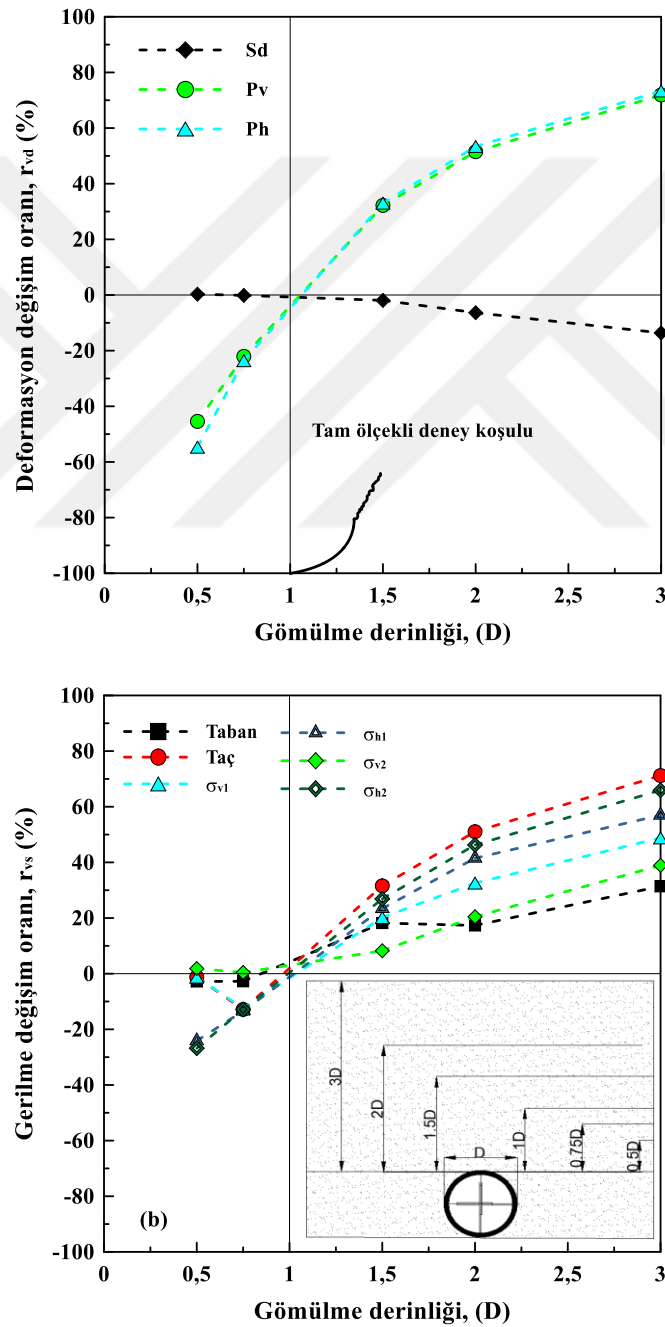
şekilde görüldüğü gibi 0.5D gömülme derinliği dışındaki veriler oldu

göreceli olarak diğer bölgelere göre aşağı yöndeki hareketi ve kalp şeklindeki deformasyonların belirginleşmesi, taç bölgesinde oluşması gereken gerilmelerin taç bölgesinden belirli bir uzaklıkta oluşmasına ve boru taç bölgesindeki gerilmelerin azalmasına neden olur (Şekil 6.17). Fakat Eşitlik 1.4 meydana gelen bu durumu dikkate alamadığı için Şekil 6.16’da $0,5D$ için hesaplanan gerilmeler uyumlu değildir.



Şekil 6. 17 $0,5D$ gömülme derinliği için boru deformasyon formu ve kesit değerleri a) $|U_y|$ b) N c) Q d) M

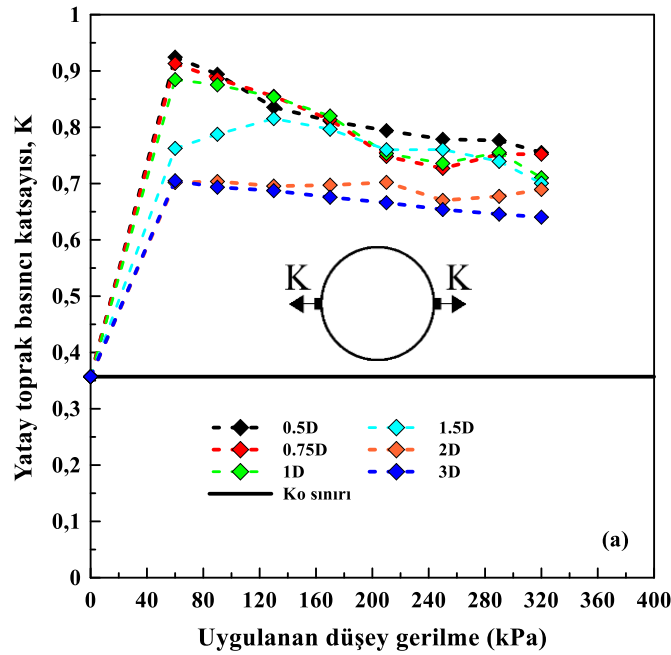
Gömülme derinliğindeki değişim, taç bölgesine etki eden gerilmeleri, boru esneme davranışını ve kemerlenmeyi önemli derecede etkiler. 0,5D ile 3D aralığında değişen farklı gömülme derinlikleri için 1D gömülme derinliği, tam ölçekli laboratuvar deneylerindeki gömülme derinliği, referans alınarak r_{vs} ve r_{vd} değişimi belirlenmiştir (Şekil 6.18). Sabit bir gömülme derinliği için farklı yükleme kademelerindeki r_{vs} ve r_{vd} değerleri yaklaşık olarak benzer bulunmuştur. Genel bir değerlendirme yapabilmek adına her gömülme derinliği için ortalama r_{vs} ve r_{vd} kullanımı tercih edilmiştir.

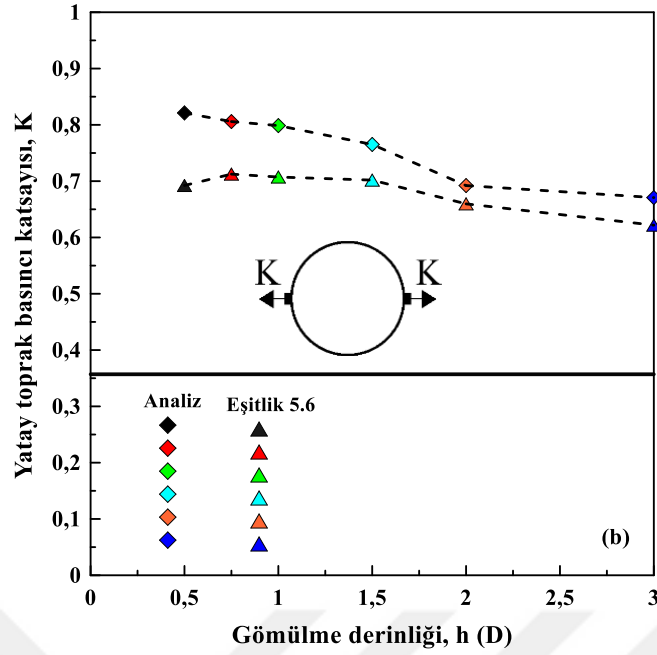


Şekil 6. 18 Farklı h değerlerinin gerilme ve deformasyonlara etkisi a) r_{vd} b) r_{vs}

Yüzeyden uygulanan uniform şerit sürşarj nedeniyle zemindeki gerilme artışlarının derinlikle azalması yani gömülme derinliğindeki artış boruya etkiyen gerilmelerin azalmasına ve boru esneme davranışının sınırlandırılmasına neden olur. Dolayısıyla boru yatay çap değişiminin azalmasına paralel olarak SP-1 ölçüm noktasındaki yatay gerilmeler (σ_{h1}) benzer bir davranış gösterir. Fakat bu gerilmelerin etkisi tank duvarına yaklaştıkça yaklaşık %30 azalır. Benzer şekilde gerilmelerin derinlikle azalması sonucu komşu zemin prizmasına aktarılan toplam gerilme miktarının da azalması ile SP-1 ve SP-2 ölçüm noktalarındaki düşey gerilmelerin azalmasına neden olur.

Örtü yükü kalınlığının artışı dikkate alındığında SP-1 ölçüm noktasındaki yatay gerilmelerdeki (σ_{h1}) azalma düşey gerilmelerdeki (σ_{v1}) azalmadan daha fazladır ve σ_{h1}/σ_{v1} oranı derinlikle azalır. Gömülme derinliğindeki kademeli artış dr değerinin 0,74 ile 0,83 aralığında bir artış sergilerken; c_1 ise 0,85-0,89-0,90-0,92-0,88-0,85 değerlerini alır. Şekil 6.19a’da farklı yükleme kademeleri ve farklı örtü yükü kalınlıkları dikkate alınarak analizlerden σ_{h1}/σ_{v1} oranı için belirlenen K değerlerinin değişimi sunulmuştur. Şekil 6.19b’den ise Eşitlik 6.7’den her gömülme derinliği için nihai durumda hesaplanan dr ve c_1 kullanılarak belirlenen K değerleri ile Şekil 6.19a’da her gömülme derinliği için elde edilen ortalama K değerleri sunulmuştur.





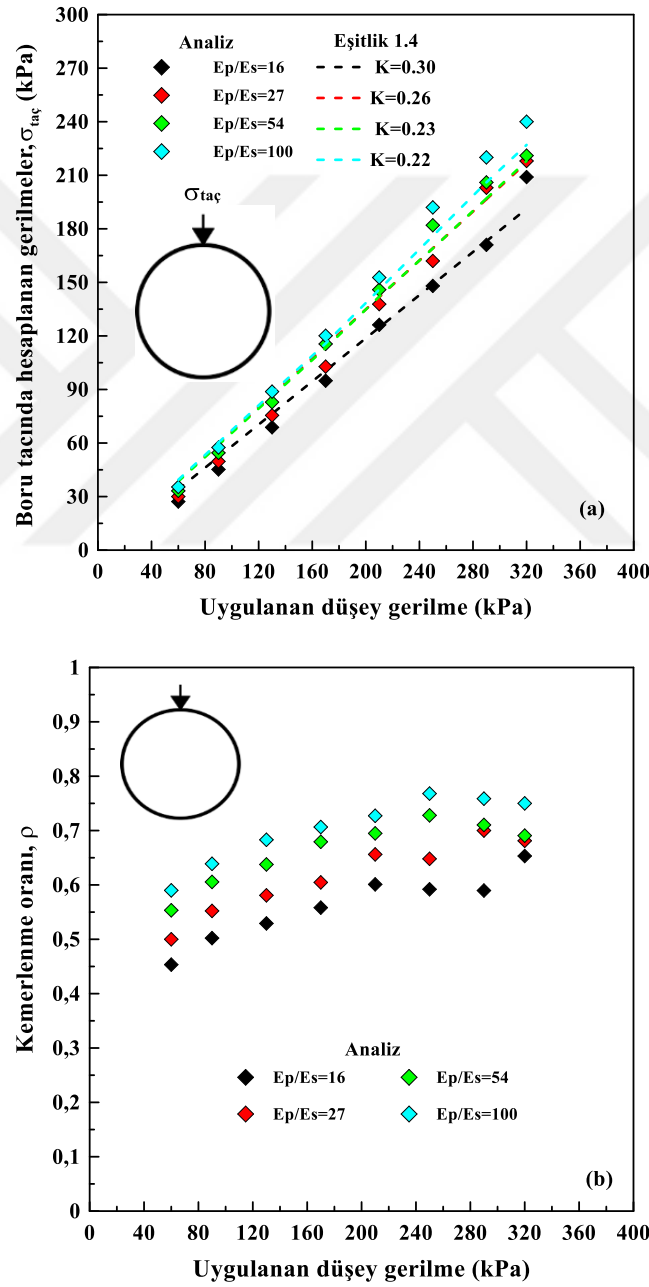
Şekil 6. 19 SP-1 için K değerlerindeki değişim a) farklı yükleme kademeleri için
K b) farklı r_s değerleri için ortalama K

6.1.6.3 Boru Rijitliğinin Etkisi

Tam ölçekli laboratuvar deneyleri için doğrulanan model üzerinde boru elastisite modülü (E_p) değeri dışındaki tüm değişkenler sabit tutularak E_p değeri kademeli olarak artırılmıştır. Kullanılan $E_p=450$ MPa farklı esnek boru türleri (koruge HDPE, PVC vb.) dikkate alındığında Akınay (2017) hariç en düşük elastisite modülünü temsil eder (Tablo 1.8). Bundan dolayı gerçek malzeme davranışını yansıtabilmek için bu değerden daha küçük E_p değerleri tercih edilmemiştir. 450 MPa'dan 2800 MPa'ya kadar kademeli olarak artırılan E_p değerleri için analizler aynı model üzerinde gerçekleştirilmiştir. E_p için belirlenen bu aralık Tablo 1.7'de uluslararası standartlarda esnek borular için sunulan değerler referans alınmıştır.

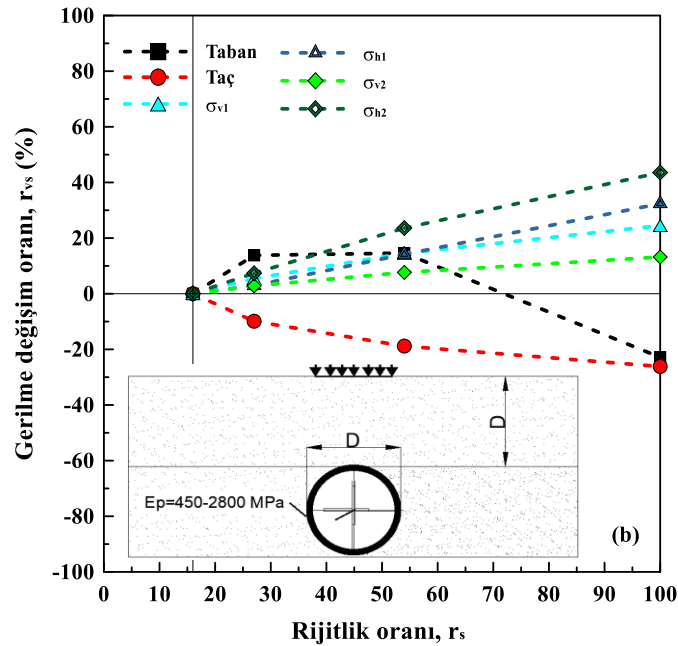
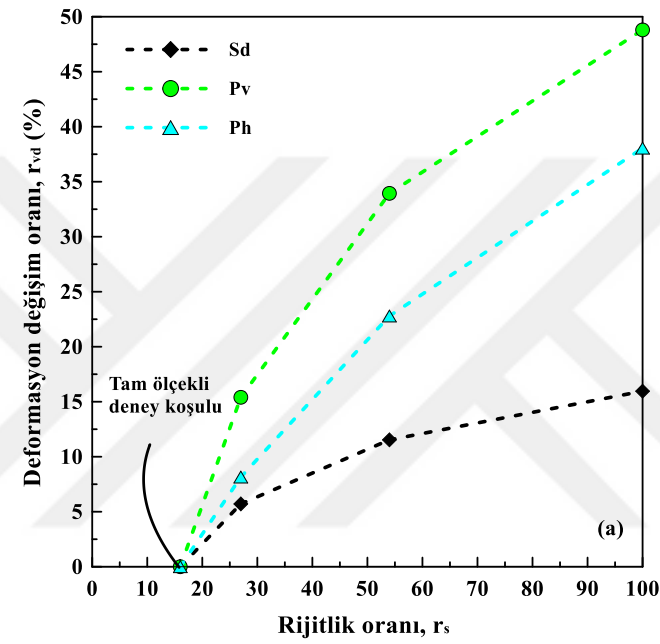
Gömülü boru sistemine uygulanan gerilmeler, boru çevresinde yer alan dolgunun ve borunun göreceli rijitlikleri ölçüsünde karşılanır (Faragher vd., 2000; Fang vd., 2020). E_p değerlerindeki kademeli artış borunun daha rijit bir davranış sergilemesine ve boru esneme davranışının önemli derece kısıtlanmasına (P_v ile P_h) neden olur. Özellikle boru düşey çap değişimlerindeki azalma toplam yüzeysel oturmanın u_{pd} bileşeninde düşüşe sebep olur. Dolayısıyla boru rijitliğindeki artış, merkez zemin prizmasından boruya iletilen gerilmelerin ve merkez zemin prizmasındaki dolgunun oturmasını artırır. Benzer şekilde boru düşey çap

değişimlerdeki azalma kemerlenmeyi olumsuz yönde etkiler. Şekil 6.20a'da Eşitlik 1.4 ve analizlerden hesaplanan gerilmelerin değişimi ile Şekil 6.20b'de kemerlenme oranının değişimi sunulmuştur. Verilerin daha anlaşılır ve özet olarak sunulması için E_p 'nin E_s 'ye oranını temsil eden rijitlik oranı (r_s) kavramı kullanılmıştır. E_s değerinin sabit ve 28 MPa olduğu analizlerde E_p artışına paralel olarak $\sigma_{taç}$ değerleri de artmaktadır. Kemerlenme oranının kademeli olarak 1'e yaklaşması, kemerlenme etkisinin azaldığının en büyük göstergesidir.



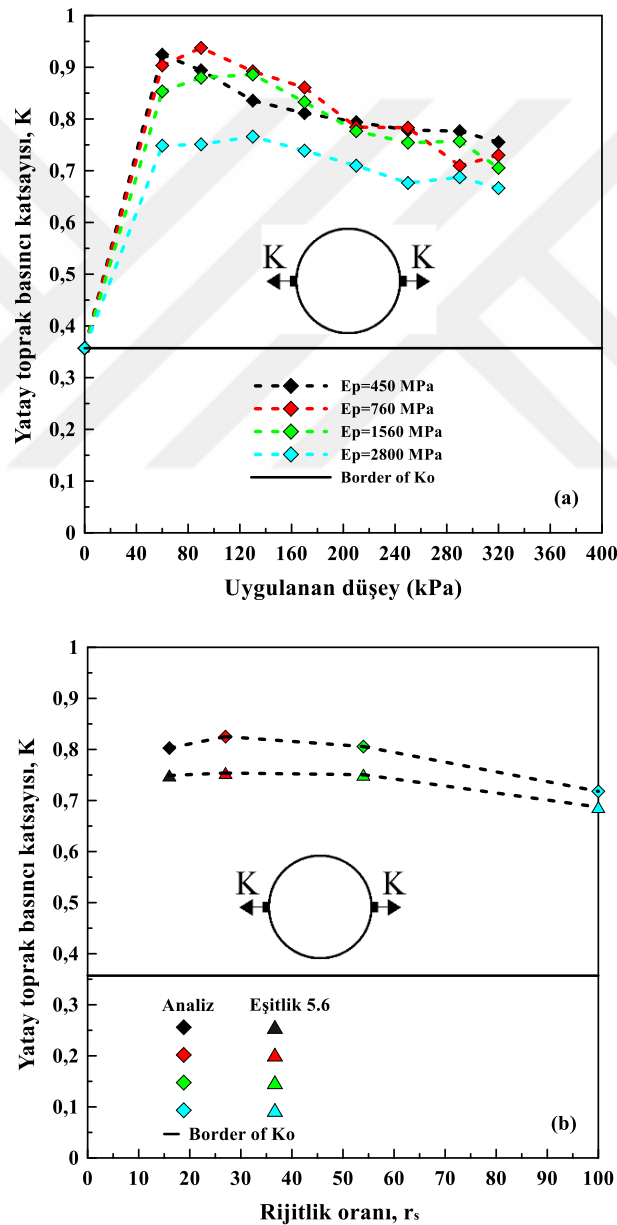
Şekil 6. 20 Farklı r_s değerleri boru tac bölgesindeki gerilmelerin değişimi a) Eşitlik 1.4 ve analizlerden elde edilen gerilmeler b) kemerlenme oranı

Farklı r_s değerleri için $E_p=450$ MPa referans alınarak hesaplanan r_{vd} ve r_{vs} değerlerinin değişimi Şekil 6.21’de sunulmuştur. E_p artışı yüzeysel oturmalarda, boru düşey ve yatay çaplarında azalmalara neden olur. Kemerlenme etkisinin azalması boru taç ve tabanındaki gerilmeler ile boru tarafından taşınan gerilmeleri artırır. Bu durum komşu zemin prizmasına aktarılan düşey gerilmeleri azalttığı için SP-1 ve SP-2 ölçüm noktalarındaki düşey gerilmeler azalır. Özellikle boru yatay çap değişiminde %32’ye varan azalma, gerilmelerdeki en ciddi azalmayı SP-1’deki yatay gerilmelerde meydana getirmiştir.



Şekil 6. 21 Farklı r_s 'ler için deformasyon ve gerilme değişim oranları a) r_{vd} b) r_{vs}

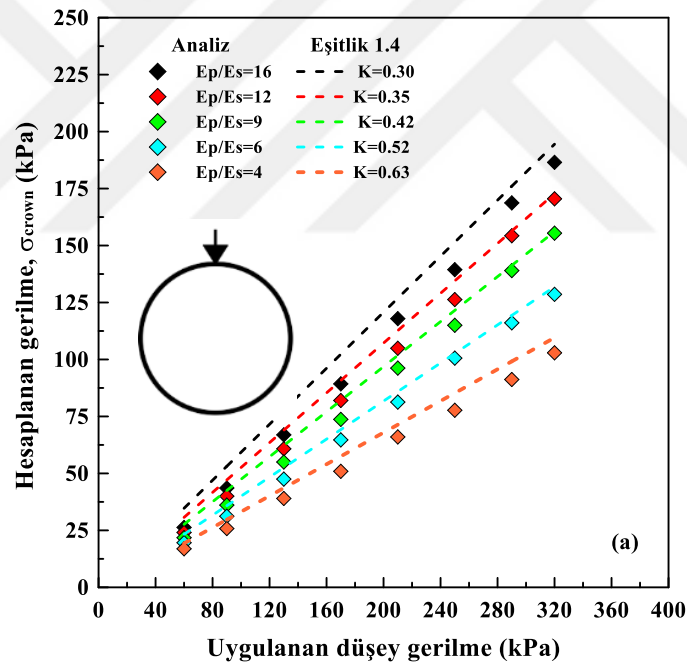
Ep artışına paralel olarak boruda meydana gelen kalp şeklindeki deformasyon formu da kademeli olarak ortadan kalkar ve boru tepesinde daha homojen bir deformasyon dağılımı oluşur. Boru düşey ve yatay çap değişimlerine bağlı olarak deformasyon oranı kademeli olarak 1'e yaklaşır. Rijitlik oranları 16, 27, 54 ve 100 için belirlenen σ_{h1}/σ_{v1} değerleri sırasıyla 0,79-0,85-0,91-0,94 ve Eşitlik 6.7'deki c_1 değerleri sırasıyla 0,90-0,85-0,78-0,73 olmaktadır. Farklı yükleme kademeleri ve farklı Ep değerlerinde σ_{h1}/σ_{v1} oranı için hesaplanan K değerleri Şekil 5.22a'da gösterilmiştir. Buna ek olarak Şekil 6.22a'da her bir Ep değeri ve 320 kPa düşey gerilme için belirlenen ortalama K değerleri Şekil 6.22b'de sunulmuştur.

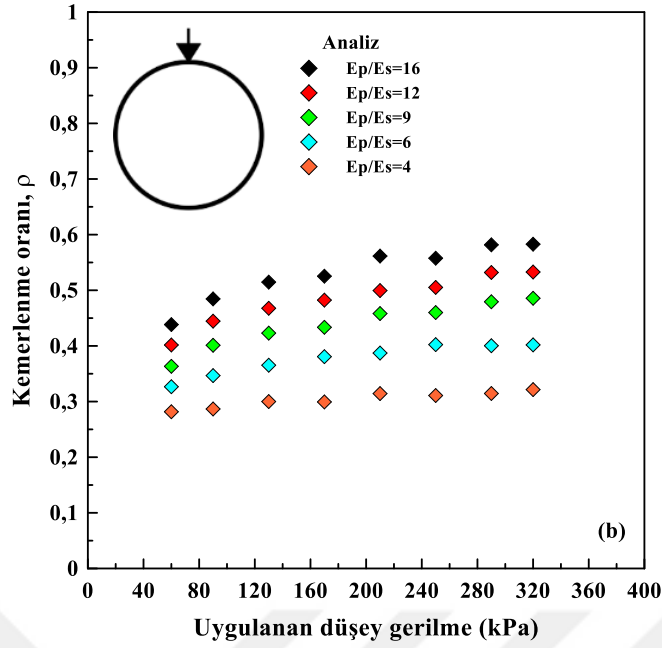


Şekil 6. 22 SP-1 için K değerlerindeki değişim a) farklı yükleme kademeleri için
K b) farklı r_s değerleri için ortalama K

6.1.6.4 Dolgu Rijitliğinin Etkisi

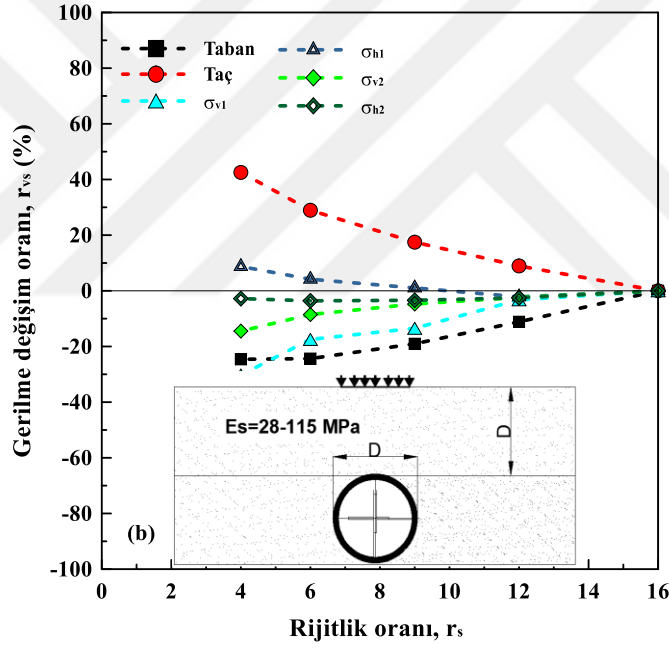
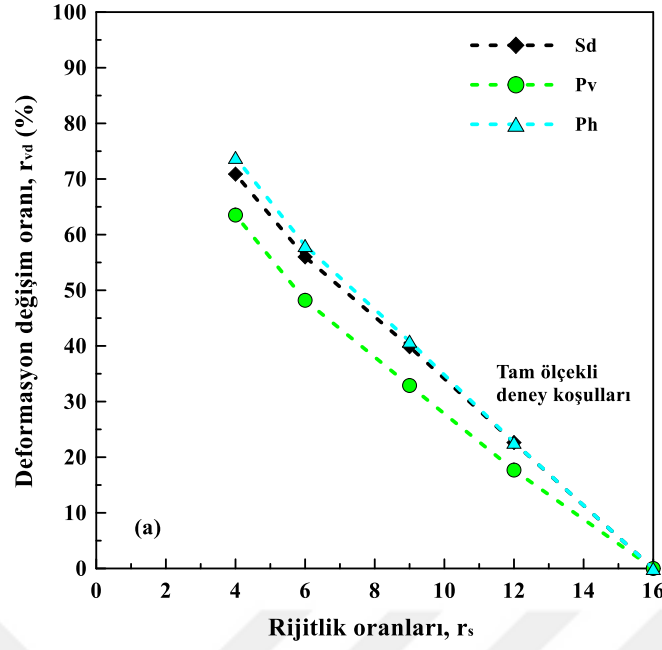
Boru çevresinde yer alan dolgunun rijitliği boru esneme davranışını, gerilme dağılımını ve kemerlenmeyi önemli derece etkiler. Bu durumu incelemek için E_p değeri sabit tutularak E_s değeri kademeli olarak 28 MPa'dan 115 MPa'ya kadar artırılmıştır. Bu aralık, literatür çalışmalarında dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zeminlerin E_s 'leri referans alınarak belirlenmiştir. E_s 'deki artış, dolgu tarafından taşınan gerilmelerin artmasını sağlarken boru tarafından taşınan gerilmeleri azaltır. Bu durum kemerlenme etkisinin artışı ile doğrudan ilgilidir. Dolayısıyla E_s değerindeki kademeli artış merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki etkileşimin (f_s) artmasını sağlar (Kang vd. 2009, Tafreshi vd. 2020). Kemerlenme etkisinin artması, merkez zemin prizmasındaki K 'yi artırır ve bu durum boru tepesine etkiyen gerilmeleri ciddi oranlarda azaltır. Şekil 6.23'te Eşitlik 1.4 ve analizler için $\sigma_{taç}$ ve kemerlenme oranının değişimi sunulmuştur.





Şekil 6. 23 Farklı r_s değerleri boru taç bölgesindeki gerilmelerin değişimi a)
Eşitlik 1.4 ve analizlerden elde edilen gerilmeler b) kemerlenme oranı

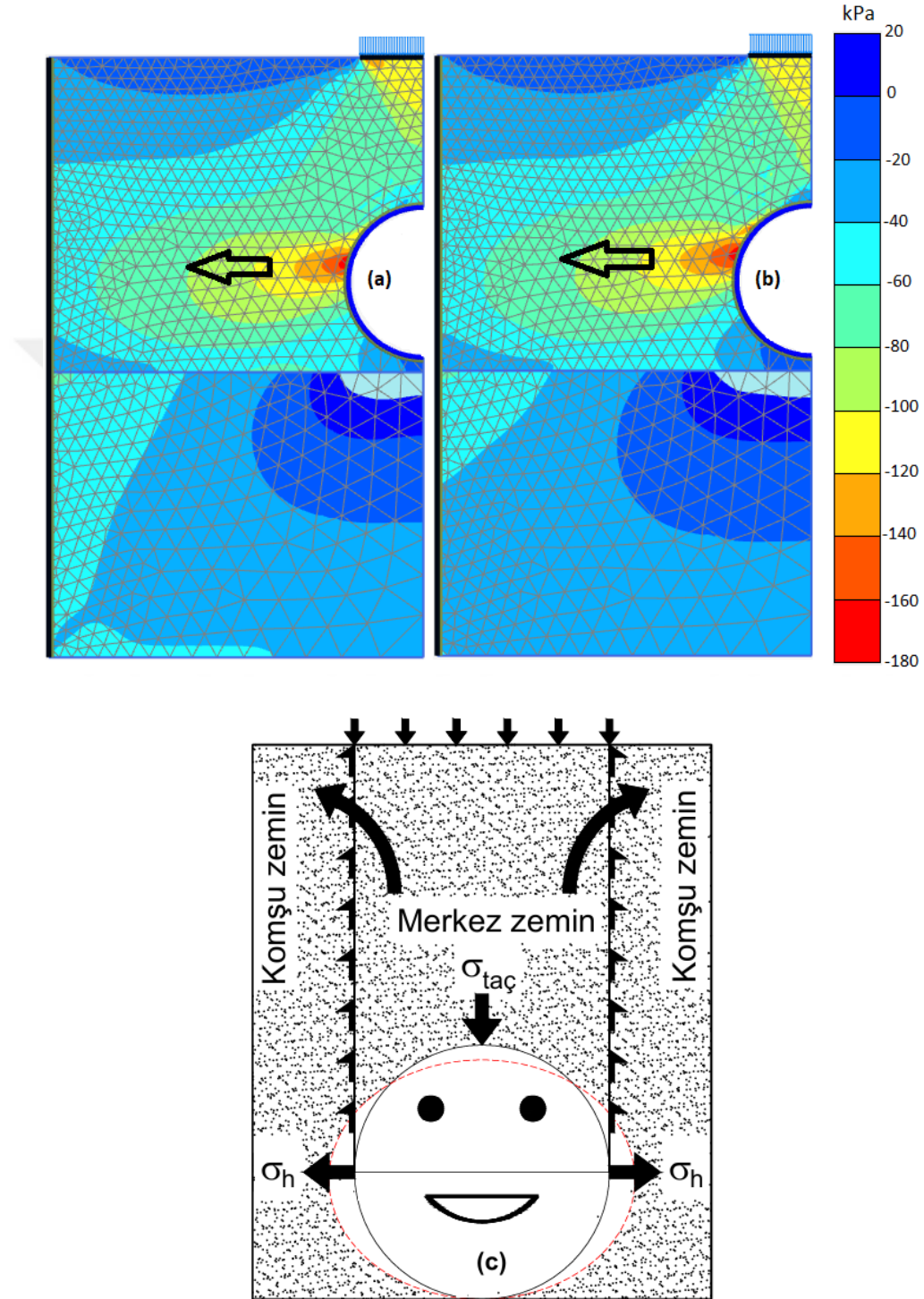
Es değerlerindeki artış, zeminden kaynaklanan yüzeysel oturma değerini azaltırken dolgu tarafından taşınan yükleri artırır. Nihai durumda boru tarafından taşınması gereken yükler azaldığından borudan kaynaklanan düşey yer değiştirmeleri azaltır. Özellikle boru çevresinde yer alan ve boruyu bir bütün olarak saran dolgunun Es değerindeki artış, dolgudan boruya sağlanan zemin desteğinin etkisini artırarak boru düşey ve yatay çap değişimlerini önemli derece azaltır (Terzi vd., 2012; Fang vd., 2020). Boru esneme davranışının boru etrafında yer alan dolgu tarafından sınırlandırılması ve gerilmelerde meydana gelen değişim, E_p artışı ile meydana gelen değişimin tersidir ve Bölüm 6.1.6.3 yapılan değerlendirmelerin tam tersi bu bölümde tekrarlanmamıştır. Şekil 6.24'te Es artışı neticesinde hesaplanan r_{vs} ve r_{vd} değişimleri bu durumu destekler niteliktedir.



Şekil 6. 24 Farklı r_s 'ler için deformasyon ve gerilme değişim oranları a) r_{vd} b) r_{vs}

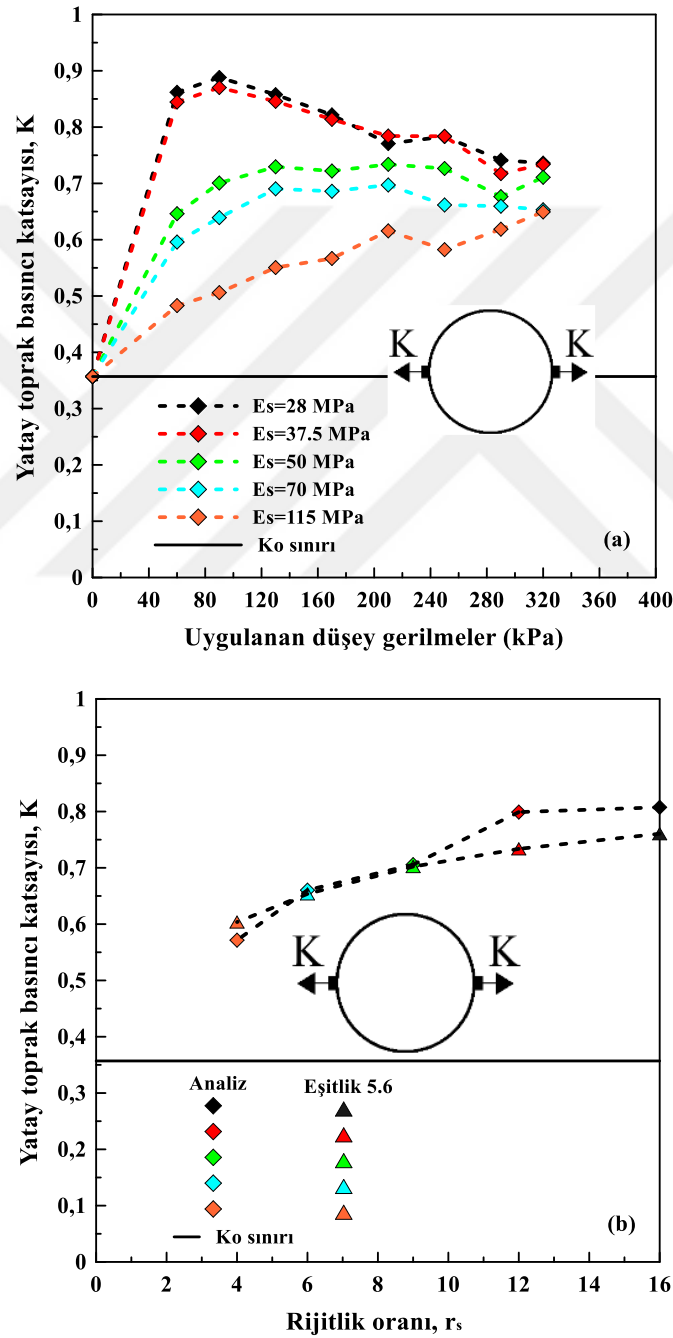
SP-1'deki yatay gerilmelerin değişmesine neden olan boru yatay çap değişimindeki %76 azalma, bu noktadaki yatay gerilmeleri maksimum %10 azaltmış ve etkileri tank duvarına kadar devam etmiştir. Yani dolgu rijitliğinin artması boru yatay çap değişimini önemli derecede sınırlandırsa da borudan zemine iletilen yatay gerilmelerde önemli bir değişim meydana getirmemiştir (Şekil 6.25). Bu durum yan yana inşa edilecek sığ gömülü esnek boru sistemleri için boru esneme davranışı sonucu meydana gelen yatay gerilmelerin azaltılması için dolgu sıkılık derecesinin

etkisiz olduğunu göstermektedir. Çünkü sabit E_p değeri için boru yatay çapındaki küçük değişimler bile yatay gerilmelerin oluşması için yeterli olmaktadır. Fakat dolgu rijitliğinin artışı ve buna bağlı olarak dolgu tarafından taşınan gerilmelerin artışı SP-1'deki düşey gerilmelerde %30' a varan artışlar meydana getirmiştir.



Şekil 6. 25 Dolgu rijitliğine göre yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin değişimi a) $E_s=28$ MPa b) $E_s= 115$ MPa c) şematik olarak gerilmelerin tranferi

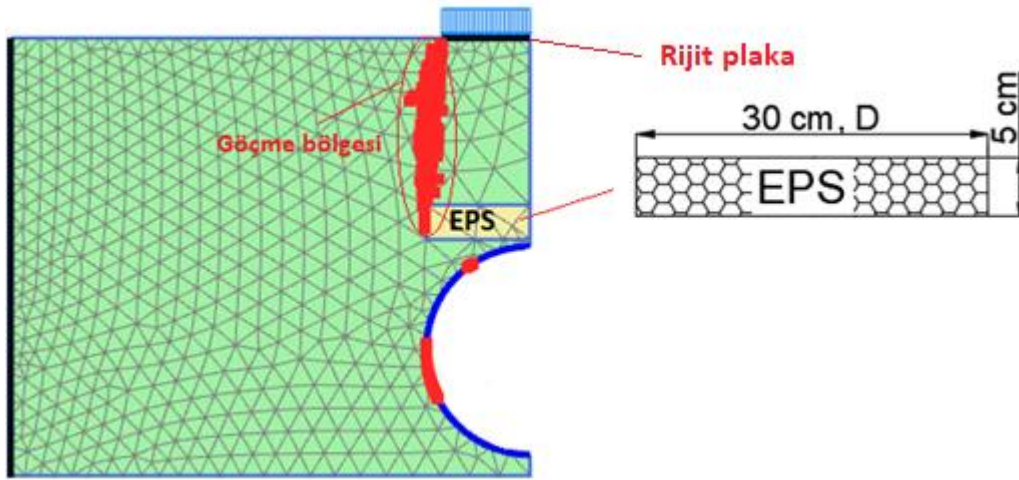
Dolayısıyla yatay simetri eksenine dikkate alındığında analizlerden σ_{h1}/σ_{v1} oranından elde edilen K değerleri artan Es değerlerine paralel olarak azalma eğilimi gösterirler. Buna ek olarak 16, 12, 9 ve 6 rijitlik oranları için dr değerleri sırasıyla 0,79-0,73-0,6-0,63 olarak belirlenmiştir. Eşitlik 6.7 için bu dr değerlerine karşılık olan c_1 katsayıları ise sırasıyla 0,97-1-1,02-1,05 ve 1,07 bulunmuştur. Nihai durumda farklı yükleme kademeleri ve farklı r_s değerleri için analizler ve Eşitlik 6.7'den belirlenen K değerlerinin değişimi Şekil 6.26'da sunulmuştur.



Şekil 6. 26 SP-1 için K değerlerindeki değişim a) farklı yükleme kademeleri için
K b) farklı r_s değerleri için ortalama K

6.2 Borulu (P) ve EPS Geofoam ile Desteklenen (E1) Deneylerine Ait Verilerin Değerlendirilmesi

Farklı mühendislik yapılarına etkiyen gerilmeleri ve oluşan deformasyonları azaltmak amacıyla kullanılan EPS Geofoamun Şekil 2.20’de sunulan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi oldukça önemlidir. Özellikle gerilme seviyesine bağlı olarak Şekil 2.21’de hesaplanan elastisite modullerindeki ani düşüşler ve buna bağlı olarak meydana gelen aşırı deformasyonlar oldukça kritiktir. EPS Geofoam ile desteklenen tam ölçekli laboratuvar deneylerinin doğrulanması için oluşturulan 2D modelde EPS Geofoam için malzeme modeli Şekil 2.20 ve literatür çalışmaları dikkate alınarak Hardening Soil Bünye Modeli (HS) ve lineer elastik model (LE) tercih edilmiştir. EPS Geofoamun LE davranış sergilediği gerilme seviyelerinde HS malzeme modelinden deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edilememiştir. Bundan dolayı analizlerde LE malzeme modeli ve Şekil 2.21’deki farklı bölgeleri temsil eden farklı elastisite modulleri kullanılmıştır. Akınay (2017) ve Kefçi (2020) *uniform yayılı yükleme koşulları için* farklı bölgeleri temsil eden E değerlerini kullanarak başarılı sonuçlar elde etmelerine rağmen bu çalışma kapsamındaki *şerit yükleme koşulları* dikkate alındığında E değerlerindeki ani değişim analizleri olumsuz etkilemiştir. Kullanılan "plaka eleman" ile zemin arasında meydana gelen ve detayları Şekil 5.2’de sunulan göçme bölgesi ani deformasyon modulleri değişiminde daha fazla etkilenmiştir (Şekil 6.27). Bu sorunu gidermek için farklı yöntemler denense de sorun giderilememiş ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler tüm yükleme kademeleri için modellenememiştir. Bundan dolayı, EPS Geofoamun lineer elastik davrandığı gerilme aralığı için analizler gerçekleştirilerek veriler karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. 27 EPS Geofoamun aşırı deformasyonu ve göçme bölgesi

6.2.1 Yüzeysel Oturmalar (S_d)

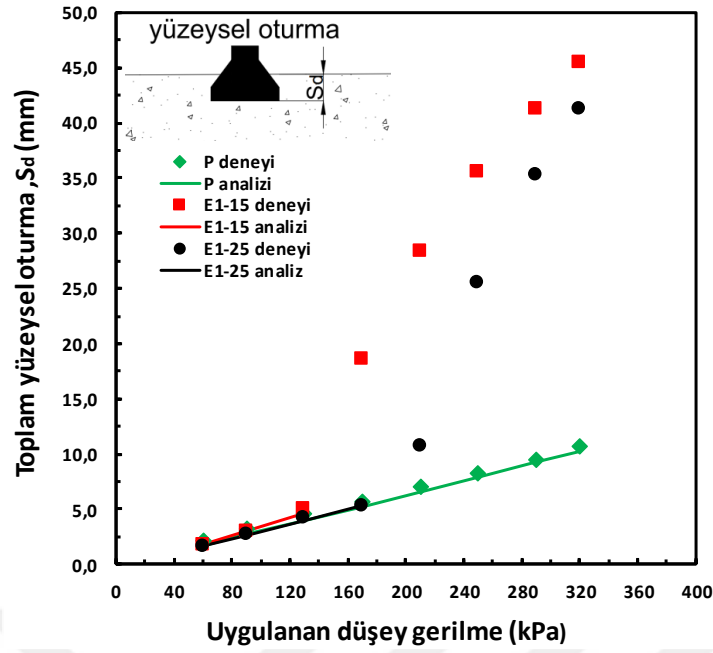
Şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü esnek borunun taç bölgesinde boru çapı kadar bir genişlikte ve 5 cm ($D/6$) kalınlığında EPS Geofoam kullanılabirliği tam ölçekli laboratuvar deneyleri ve 2D sonlu elemanlar yazılımı ile test edilmiştir. Boruya etkiyen gerilmeleri ve boru çap değişimlerini azaltmak için kullanılan sıkışabilirliği yüksek malzemelerin kullanımı ile başarılı sonuçlar elde edilse de meydana gelen yüzeysel oturmaların büyüklüğü tam olarak değerlendirilmemiştir (Akınay, 2017; Al Naddaf vd., 2019; Mahgoud ve El Naggar, 2020). Özellikle üzerinde yol üst yapısı olan gömülü boru sistemlerinde meydana gelecek yüzeysel oturmalar, yol üst yapısının hizmet verilebilirliği için önemlidir. Boru tepe noktasında veya boru çevresinde EPS Geofoam kullanımını içeren gömülü boru sistemlerindeki yüzeysel oturmalar Eşitlik 6.10'da ifade edildiği gibi 3 temel bileşenden oluşmaktadır. İlk iki bileşen Bölüm 6.1 ve Eşitlik 6.1'de detaylandırılmıştır. Özellikle EPS Geofoamun düşey sıkışma miktarını temsil eden u_{ed} ve boru düşey yer değiştirmesi (u_{pd}) gömülü boru sistemindeki kemerlenmenin oluşmasında benzer etkiler meydana getirir.

$$\Sigma S_d \rightarrow u_{sd} + u_{pd} + u_{ed} \quad (6.10)$$

Aynı koşullar altında gerçekleştirilen borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler karşılaştırıldığında boru taç bölgesinde rijitliği boruya ve dolguya göre daha düşük olan EPS Geofoam kullanımı sonucu merkez zemin prizmasının aşağı yöndeki hareketi artmıştır. Merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması

arasında düşey düzlemlerde meydana gelen kayma gerilmeleri yenilmediği sürece daha efektif bir kemerlenme mekanizması oluşur (Terzaghi, 1936; Tafreshi vd., 2019; Kang vd., 2019). Fakat EPS Geofoamun gerilme şekil değiştirme eğrisi dikkate alındığında farklı bölgeleri temsil eden E değerleri arasındaki ani değişimler EPS Geofoamda aşırı deformasyonlara neden olur. Şekil 2.21’de gösterildiği gibi EPS Geofoam’daki elastisite modullerinde 7 kata varan ani azalma merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki kayma düzlemlerinin yenilmesine ve yüzeysel oturmaların ani olarak artmasına sebep olur (Söylemez, 2017). Bu durum EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde de gözlemlenmiştir. Şekil 6.28’de görüldüğü gibi boru tepesinde EPS15 kullanılarak yapılan deneyde 3. yükleme kademesinden 4. yükleme kademesine geçişte; EPS25 kullanılarak yapılan deneyde ise 4. yükleme kademesinden 5. yükleme kademesine geçişte EPS Geofoam’un düşey yer değiştirmesindeki ani artış yüzeysel oturmaları ciddi miktarlarda artırmıştır. Yüzeysel oturmalarındaki bu artış gerilmelerin artışına paralellik göstermiştir (Şekil 6.28). E1-15 ve E1-25 deneylerinden elde edilen yüzeysel oturmalar karşılaştırıldığında sıkışabilirliği daha yüksek ve daha düşük rijitlikteki E1-15’ten ölçülen yüzeysel oturmalar E1-25’ten ölçülen yüzeysel oturmalarından daha büyüktür. Özellikle daha yüksek rijitliğe sahip olan EPS25 daha yüksek gerilme seviyelerinde daha iyi performans sergilemiştir.

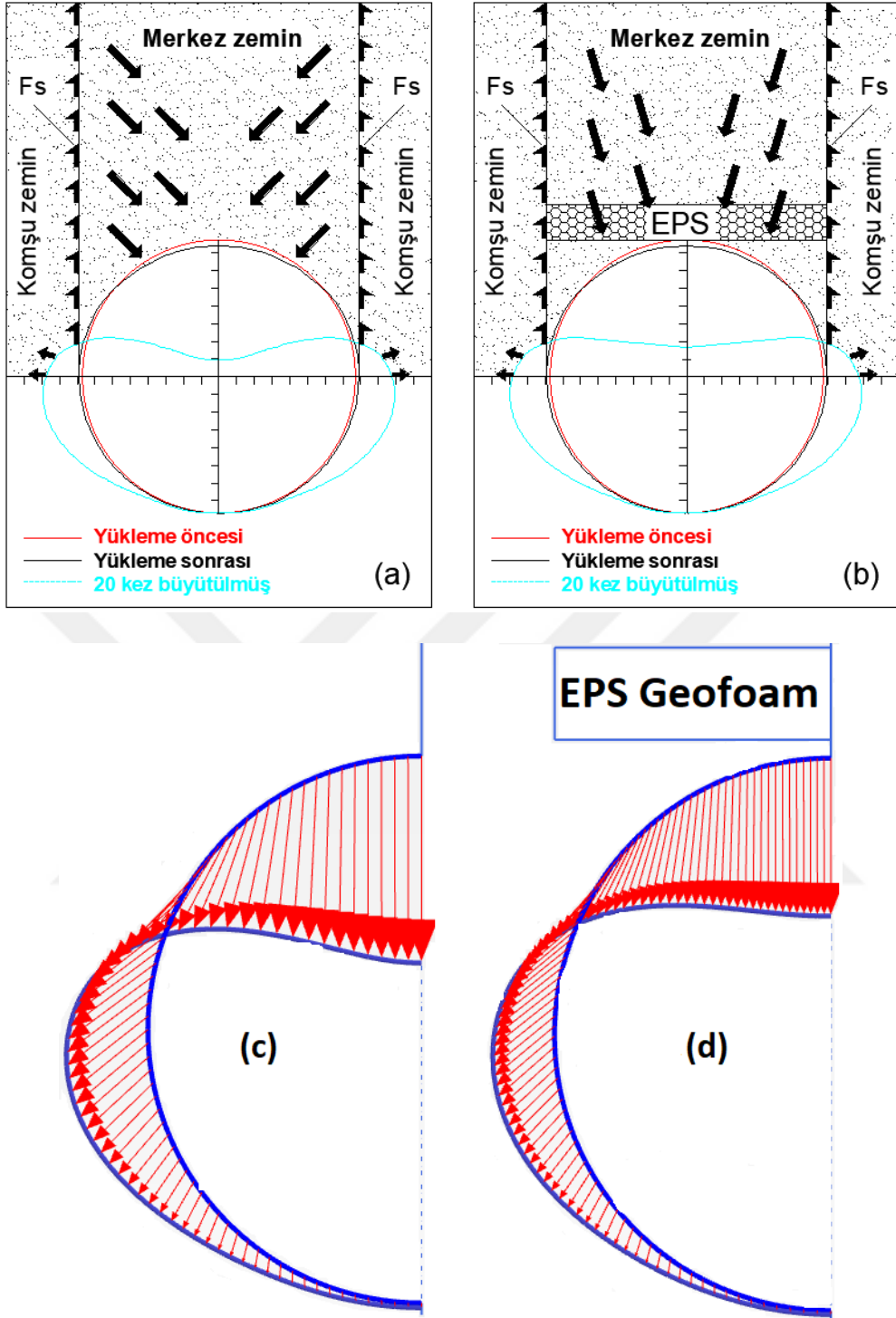
Elastik sınırı aşan ve yüzeyden şerit olarak uygulanan 320 kPa düşey sürşarj etkisinde E1-15 deneyi 4,5 cm ve E1-25 için 4 cm toplam yüzeysel oturma değerleri bir yol üst yapısı için kabul edilebilir değerlerin dışında olmasına rağmen elastik davranış sergilediği gerilme seviyelerinde iyi performans sergilemiştir. Bu durum özellikle Söylemez (2017) tarafından farklı yoğunluklara sahip EPS Geofoam kullanılarak gerçekleştirilen tam ölçekli laboratuvar deneylerinde de ifade edilmiştir.



Şekil 6. 28 Borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler ve analizleri için yüzeysel oturmaların değişimi

6.2.2 Düşey Gerilmeler

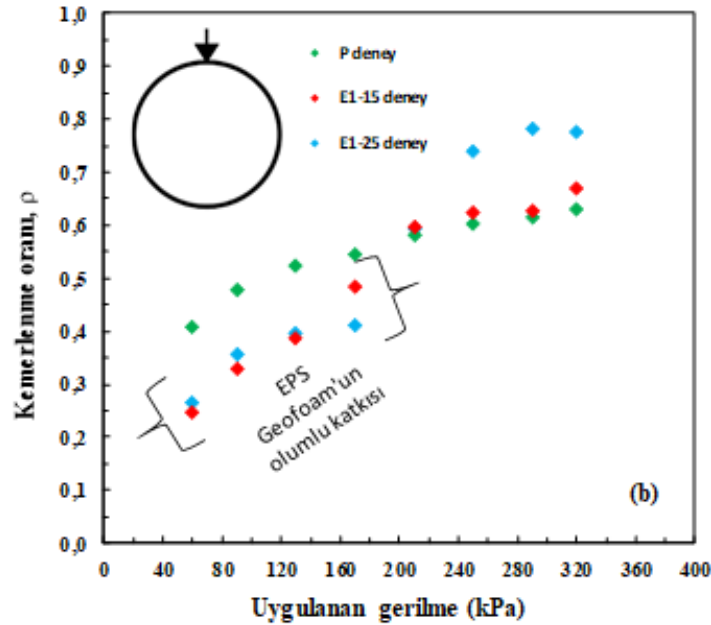
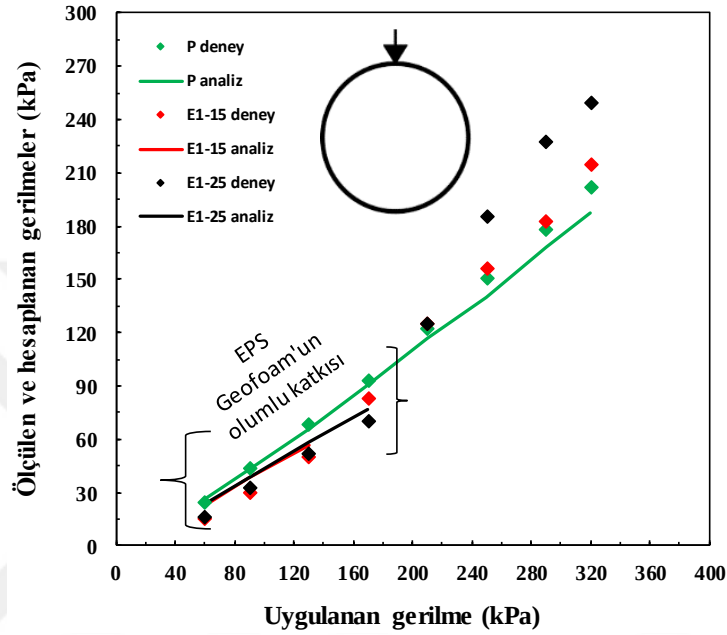
Borulu deney (P) için boru taç bölgesine etkileyen düşey gerilmeler ($\sigma_{taç}$) L3 ve L4'ten elde edilirken EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde (E1) ise detayları Bölüm 3.3.3'te verilen S1 ve S2'den elde edilmiştir. Boru tepesinde EPS Geofoam kullanımı merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki etkileşimi daha da güçlendirir. EPS Geofoamun varlığı ve düşey deformasyonunun bir sonucu olarak merkez zemin prizmasındaki gerilmeler borulu deneye oranla daha homojen bir dağılım gösterir (Şekil 6.29a ve Şekil 6.29b). Bu durum merkez zemin prizmasındaki göreceli deformasyonlarının daha homojen dağılımını sağlar (Şekil 6.29c ve Şekil 6.29d). Nihai durumda danelerin taç bölgesine yönelimi kısmen azalır ve düşey düzlemlerdeki etkileşim artar. Başka bir ifadeyle merkez zemin prizmasındaki düşey gerilmelerin yatay etkisi olan K değeri borulu deneyden elde edilen değerden daha büyük olur. Sayısal değerlerle ifade edecek olursak EPS Geofoamun elastik davranış sergilediği gerilme seviyeleri için merkez zemin prizmasındaki K değeri borulu deney için 0,4 mertebelerinde iken; EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde 0,5 mertebelerindedir.



Şekil 6. 29 P ve E1 için gerilme ve deformasyonların karşılaştırılması a) P için gerilmelerin şematik gösterimi b) E1 için gerilmelerin şematik gösterimi c) P için boru deformasyon formu d) E1 için boru deformasyon formu

Düşey düzlemlerdeki kayma gerilmeleri yenilmediği sürece komşu zemin prizmasına aktarılan gerilmeler boru taç ve tabanına etkiyen gerilmeleri azaltır. Fakat EPS Geofoamun aşırı deformasyonu düşey düzlemlerdeki kayma

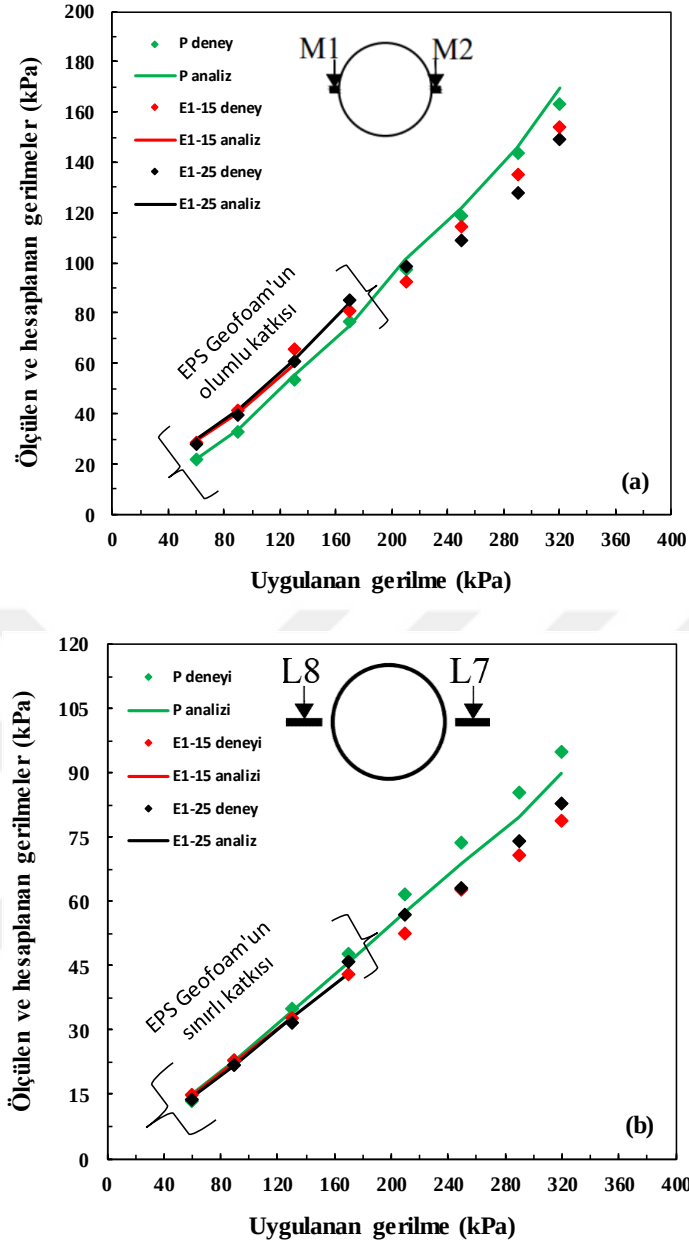
gerilmelerinin yenilmesine ve yük transferinin durmasına neden olur. Bu durum boru ta ve tabanına etkiyen gerilmeleri artırır (Sylermez, 2017). Şekil 5.30a'da borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerden ölçülen gerilmeler ile EPS Geofoamun elastik davrandığı gerilme seviyeleri için analizlerden hesaplanan gerilmeler bu durumu açık bir şekilde desteklemektedir. Şekil 6.30b'de deneysel ölçümler için gerilmelerdeki bu değişim kemerlenme oranı ile açıklanmıştır.



Şekil 6. 30 P ve E1 deneyleri için gerilmelerin değişimi a) boru tacındaki gerilmelerin değişimi b) kemerlenme oranı

Şekilde görüldüğü üzere EPS'nin elastik davranış sergilediği gerilme aralığı için E1-15 ve E1-25 deneylerinden elde edilen gerilmeler birbirine yakın ve borulu deneylerden daha küçük olmasına rağmen kemerlenmenin ortadan kalkması ile boru tepesinde ölçülen gerilmeler farklılık göstermektedir. Özellikle EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde düşey düzlemlerdeki kayma gerilmelerinin yenilmesi ile taç bölgesine etkiyen gerilmelerde ani artışlar, borulu deneylerdeki gerilmelerden daha büyük olmaktadır. EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler ve borulu deneyden elde edilen verileri sayısal değerlerle ifade edecek olursak EPS Geofoamun elastik davrandığı gerilme seviyelerinde EPS Geofoam kullanımı gerilmelerde %40'a varan azalmalar meydana getirirken, kemerlenmenin ortadan kalkması boruya etkiyen gerilmeleri yaklaşık %30 arttırmaktadır. Taç bölgesindeki gerilmelerde meydana gelen değişimin benzeri boru tabanında gerçekleşmiştir. Fakat boru tabanında ölçülen ve ya hesaplanan gerilmeler düşük olduğu için meydana gelen değişimler ihmal edilebilir düzeydedir. Bundan dolayı boru tabanındaki gerilmelerin değişimi detaylandırılmamıştır.

EPS Geofoamun elastik sınırlar içerisindeki gerilme seviyelerinde kullanımı, boru esnemesine bağlı olarak meydana gelen kemerlenme etkisini olumlu yönde etkileyerek komşu prizması tarafından taşınan gerilmeleri artırır (Şekil 6.28). Dolayısıyla boru yatay simetri eksenindeki düşey gerilmelerde artışlar meydana gelir. Fakat kemerlenmenin ortadan kalkması, gerilmelerin transferini engeller ve belirtilen ölçüm noktalarındaki düşey gerilmeler azalır EPS Geofoamun kemerlenmeye olumlu katkı sağladığı gerilme seviyelerinde SP-1'deki düşey gerilmelerde yaklaşık %30 ve SP-2'deki düşey gerilmelerde %12 artış gözlemlenirken, kemerlenmenin ortadan kalkması SP-1'deki düşey gerilmelerde %11 ve SP-2'deki düşey gerilmelerde % 17 azalmaya neden olur (Şekil 6.31).

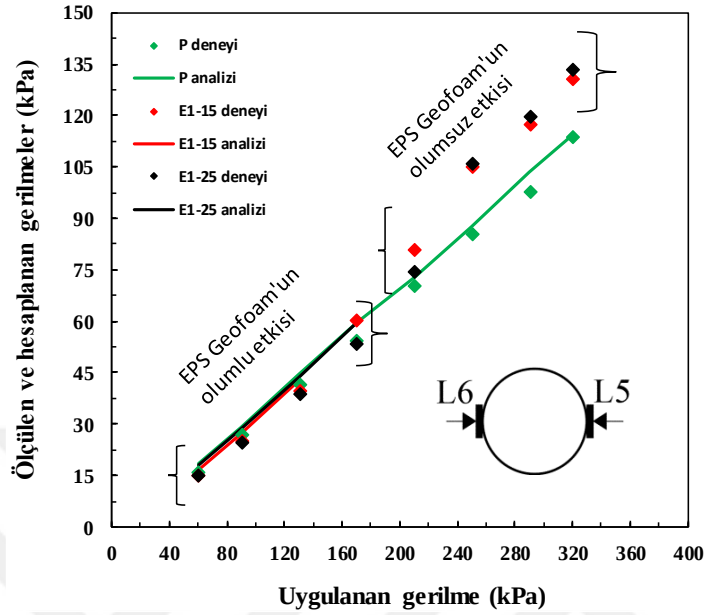


Şekil 6. 31 Komşu zemin prizmasındaki düşey gerilmeler a) SP-1 b) SP-2

6.2.3 Yatay Gerilmeler

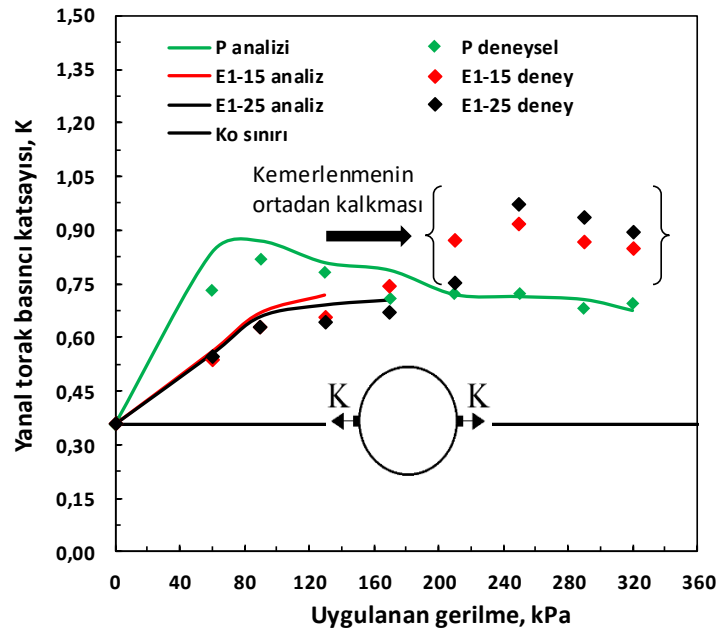
EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerde (E1) ile borulu deneyde (P) boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmeler L5 ve L6'dan belirlenmiştir. Bölüm 6.1'de ifade edildiği gibi boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmeler ile boru yatay çap değişimleri paralellik gösterir. Fakat az miktarda meydana gelen boru yatay çap değişimi, yatay gerilmelerin oluşması için yeterli olmaktadır. Dolayısıyla EPS Geofoamun kemerlenmeye olumlu katkısı, boruya etkiyen gerilmeleri ve boru deformasyonları azaltmasına rağmen SP-1'deki yatay gerilmeler üzerinde önemli bir değişim meydana getirmemiştir (Şekil 6.32). Şekil 6.30b'de belirtildiği gibi

kemerlenme oranının kademeli olarak 1'e yaklaşması ile boruya etkiyen gerilmeler ve buna bağlı olarak boru deformasyonları artmaktadır. Nihai durumda boru yatay çap değişimindeki artış, SP-1'deki yatay gerilmeleri yaklaşık %25 artırmıştır.



Şekil 6. 32 SP-1 için yatay gerilmelerin değişimi

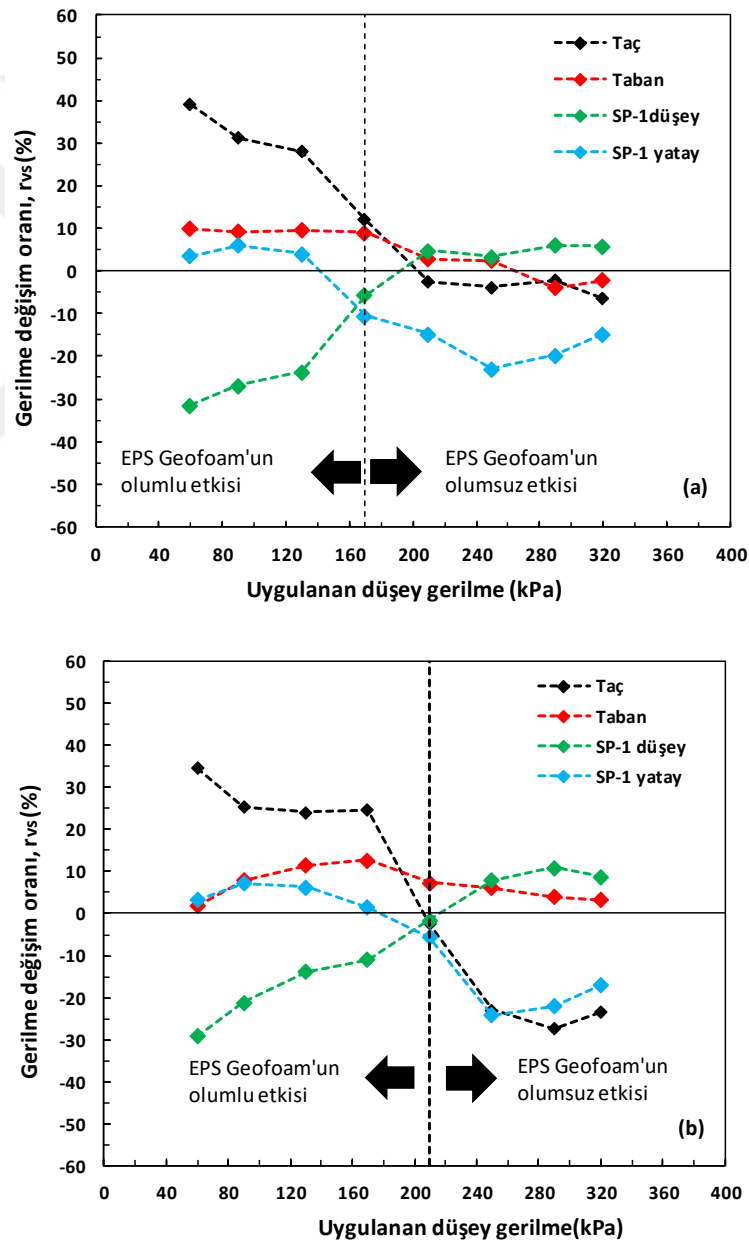
EPS Geofoam'un gömülü boru sistemine olan olumlu etkisi sonucunda komşu zemin prizması tarafından taşınan gerilmelerin artışı, boru yatay simetri eksenindeki düşey gerilmeleri %30 artırırken yatay gerilmelerdeki artış ihmal edilebilir seviyede olduğu için σ_h/σ_v oranı (K) P deneyine göre azalır (Şekil 6.33).



Şekil 6. 33 P ve E1 deneylerinde deney ve analizler için K'nin değişimi

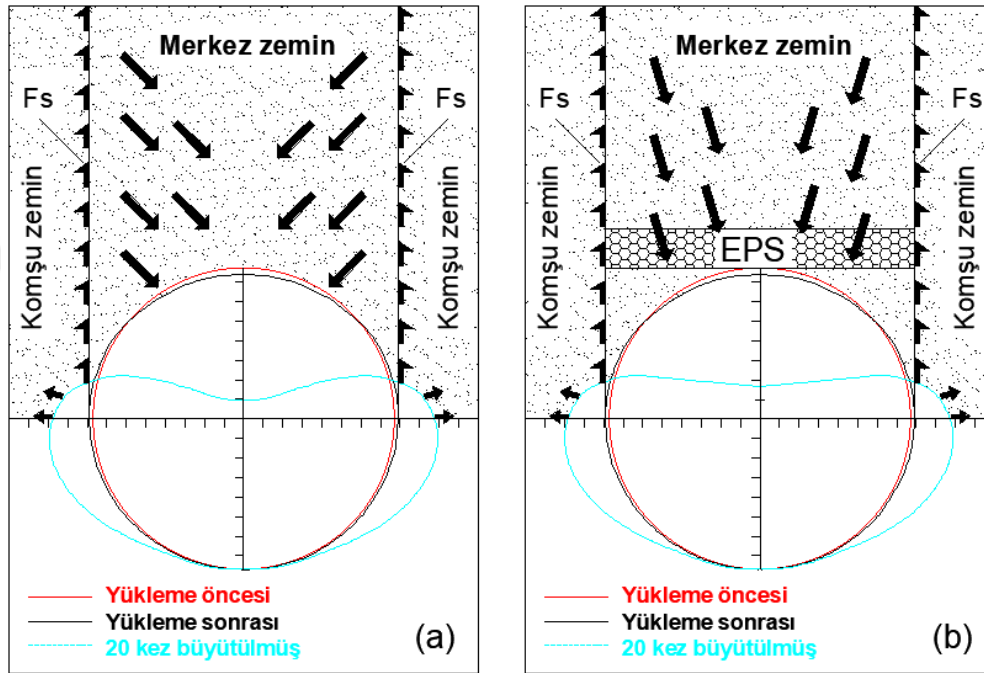
Fakat kemerlenmenin ortadan kalkması ile komşu zemin prizmasına aktarılan gerilmelerdeki azalmadan dolayı boru yatay simetri eksenindeki düşey gerilmelerdeki %11 düşüş ve yatay gerilmelerdeki %25 artış K'nin ani olarak artmasına neden olur.

Borulu deney ve analizi için boru çevresinden farklı notalardan elde edilen gerilmeler ile EPS Geofoam'un elastik davranış sergilediği gerilme seviyeleri için E1 analiz ve deney sonuçları uyum içerisindedir. Tam ölçekli deneyler için borulu deney referans alınarak borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler için Eşitlik 5.8'den elde edilen gerilmelerin değişimi Şekil 6.34'te sunulmuştur.



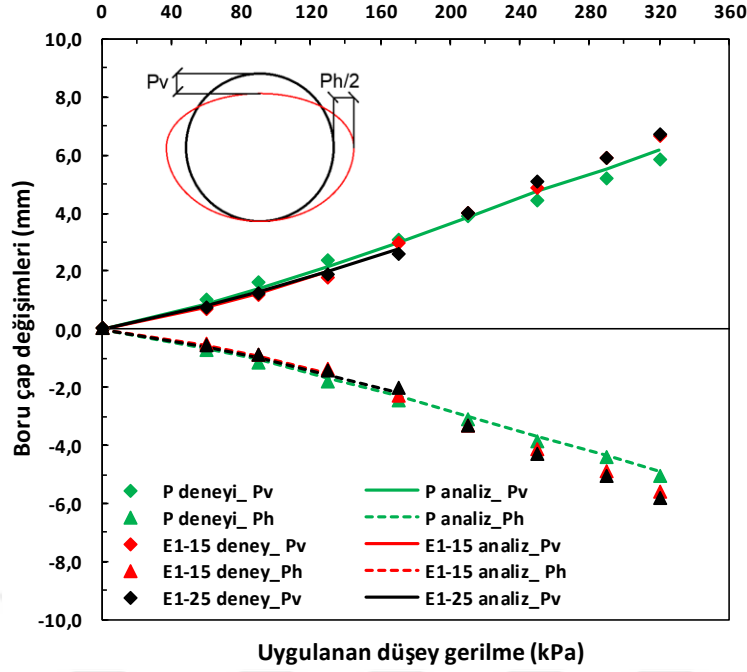
Şekil 6. 34 P ve E1 deneyleri için gerilme değişim oranı a) EPS1-15 b) EPS1-25

Zemin üst kotunda yol kaplaması olmadan şerit yüklemelere maruz kalan HDPE boruda meydana gelen gerilmeler ve boru düşey deformasyon formu Şekil 6.35'te detaylandırılmıştır. E1 deneylerinde EPS Geofoamun elastik sınırlar içerisinde kullanımı gerilmelerin ve boru düşey deformasyonlarının borulu deneye (P) göre daha uniform dağılım göstermesini sağlamaktadır.



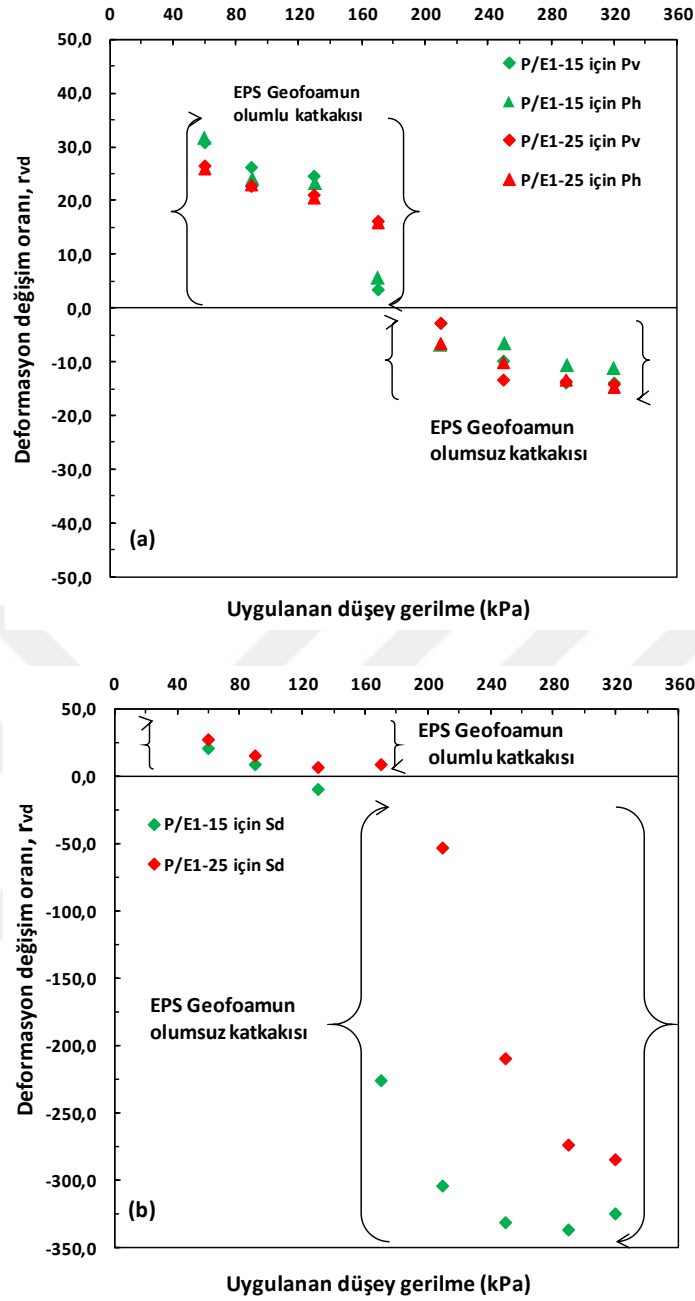
Şekil 6. 35 Merkez zemin prizmasındaki gerilmelerin ve boru deformasyonlarının değişimi a) P deneyi b) E1 deneyi

Borulu deneyde Ko'dan Ka'ya yönelim gösteren merkez zemin prizmasındaki değişim Bölüm 6.1'de detaylandırılmıştır. Boru taç bölgesinde EPS Geofoamun kemerlenmeye olumlu katkı sağladığı gerilme seviyelerinde kullanımı sonucu merkez zemin prizmasındaki gerilmelerin dağılımında meydana gelen değişim, danelerin Ko koşuluna yakın bir davranış sergilemesini sağlar. E1 deneyleri için Terzaghi Kemerlenme Teorisi'ndeki K değerinin artması, düşey düzlemlerde meydana gelen kayma gerilmelerini artırarak boruya etkiyen gerilmeleri ve boru çap değişimlerini azaltmaktadır. Nihai durumunda EPS Geofoamun olumlu katkısı boru çap değişimlerini azaltırken, düşey düzlemlerdeki kayma gerilmelerinin yenilmesi boru deformasyonlarını artırmaktadır (Şekil 6. 36).



Şekil 6.36 Borulu ve EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler ve analizleri için boru çap değişimleri

Şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü borularda, taç bölgesinde EPS Geofoam kullanımı sonucu yüzeysel oturmalar ve boru deformasyonlarında meydana gelen değişim için 2 farklı durum söz konusudur. EPS'nin elastik davranış sergilediği ve kemerlenmeye olumlu katkı sağladığı gerilme seviyelerinde merkez zemin prizmasındaki ve boruya etkiyen gerilmelerin azalması, boru deformasyonlarını %32; yüzeysel oturmalarda %20 oranında azaltmaktadır. Fakat artan gerilme kademelerinde EPS'nin elastik davranış sergilediği gerilme sınırının ve kayma gerilmelerinin yenilmesi taç bölgesine etkiyen gerilmeleri (Şekil 6.29) ve boru çap değişimlerini artırır. Özellikle EPS'nin aşırı düşey deformasyonu toplam yüzeysel oturmalarda %340'e varan büyük artışlara neden olmuştur. Şekil 6.37'de borulu deneyden elde edilen ölçümler referans alınarak deformasyon değişim oranları (r_{vd}) hesaplanmıştır.



Şekil 6. 37 Deformasyon değişim oranları a) Pv ve Ph için dr b) S_d için dr

6.2.5 Parametrik Çalışmalar

EPS Geofoam kullanımı olmadan şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü HDPE bir borunun esneme davranışına ve kemrlenme mekanizmasını etkileyen parametreler Bölüm 5.1.6'da açıklanmıştır. Benzer şekilde EPS Geofoamun taç bölgesinde kullanımı sonucu gerilmelerin dağılımında, yüzey sel oturmalarda, boru esnemelerinde ve kemerlenme mekanizmasında meydana gelen değişimler yukarıda ifade edilmiştir. Sunulan bilgilerin Bölüm 5.1.6'nın tekrarı olmaması için analizlerden elde edilen sonuçlar genellikle metin içerisinde ifade

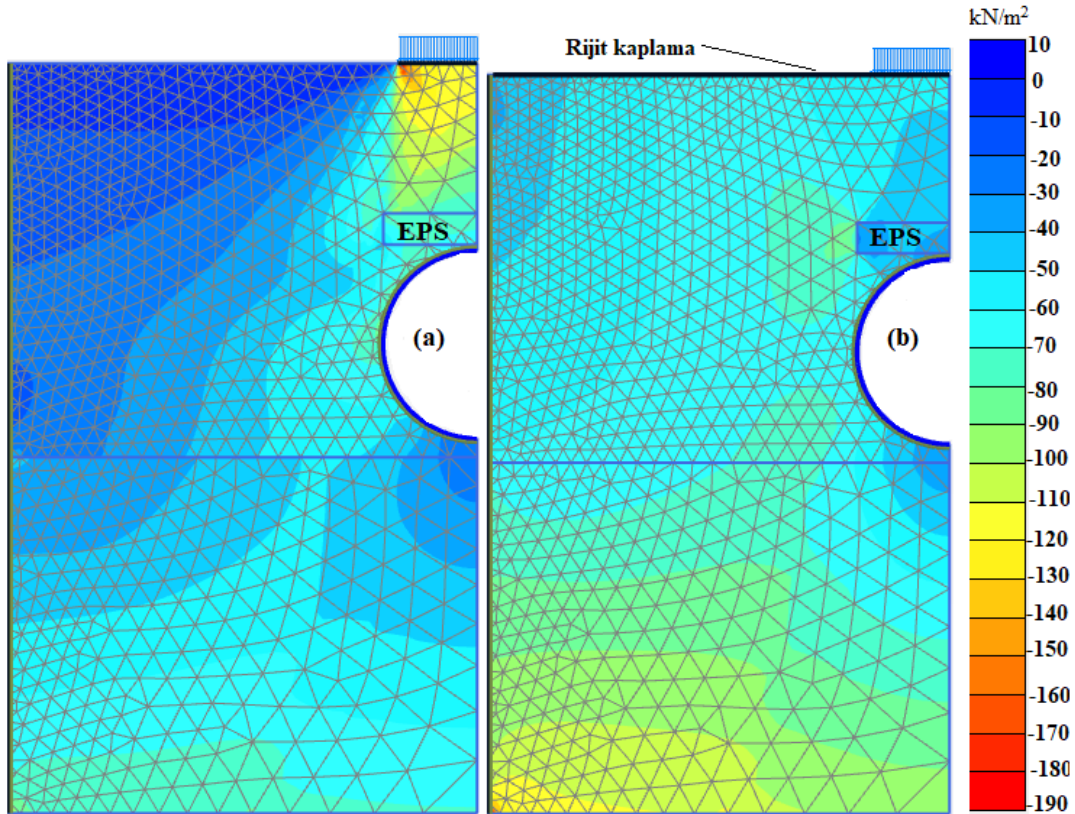
edilip sadece önemli durumlar detaylandırılacaktır. Özellikle bu bölümde deyatlandırılmak istenen durum, EPS Geofoamun aşırı deforasyonu sonucu gömülü boru sisteminde meydana gelen aşırı yüzeysel oturmaların, boru deformasyonlarının ve gerilmelerin oluşmasını engellemek için alternatif çözümleri değerlendirmektir. EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneylerin (E1) modellenmesi aşamasında EPS Geofoamun gerilme şekil değiştirme ilişkisinin analizlere yansıtılamaması nedeniyle analizlerden sadece EPS Geofoamun linear elastik davranış sergilediği EPS15 için ilk üç ve EPS25 için ilk dört yükleme kademesi dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

6.2.5.1 Yol Üst Kaplamasının Etkisi

Sığ gömülü boru sistemlerinde, boru davranışını domine eden gerilmelerin, trafik yüklerinden kaynaklanan gerilmeler olduğu önceki bölümlerde ifade edilmiştir. Yol üst kesitinde rijit bir kaplamanın yer alması, aynı yükün daha geniş alana etkimesini sağlar. Bu durum yüzeyden uygulanan gerilmeleri büyük ölçüde azaltır ve bu gerilmelerin daha uniform dağılım göstermesini sağlar

Borulu deney için yapılan analizlerde rijit ve ağırlıksız bir kaplamanın varlığı kaplama olmama durumuna göre boruya etkileyen gerilmelerde ve boru deformasyonlarında %80'e varan azalmalara neden olduğu Bölüm 6.1.6.1'de detaylandırılmıştır. Benzer şekilde EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler (E1) için yapılan analizlerde EPS Geofoamun elastik davranış sergilediği gerilme seviyelerinde gerilmelerde %75 ve boru deformasyonlarında %82'ye varan azalmalar elde edilmiştir. Burada üzerinde durulması gereken husus, rijit kaplamanın varlığı yüzeyden uygulanan gerilmelerin etkisini büyük ölçüde azalttığı için boru tepesinde yer alan EPS Geofoama etkileyen gerilmeler de bu duruma paralel olarak azalır. Bu durum özellikle EPS Geofoamun yüzeyden uygulanan gerilmeler etkisinde daha geniş bir aralıkta linear elastik davranış göstermesini sağlar. E1-15 deney sonuçları, EPS Geofoam kemerlenmeye ve sistemin davranışına olumlu etkisinin ilk üç yükleme kademesi sonunda (130 kPa) olduğunu ve bu gerilme seviyesinin aşılması halinde EPS Geofoamdaki aşırı deformasyonları, yüzeysel oturmalarda büyük artışlara neden olmaktadır. Şekil 5.38a'da tam ölçekli E1 deneylerini temsil eden kaplamasız durum için şerit olarak uygulanan 130 kPa düşey gerilme altında EPS Geofoamun hemen üstündeki gerilmelerin yaklaşık 60 kPa olduğu görülmektedir. Bu gerilme değeri Şekil 2.21'deki EPS15'in gerilme

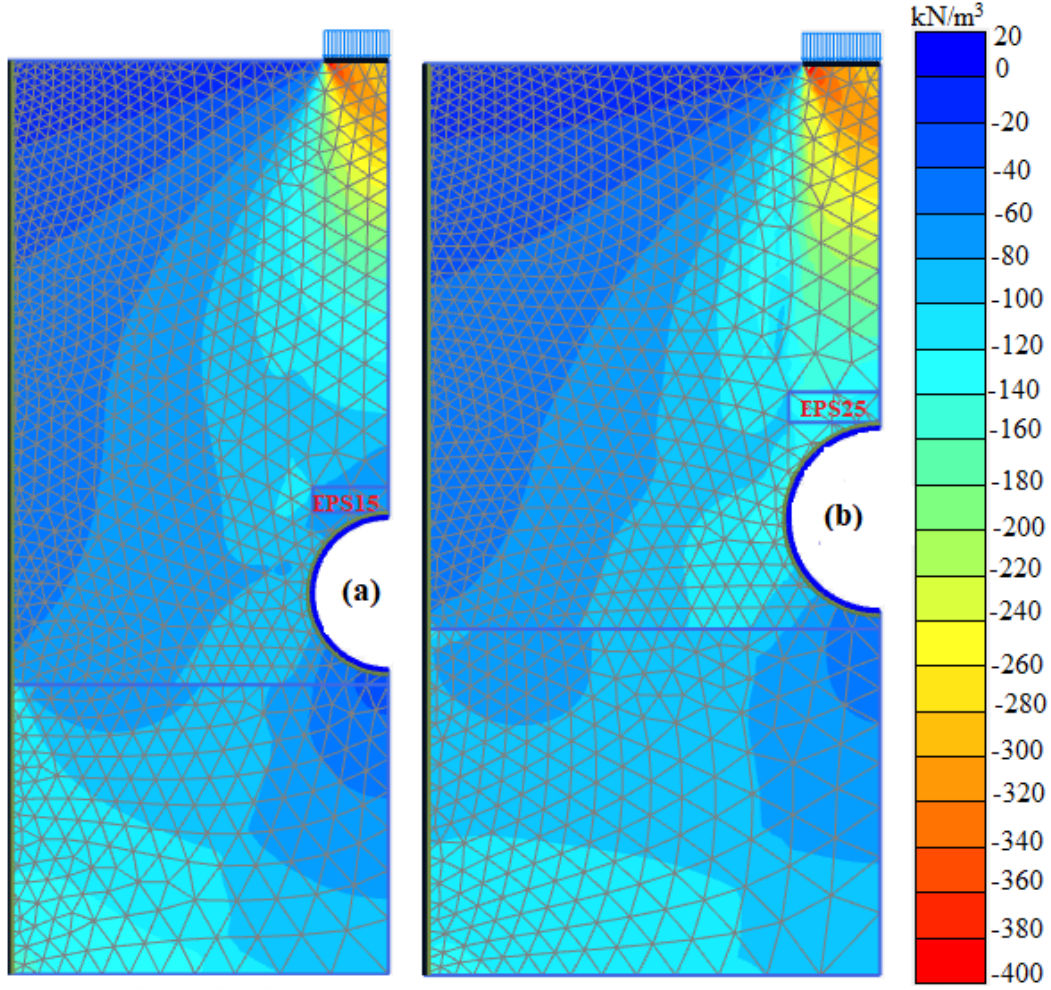
şekil değiştirme ilişkisindeki elastik sınır ile oldukça uyumludur. Şekil 5.38b’de zemin üst kotuna rijit bir plakanın tanımlanması ile gerçekleştirilen analizlere ait gerilme dağılımı sunulmuştur. Yüzeyden uygulanan 320 kPa gerilme altında EPS Geofoamun üst kotundaki gerilmeler yaklaşık olarak 40 kPa’dır ve bu değer EPS15’in linear elastik davranış sergilediği aralıkta kalmaktadır. Hatta EPS15, rijit kaplama olması durumunda yüzeyden şerit olarak uygulanan yaklaşık 450 kPa düşey gerilme etkisinde bile linear elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Nihai durumda rijit bir kaplamanın varlığı, EPS15’in elastik sınırlar içerisinde davranış göstermesini sağlar ve EPS Geofoamun aşırı deformasyonu sonucu sistemde meydana gelen olumsuzlukları ortadan kaldırmaktadır. Benzer bir durum EPS25 kullanılarak yapılan analizlerde de gözlemlenmiştir. Hatta EPS25’in elastik sınırı yaklaşık olarak 100 kPa’ olduğu için (Şekil 2.21) rijit kaplamanın varlığında yüzeyden şerit olarak uygulanan yaklaşık 700 kPa düşey gerilmeye kadar linear elastik davranışın devam ettiği görülmektedir.



Şekil 6. 38 EPS Geofoam ile desteklenen borulu deneyler için rijit kaplamanın düşey gerilme dağılımına olan etkisi a) kaplamasız b) kaplamalı

6.2.5.2 Örtü Yüğü kalınlığının Etkisi

EPS Geofoamun gömülü boru sistemine olan katkısı, EPS Geofoamun üst kotuna etkiyen gerilmelerin büyüklüğüne ve gerilme şekil değıştirme ilişkisine bağı olarak değışkenlik göstermektedir. Zemin üst kotuna şerit olarak etkiyen gerilmelerin derinlikle azalmasına paralel olarak EPS Geofoama etkiyen gerilmelerin azalması, bu malzemenin daha geniş bir aralıkta linear elastik davranış göstermesini sağlamaktadır. Borulu deneyde olduğu gibi 0,5D ile 3D aralığında değışen örtü yüğü kalınlıkları dikkate alınarak yapılan analizler için 1D gömülme derinliği referans alınarak gerilme değışim oranları (r_{vs}) ve deformasyon değışim oranları (r_{vd}) değeri hesaplanmıştır. 0,5D ve 0,75D örtü yüğü kalınlıkları için EPS Geofoamun tepe noktasına etkiyen gerilmelerin artması, EPS15'in ilk iki yükleme kademesinde (90 kPa); EPS25'in ise ilk üç yükleme kademesinde yani daha dar bir aralıkta linear elastik davranış sergilemesine neden olmuştur. Fakat gömülme derinliğinin 1D'den 3D'ye kademeli olarak artışı, EPS Geofoama etkiyen gerilmelerin azalmasına ve daha geniş bir aralıkta linear elastik davranış göstermesini sağlamaktadır. EPS 15 ve EPS 25'in gerilme şekil değıştirme ilişkisini gösteren Şekil 2.20 incelendiğinde EPS 15'in lineer elastik davranış sergilediği maksimum gerilme değeri yaklaşık 62 kPa olurken; EPS25 için bu değeri yaklaşık 110 kPa'dır. Bu gerilme değeri referans alındığında Şekil 6.39a'da yüzeyden şerit olarak uygulanan 320 kPa düşey gerilme altında EPS15 3D gömülme derinliğinde linear elastik davranış sergilerken; Şekil 6.39b'de EPS25 yaklaşık 2D gömülme derinliğinde linear elastik davranış sergilemektedir. Bu gömülme derinlikleri zemin üst kotunda herhangi bir kaplama olmaması durumu için elde edilmiştir. Özellikle E1-15 için 3D gömülme derinliği sığ gömülü borular için önerilen ve ya literatürde sıklıkla kabul gören bir örtü yüğü kalınlığını temsil etmemektedir. E1-25 için 2D örtü yüğü kalınlığı sığ gömülü boru sistemleri için tercih edilen örtü yüğü kalınlığının neredeyse üst limitini ifade etmektedir. Gerçek saha uygulamalarında yol üst yapısında yer alan rijitliği düşük de olsa bir kaplamanın varlığı (esnek kaplama) gerilmelerin etkisini azaltarak EPS15 ve EPS25'in daha küçük örtü yüğü kalınlıklarında kullanımını sağlayacaktır.



Şekil 6. 39 Gömülme derinliğine bağlı olarak düşey gerilmelerin dağılımı a) 3D için E1-15 b) 2D için E1-25

6.2.5.3 Boru ve Dolgu Rijitliğinin Etkisi

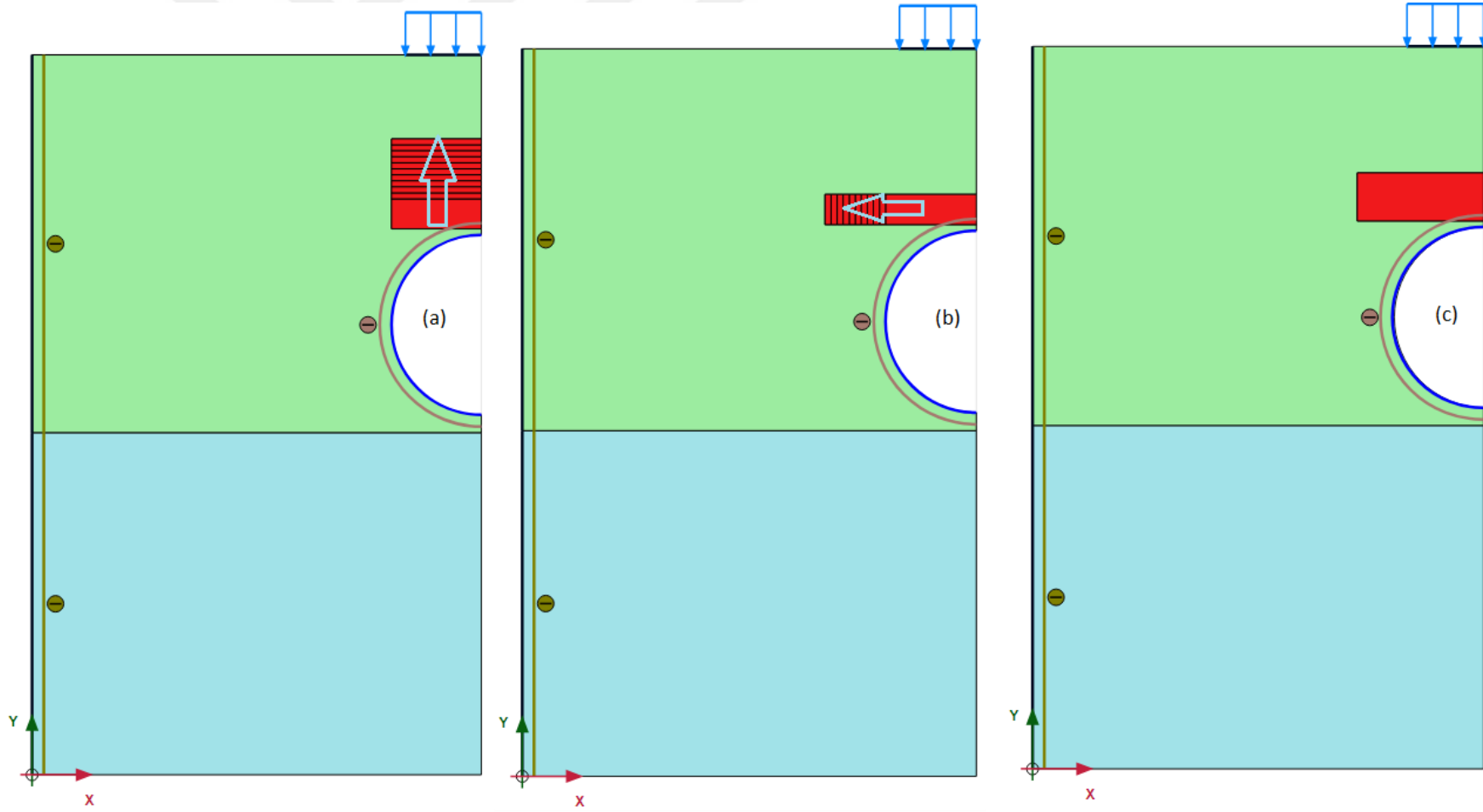
Gömülü boru sistemine etkiyen yükler boru ve dolgunun göreceli rijitlikleri ölçüsünde taşındığı için boru rijitliğinin artışı boruya etkiyen gerilmeleri artırırken, dolgu rijitliğinin artışı boruya etkiyen gerilmeleri azaltmaktadır. Bu iki farklı durum için boru tepesinde yer alan EPS Geofoama etkiyen gerilmeler de farklılık gösterir. Ep değerinin 450 MPa'dan 2800 MPa'ya kademeli artışı, merkez zemin prizmasına etkiyen gerilmelerde artışlara neden olur. Taç bölgesindeki EPS Geofoamun varlığı ve fs değerine olan olumlu katkısı, taç bölgesine etkiyen gerilmelerdeki artış hızını azaltsa da nihai EPS15 ve EPS25'in elastik davrandığı gerilme seviyelerinde boruya etkiyen gerilmelerde %12'ye varan artış meydana gelmiştir. Ep artışı boru esneme davranışını önemli miktarda azalttığı için meydana gelen bu kısıtlı artış, boru deformasyonlarında önemli bir değişim meydana getirmiştir. Özetle Ep artışı,

EPS Geofoamun elastik davranış sergilediği gerilme aralığını değiştirmemiştir. Elastik sınırı aşan gerilme seviyelerinde gömülü boru sistemlerinde kemerlenmenin ortadan kalkması ile yukarıda ifade edilen olumsuzluklar meydana gelmiştir.

Dolgu rijitliğinin 28 MPa'dan 115 MPa'ya kademeli artışı ve zeminden boruya sağlanan zemin desteğini ve kemerlenme etkisini artırdığı için merkez zemin prizmasına etkiyen gerilmeler EPS Geofoamun elastik davrandığı gerilme aralığı için EPS15 ve EPS25 için %30 azaltmıştır. Özellikle gerilmelerdeki bu azalma EPS Geofoamun elastik davrandığı gerilme seviyelerini EI-15 için 3'ten 4'e (130 kPa'dan 170 kPa'ya); EI-25 için ise 4'ten 5'e (170'ten 210 kPa'ya) kPa yükseltmiştir.

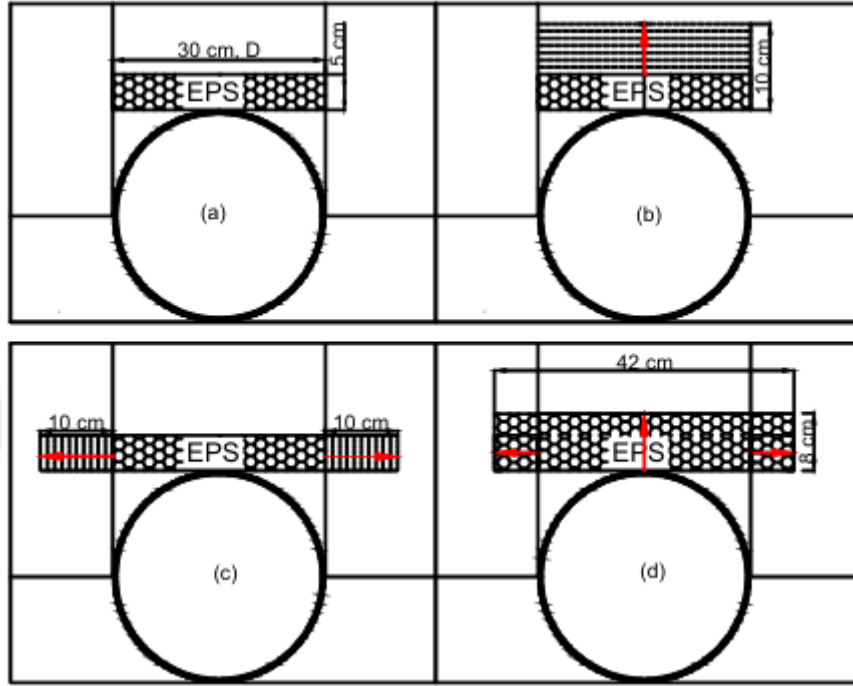
6.2.5.4 En İdeal EPS Geofoam Boyutları

Gerilmelerin dağılımı, boru çapı ve gömülme derinliği dikkate alındığında EPS Geofoamun linear elastik davranış sergilediği gerilme seviyelerinde en efektif kemerlenme etkisi oluşturan EPS Geofoamun boyutlarını belirlemek için analizler tekrar edilmiştir. Şekil 6.40a'da tam ölçekli deney koşullarında genişliği 1D ve yüksekliği D/6 olan EPS Geofoamun kalınlığı 1'er cm artırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde EPS Geofoam, kemerlenme etkisi az da olsa artırmasına rağmen en belirgin ve olumsuz değişimi toplam yüzeysel oturmalarda meydana getirmiştir. Şekil 6.40b'de tam ölçekli deney koşulları için EPS Geofoamun genişliği 1'er cm artırılarak analizler tekrar edilmiştir. Analiz sonuçları belirli bir genişlikten sonra EPS Geofoama düşey uygulanan gerilmelerin artışı boruya etkiyen gerilmelerde kısıtlı da olsa artışlara neden olduğunu göstermektedir. Bu durum farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır (Kim ve Withoeft, 2015; Akınay, 2017; Al Naddaf vd., 2019; Kang vd., 2019; Kefçi, 2020). Nihai durumda farklı genişlik ve kalınlıkta yapılan analizler sonucunda en efektif kemerlenme etkisi için yüksekliği 4D/15 (8 cm) ve genişliği 1,4D (42 cm) olan boyutlar belirlenmiştir (Şekil 6.40c). Bu kesitler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda boruya etkiyen gerilmeler yaklaşık %5, boru deformasyonları %7 azalırken, EPS Geofoamun yüksekliğinin ve buna bağlı olarak EPS Geofoam'un düşey yer değiştirmesindeki artış toplam yüzeysel oturmayı %15 arttırmıştır. Özellikle bazı araştırmacılar, yüzeysel oturmaları sınırlandırmak için maksimum 5 cm kalınlığında EPS Geofoam kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir (Kim vd., 2010; Kim ve Withoeft, 2015; Meguid vd., 2017).



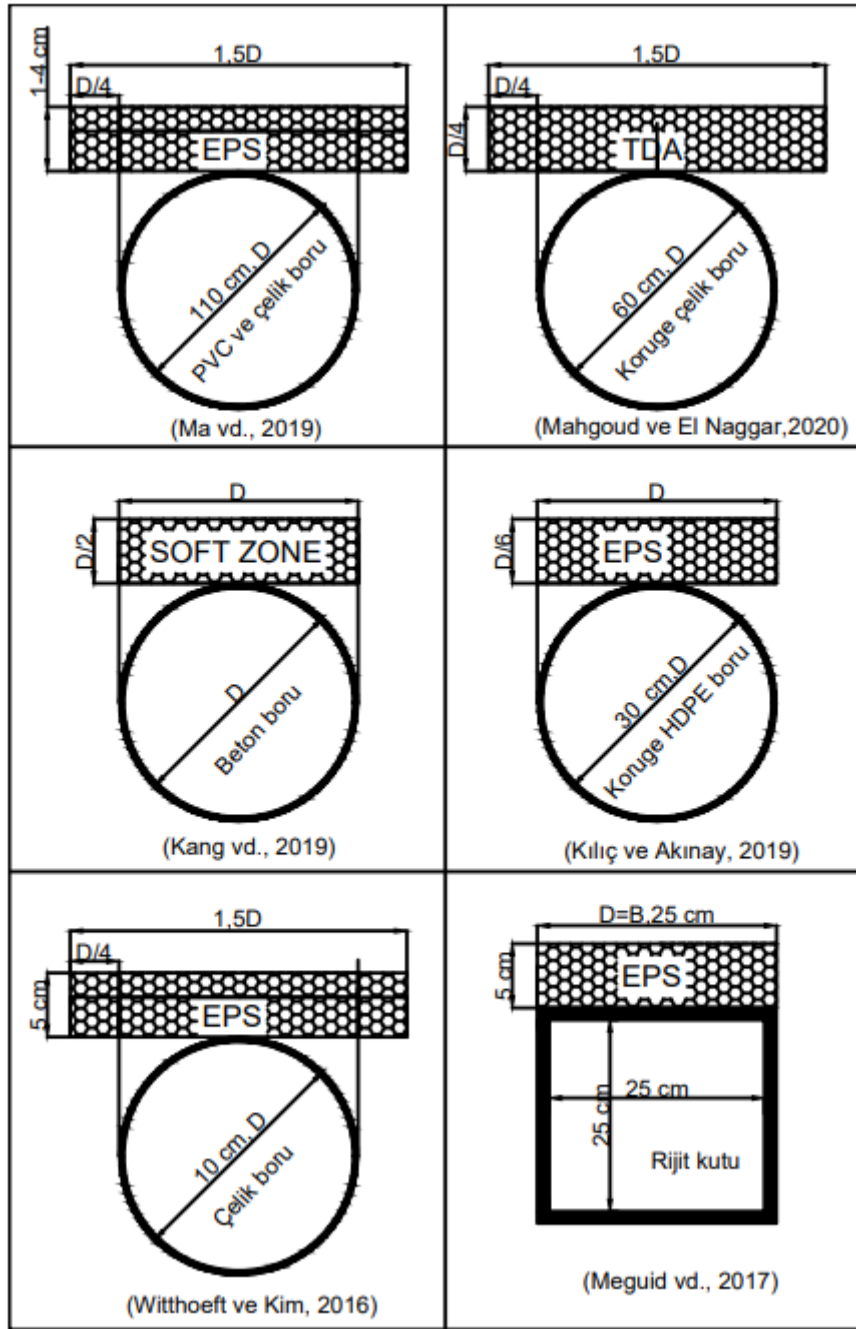
Şekil 6.40 En ideal EPS Geofoam kesitleri için analizler a) EPS kalınlığının etkisi b) EPS genişliğinin etkisi c) ideal kesitler

Özellikle bazı araştırmacılar EPS Geofoamda meydana gelen oturmaları sınırlandırmak için boru tepesinde kullanılan EPS Geofoam için 5 cm kalınlık değerini önermektedir. Analizlerde dikkate alınan kesitler için detaylı çizimleri Şekil 6.41’de sunulmuştur.



Şekil 6. 41 En ideal EPS Geofoam boyutları a) deney koşulları b) yüksekliğin etkisi c) genişliğin etkisi d) en ideal EPS kesiti

Şekil 6.42’de taç bölgesinde EPS Geofoam kullanımını içeren farklı çalışmalarda araştırmacılar tarafından önerilen en ideal kesitler sunulmuştur.



Şekil 6. 42 Literatür çalışmalarında önerilen soft zone boyutları

7.1 Sonuçlar

Zemin gerilmelerine ve şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü esnek borulardaki esneme davranışı kemerlenmeye, gerilmelerin yeniden dağılımına ve yeni yanal toprak basıncı katsayılarının oluşmasına neden olmaktadır. Farklı mühendislik yapılarında incelenen bu durum, sığ gömülü esnek boru sistemleri için henüz tam olarak açıklanabilmiş değildir. Bu tez çalışma kapsamında boru deformasyon davranışının kemerlenme mekanizmasına, gerilmelerin dağılımına ve merkez zemin prizması ile boru yatay simetri eksenindeki yanal toprak basıncı katsayısına etkileri tam ölçekli laboratuvar deneyleri ve iki boyutlu sonlu elemanlar yazılımı Plaxis (2021) ile araştırılmıştır. Kemerlenme etkisini artırmak, boruya etkileyen gerilmeleri ve boru çap değişimlerini azaltmak için boru tepe noktasında EPS Geoföamun kullanılabilirliği test edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Şerit yükleme koşullarına maruz kalan sığ gömülü boru sistemlerinde boru çap değişimleri sistemin davranışını belirleyen en önemli parametredir. Bu çap değişimleri sonucunda boru kesitindeki en kritik bölgeler taç ve yatay simetri eksenidir. Dolayısıyla boru esneme davranışının bu bölgelerdeki boru-zemin etkileşimine, gerilmelerin dağılımına, kemerlenme etkisine ve yanal toprak basıncı katsayısına olan etkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi tasarım aşaması ve sonrası için oldukça önemlidir.
- 2) Kurulumu tamamlanan, şerit yükleme koşullarına maruz kalan ve başlangıçta Ko koşulunda olan sığ gömülü esnek boru sisteminde boru esneme davranışına bağlı olarak meydana gelen kemerlenme etkisi, merkez zemin prizmasında ve yatay simetri eksenidir. Farklı davranışların oluşmasına neden olur. Özellikle analiz sonuçları, bu bölgelerdeki yanal toprak basıncı katsayısının sabit olmadığını göstermiştir. Merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasında düşey düzlemlerde meydana gelen f_s 'nin artışı kemerlenme mekanizmasını artırarak başlangıçta Ko koşulunda olan yanal toprak basıncı katsayısının K_p 'ye; kemerlenme etkisinin azalması ile Ko'dan Ka'ya doğru

yönelmesine neden olmaktadır. Yeni durum için belirlenen K değerinin Terzaghi Kemerlenme Teorisi'ndeki Eşitlik 1.4'te yerine yazılması ile boru taç bölgesine etkiyen gerilmelerin hesaplanabileceği gösterilmiştir. Taç bölgesinde tek plaka halinde boru çapı kadar genişlikte ve 5 cm kalınlığında EPS Geofom kullanımı, kalp şeklinde meydana gelen boru deformasyon formunu azaltarak merkez zemin prizmasındaki danelerin taç bölgesine yönelimini kısıtlamaktadır. Bu durum merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki etkileşimin ve merkez zemin prizmasındaki K'nin artmasını sağlarken, boruya etkiyen gerilmelerin ve borudaki çap değişimlerinin azalmasına neden olur. İfade edilen bu durum EPS Geofomun elastik davranış sergilediği gerilme seviyeleri için geçerlidir.

- 3) Boru esneme davranışı sonucu meydana gelen boru yatay çap değişimi, boru yatay simetri ekseninde yer alan dolgunun tank duvarına doğru hareket etmesine ve sıkışma davranışı göstermesine neden olur. Başlangıçta Ko koşulunda olan yatay simetri eksenindeki dolgu malzemesinde pasif etkiler meydana gelmekte ve yanıl toprak basıncı basıncı katsayısı Ko'dan Kp'ye doğru bir yönelim segilemektedir. Nihai durumda boru yatay simetri ekseninde maksimum değere ulaşan ve 1,5D mesafede etkili olan yatay gerilmeler tasarımda dikkate alınması gereken ana parametrelerden biri haline gelmektedir. Özellikle belirli aralıklarla yan yana inşa edilen gömülü boru sistemleri için bu yatay gerilmelerin ve etki mesafelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve tasarımlarda dikkate alınması önemlidir. Boru tepesinde EPS Geofomun elastik sınırlar içerisindeki gerilme seviyelerinde kullanımı, kemerlenme etkisini olumlu etkiler ve boru yatay deformasyonlarını %30'dan daha fazla azaltmaktadır. Fakat boru yatay çap değişiminin az miktarda değişmesi, boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin oluşması için yeterli olduğundan, EPS Geofom kullanımının bu bölgedeki yatay gerilmelerde kısıtlı bir azalma meydana getirdiği görülmüştür. EPS Geofoma etkiyen düşey gerilmelerin elastik sınırı aşması ve kemerlenme etkisinin ortadan kalkması, boruya etkiyen gerilmeleri ve boru çap değişimlerini artırmaktadır. Boru yatay çap değişimdeki bu artış, boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmeleri artırmaktadır.
- 4) Şerit yüklemeye maruz kalan sığ gömülü boru sistemlerinde yol üst yapısında rijit bir kaplamanın varlığı, gerilmelerin daha geniş bir alanda ve daha uniform

bir dağılım göstermesine neden olmaktadır. Başla bir deyişle rijit bir kaplamanın varlığı, şerit olarak etkiyen trafik yüklerinin olumsuz etkisini büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Bu durum boruya etkiyen gerilmelerde %80, deformasyonlarda %84'e varan azalmalar meydana getirmektedir. Özellikle boru yatay çap değişiminden dolayı boru yatay simetri ekseninde oluşan ve 1,5D mesafeye kadar etkili olan pasif itkiler, rijit bir kaplamanın varlığında D/3'lük bir mesafeden sonra etkilerini büyük ölçüde kaybetmektedir. Bu durum bitişik nizamlı inşa edilecek sığ gömülü boru sistemlerinde boru esneme davranışının diğer borulara etkilerini büyük ölçüde önler. Rijit bir kaplamanın varlığında boru tepesinde EPS Geofoam kullanımı, boruya etkiyen gerilmeleri %75 ve boru deformasyonlarını %80 oranında azaltmaktadır. Özellikle EPS Geofoama etkiyen gerilmelerin azalması, şerit olarak uygulanan 320 kPa düşey gerilme altında EPS15 ve EPS25'in linear elastik davranış sergilemesini sağlamaktadır. Hatta bu linear elastik davranış, uygulanan gerilmelerin EPS15 için 450 kPa ve EPS25 için 700 kPa'ya kadar artmasına neden olur. Bu durum EPS Geofomun aşırı deformasyonu sonucu, sistemde meydana gelen tüm olumsuzlukların ortadan kalkmasını sağlar.

- 5) Şerit olarak uygulanan gerilmelerin derinlikle azalmasından dolayı gömülme derinliği, sığ gömülü boru davranışını etkiyen en önemli parametrelerden biridir. Buna ek olarak merkez zemin prizması ile komşu zemin prizması arasındaki f_s değerinin derinlikle artışı, boruya etkiyen düşey gerilmeleri daha da azaltmaktadır. Nihai durumda gömülme derinliğinin 3D mesafeye kadar kademeli artışı boruya etkiyen gerilme ve deformasyonları %80 oranında azaltmıştır. Bu durum sığ gömülme koşullarındaki boruların kurulum ekipmanı, arazi koşulları, diğer alt yapı sistemleri ve çevresel etkenler göz önünde bulundurulduğunda, gömülme derinliğinin maksimum değerde tutulması gerektiğini ifade etmektedir. Benzer şekilde EPS Geofoamun kullanımı için aynı gömülme derinlikleri dikkate alınarak yapılan analizlerde 320 kPa düşey gerilme değeri için EPS15 3D gömülme derinliğinde elastik davranış sergilerken, EPS25 2D gömülme derinliğinde elastik davranış sergilemektedir. Bu durum yol üst yapısında rijit kaplama olmaması durumunda EPS Geofoamun aşırı deformasyonu sonucu sistemde meydana gelen olumsuzlukların önlenmesi için dikkate alınması gereken örtü yükü kalınlıklarını temsil etmektedir.

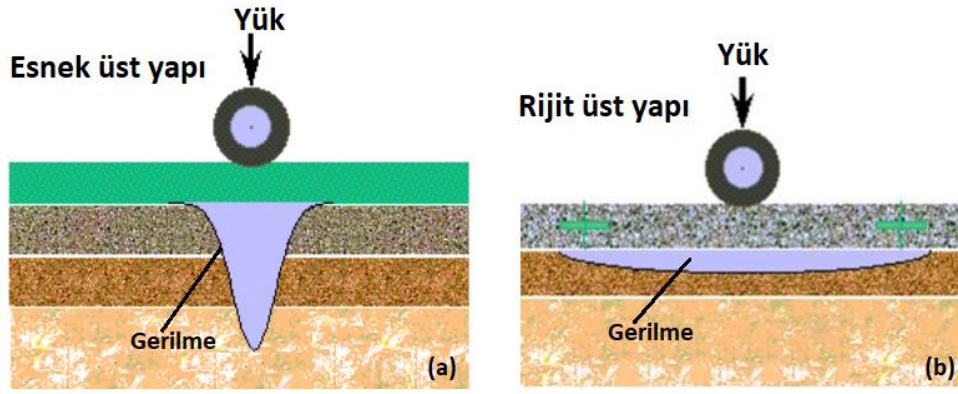
- 6) Gömülü boru sistemlerine etkileyen yükler, boru ve dolgunun görelî rijitlikleri ölçüsünde taşınır. Dolayısıyla boru ve dolgu rijitlikleri sistemin davranışını önemli derecede etkiler. Boru rijitliğindeki artış, boru tarafından taşınan gerilmelerde artışlara ve kemerlenme etkisinin kademeli olarak ortadan kalkmasına neden olur. Esnek borular için geçerli olan E_p değeri aralığı dikkate alınarak boru rijitliğinin artışı, boru çap değişimlerini kademeli olarak %47 azaltmıştır. Özellikle boru yatay çap değişimindeki kademeli azalma, boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerin düşey gerilmelerden daha fazla azalmasına ve boru yatay simetri eksenindeki pasif itkilerin kademeli olarak K_o gerilme koşullarına dönüşmesine neden olur. EPS Geofoamun kemerlenmeye olumlu katkı sağladığı gerilme seviyelerinde kullanımı, yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelere etkisi ihmal edilebilir seviyede olmasına rağmen merkez zemin prizmasından komşu zemin prizmasına gerilmelerin transferini artırır. Nihai durumda komşu zemin prizmasında K_o gerilme koşullarının oluşması, hem boru performansını olumlu yönde etkiler hem de pasif itkilerin mevcut diğer borulara olan olumsuz etkisi önlenmiş olur.
- 7) Boru rijitliğindeki artış ile gömülü boru sisteminde meydana gelen değişimlerin tam tersi dolgu rijitliğinin artışı ile meydana gelmiştir. Dolgu tarafından taşınan yüklerin ve merkez zemin prizmasından komşu zemin prizmasına yük transferinin artışı, merkez zemin prizmasındaki yanall toprak basıncı katsayısının K_p 'ye doğru yönelim göstermesini sağlar. Bu durum boruya etkileyen gerilmelerde ve boru çap değişimlerinde ciddi azalmalar meydana getirir. Özellikle boru çevresinde yer alan dolgunun rijitliğindeki artış, dolgudan boruya sağlanan zemin desteğini kayda değeri şekilde artırarak boru yatay çap değişimini önemli derecede kısıtlamıştır. Fakat boru yatay çap değişimindeki %75 oranındaki azalmaya rağmen boru yatay simetri eksenindeki yatay gerilmelerde ve etki mesafesinde önemli bir değişim meydana getirmemiştir. Bu durum dolgu rijitliğinin boru deformasyon davranışı ve boruya etkileyen düşey gerilmeleri azaltmada etkili olduğunu gösterirken borudan zemine aktarılan gerilmeler üzerinde etkisinin olmadığını göstermiştir. EPS Geofoamun elastik sınırlar içerisindeki gerilme seviyelerinde kullanımı, merkez zemin prizmasında kemerlenmeyi arttırarak boruya etkileyen düşey gerilmeleri daha da azaltır. Bu durum EPS Geofoama etkileyen düşey gerilmelerin azalmasına ve elastik davranış gösterdiği gerilme seviyelerinin artışına neden olur.

7.2 Sığ Gömülü Esnek Boru Sistemlerinin Tasarımı İçin Öneriler

Sığ gömülü esnek boru sistemleri ASHTOO (2007) tarafından önerilen %5 deformasyon kriterine göre inşa edilmelerine rağmen, maruz kaldıkları trafik yüklerinden dolayı boru kesitinde aşırı gerilmeler ve deformasyonlar meydana gelmektedir. Uygulama sahasında ve ya hizmet vermeye devam eden sığ gömülü esnek boru sistemlerinden alınan ölçümler sığ gömülü esnek boru sistemlerindeki deformasyonların %63'lük kısmının AASHTO (2007) tarafından önerilen %5 deformasyon sınırını aştığını göstermektedir (Motahari ve Abolmaali, 2010). Benzer sonuçlar başta Gassman vd. (2005) olmak üzere farklı araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Bu durumun en önemli nedenleri; yetersiz yatak zemininin varlığı, *uygun olmayan dolgu malzemesi*, *yetersiz örtü yükü kalınlığı*, trafik yüklerinin öngörülememesi, *uygun olmayan boru özellikliklerinin tercih edilmesi*, *yol üstü yapısının yeterli rijitlikte olmaması ve yol üst yapısındaki süreksizliklerin varlığı* olarak tanımlanabilir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan tam ölçekli model deneyler, sayısal analizler, gözlemler ve literatürdeki mevcut çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde sığ gömülü esnek boru sistemlerinin tasarımı için aşağıdaki değerlendirmelerin dikkate alınması önerilmektedir.

1) İnşa edilecek sığ gömülü esnek boru sistemi için yol üst yapısından bölgesel ve ya şerit olarak uygulanan trafik yükleri boru davranışını, boru deformasyonunu ve boruya etkileyen gerilmelerin büyüklüğünü belirleyen en önemli parametredir. Trafik yüklerini temsil eden tekerlek yükü, tekerleğin basma alanına bölündüğünde hesaplanan gerilmelerin yol üst yapısında yer alan rijit ve esnek yol üst yapısı tarafından alt tabakalara ve boruya iletilmektedir. Hesaplanan bu gerilmeler rijit bir yol üst yapısına etkidiğinde, rijit yapı gerilmeleri daha geniş bir alana yayarak gerilmelerin büyüklüğünü önemli ölçüde (%90'a varan azalmalar) azaltır (Şekil 7.1) Böylelikle boruya etkileyen gerilmeler önemli ölçüde azalarak boru çap değişimleri minimize edilir. İfade edilen bu durum için yol üst yapısında yer alan ve rijitliği yüksek olan kaplamanın bir bütün olarak çalışması yanı süreksizlik içermemesi hayata öneme sahiptir. Özellikle ülkemizde yol üst yapısında sürekli gerçekleştirilen kazı çalışmaları sonucunda yol üst yapısında meydana gelen düzensizlikler bölgesel olarak yüzölçümüne neden olmaktadır. Bu durumdan hem yol üst yapısı hem de gömülü boru sistemleri olumsuz etkilenmektedir.



Şekil 7.1 Rijit kaplamanın gerilme dağılımına etkisi [www.betonyol.org.tr]

2) Gömülü boru sistemlerindeki dolgu malzemesinin sahip olması gereken özellikler ilgili standartlarda açıkça belirtilmektedir. Rijitliği yüksek olan dolgu malzemesinden boruya sağlanan zemin desteği borunun yatay ve düşey çap değişimlerinde %80'a varan azalmalara neden olmaktadır. Özellikle dolgunun daha yüksek rijitlikte olması için tercih edilen iri daneli köşeli malzemeler her zaman boru performansına olumlu etki yapmaz. Boru ile temas alanı kısıtlı olan iri daneli köşeli malzemeler boru kesitinde delinmelere ve bölgesel yapısal hasarlara neden olabilmektedir (Şekil 7.2). Hizmet vermeye devam eden gömülü boru sistemleri için belirlenen yapısal hasarlar gruplandırıldığında boru kesitindeki delinmeler önemli bir yüzdeye sahiptir. Bundan sıkı gömülü esnek boru sistemleri için dolgu rijitliğinin artırılması için seçilen malzemelerin ve sıkıştırma yöntemlerinin esnek boru davranışına olan etkileri göz ardı edilmemelidir.



Şekil 7.2 Dolgudan kaynaklanan yapısal hasarlar (Masajedian 2011)

3) Sığ gömülü boru sistemlerinde borunun gömülme derinliği boru davranışını belirleyen önemli bir parametrelerden biridir. Bölgesel olarak uygulanan trafik yüklerinin boru taç bölgesinde yoğunlaşmasıyla boru deformasyonları en belirgin etkisini bu bölgede gösterir. Sığ gömülü esnek borulara özgü olan kalp şeklindeki deformasyon formu, boru taç bölgesinin eğilmesine ve yapısal hasarların oluşmasına neden olmaktadır. Uygulama sahasından alınan ölçümler boru kesitinde en fazla yapısal hasarların boru taç ve ya yatay simetri ekseninde meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 7.3). Boru taç bölgesindeki yapısal hasarların mertebesi örtü yükü kalınlığı ne kadar az olursa o kadar fazla olmaktadır. Bundan dolayı arazi koşulları, çevresel etkenler ve kurulum ekipmanı dikkate alınarak maksimum örtü yükü kalınlığı tercih edilmelidir. Ayrıca rijit bir yol üst kaplamasının varlığı bu etkileri önemli derecede azaltmaktadır.



Şekil 7.3 Korige HDPE ve çelik boruda için tacındaki yapısal hasarlar

Fakat çevresel etkenler, kurulum ekipmanı ve diğer gömülü yapıların konumu göz önüne alındığında yetersiz örtü yükü kalınlığında boru tacındaki yapısal hasarlar EPS Geofoam kullanarak minimize edilebilmektedir. Linear elastik gerilme seviyelerinde kullanılan EPS Geofoam boruya etkiyen gerilmeleri ve boru deformasyonlarını azaltarak yapısal hasarların oluşmasına büyük ölçüde engel olur.

Özellikle son yıllarda arazi uygulamalarına giren bu yöntem için farklı EPS Geofoam konfigürasyonları tercih edilmektedir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4 Sığ gömülü boru sistemlerinde EPS Geofoam'un kullanımına dair arazi görselleri (<https://geofoamintl.com>)

4) Boru esneme davranışı ile boru kesitinde meydana gelen yatay çap değişimi yatay simetri ekseninde yapısal hasarlara neden olur (Şekil 7.5).



Şekil 7.5 Yatay simetri eksenindeki yapısal hasarlar

Özellikle yatay simetri eksenindeki bölgenin yatayda uzaması borunun ek yerlerini zorlayarak yırtılmalara, komşu zemin prizmasında pasif itkilerin ve büyük yatay gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu yatay gerilmeler yanyana belirli aralıklarla inşa edilen sığ gömülü boru sistemlerine etki ederek boru performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılan tam ölçekli model deneyler, sayısal analizler ve parametrik çalışmalar ile literatür çalışmaları dikkate alındığında boru yatay uzamasından dolayı meydana gelen bu yatay gerilmeler yol üst yapısında rijit bir kaplamanın varlığı ve ya boru rijitliğinin artırılması ile azaltılabileceğini göstermektedir. Özellikle yan yana inşa edilen gömülü borular için bu yatay gerilmelerin tasarım aşamasında öngörülmesi ve gerekli önlemlerin alınması önem arz etmektedir.

- AASHTO International. (2011). Standard Specification for Poly Vinyl Chloride (PVC) Profile Wall Drain Pipe and Fittings Based on Controlled Inside Diameter, AASHTO Standard (M304).
- AASHTO International. (2018). Standard Specification for Corrugated Polyethylene Pipe, 300- to 1500-mm (12- to 60-in.) Diameter, AASHTO Standard (M294).
- AASHTO International. (2020). Standard Specification for Polypropylene Pipe, 300- to 1500-mm (12- to 60-in.) Diameter, AASHTO Standard (M330).
- AASHTO LRFD bridge design specifications. (2008). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdelsalam, S. S., & Azzam, S. A. (2016). EPS Resistance Factors and Applications on Flexible Walls. In *Geo-China* (pp. 131-138). ASCE. (Geo-Congress 2016: GSP 261).
- AbdelSalam, S. S., & Azzam, S. A. (2016). Reduction of lateral pressures on retaining walls using geofoam inclusion. *Geosynthetics International*, 23(6), 395–407.
- Akınay, E. (2017). Sıkışabilir Yatak Malzemesi Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi [Investigation of the Effects of Using Compressible Bedding Material on the Behavior of Buried Flexible Pipes] (Doctoral dissertation, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Al-Abri, D. S., & Mohamedzein, Y. E. A. (2010). Performance of Plastic Pipes Installed in Dune Sand. In *Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability—Renew, Rehab, and Reinvest* (p. 410).
- Allard, E., & El Naggar, H. (2016). Pressure Distribution around Rigid Culverts Considering Soil–Structure Interaction Effects. *International Journal of Geomechanics*, 16(2), 04015056.
- Al-Naddaf, M., Han, J., Xu, C., Jawad, S., & Abdulrasool, G. (2019). Experimental investigation of soil arching mobilization and degradation under localised surface loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(12), 04019114.
- Al-Naddaf, M., Rasheed, S. E., Rahmaninezhad, S. M., & Han, J. (2021). Effects of Geofoam Geometry and Location on Vertical Stresses on Buried Culverts during Construction and under Surface Loading. In *Geosynthetics Conference 2021* (pp. 549-560). Industrial Fabrics Association International.
- American Association of State Transportation Officials. (2007). *Load and Resistance Factor Design Bridge Design Specifications* (4th ed.). Washington, DC.
- Ari, M. (2020). Kum-Geosentetik Arayüzeyi Kayma Direncine Fraktal Boyutun Etkisinin Araştırılması [Investigation of the Effect of Fractal Dimension on Shear Resistance at the Sand-Geosynthetic Interface]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

- ASTM International. (2012). Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM standard (D854).
- ASTM International. (2016). Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soil Using Vibratory Table, ASTM Standard (D4253-16).
- ASTM International. (2016). Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soil Using Vibratory Table, ASTM standard (D4254-16).
- ASTM International. (2017). Standard Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe (SDR-PR) Based on Outside Diameter, ASTM Standard (F714-05).
- ASTM International. (2017). Standard Specification for Polyethylene (PE) Large Diameter Profile Wall Sewer and Drain Pipe, ASTM Standard (F894-05).
- ASTM International. (2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution of Soils Using Sieve Analysis, ASTM D6913.
- ASTM International. (2021). Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM Standard (D698-12).
- ASTM International. (2021). Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM Standard (D698-12).
- ASTM International. (2022). Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Large-Diameter Plastic Gravity Sewer Pipe and Fittings, ASTM Standard (F894-21).
- Atmatzidis, D. K., Missirlis, E. G., & Chrysikos, D. A. (2001). An Investigation of EPS Geofoam Behavior in Compression. In *Proceedings of the 3rd International Conference on EPS* (pp. 1-8).
- Atmatzidis, D. K., Missirlis, E. G., & Theodorakopoulos, E. B. (2001). Shear Resistance on EPS Geofoam Block Surfaces. In *3rd Annual conference on EPS geofoam*.
- Ayche, N. (2005). The Effect of High Density Polyethylene (HDPE) Pipe Profile Geometry on Its Structural Performance. (Master's thesis, Ohio University, The College of Engineering and Technology). Bareither, C.A., Benson, C.H. ve Edil, T.B (2008). Comparison of shear strength of sand backfills measured in small-scale and large-scale direct shear tests, *Can. Geotech. J.* 45: 1224–1236 (2008).
- Beju, Y. Z., & Mandal, J. N. (2018). Experimental Investigation of Shear Strength Behaviors of Stone Dust–EPS Geofoam Interface. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4), 04018033.
- Bhatia, S., & Kasturi, G. (circa 1996). Comparison of PVC and HDPE Geomembranes (Interface Friction Performance) [Research Report]. Department of Civil and Environmental Engineering, Syracuse University.
- Bierbaumer, A. (1913). *Die dimensionierung des tunnelmauerwerks*. Leipzig, Germany: Engelmann. [In German]
- Bierbaumer, A. (1913). *Die dimensionierung des tunnelmauerwerks*. Leipzig, Germany: Engelmann. [In German]

- Brachman, R. W. I., Moore, I. D., & Munro, S. M. (2008). Compaction Effects on Strains within Profiled Thermoplastic Pipes. *Geosynthetics International*, 15(2), 72-85.
- Brachman, R. W., Moore, I. D., & Rowe, R. K. (2001). The Performance of a Laboratory Facility for Evaluating the Structural Response of Small-Diameter Buried Pipes. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 260–275.
- Burke, T. S., & Elshafie, M. Z. E. B. (2020). Arching in granular soils: experimental observations of deformation mechanisms. *Geotechnique*.
- Burke, T. S., & Elshafie, M. Z. E. B. (2020). Arching in granular soils: limit state equilibrium. *Geotechnique*.
- Cai, Y., Chen, Q., Zhou, Y., Nimbalkar, S., & Yu, J. (2017). Estimation of passive earth pressure against rigid retaining wall considering arching effect in cohesive-frictional backfill under translation mode. *International Journal of Geomechanics*, 04016093.
- Canadian Standards Association. (2004). Standard Practice for the Installation of Thermoplastic Drain, Storm, and Sewer Pipe and Fittings (CAN/CSA B182.11).
- Carlsson, B. (1987). Armerad jord – berakningsprinciper för – banakar på palar. Linköping, Sweden: Terrarema AB. [In Swedish] Chaallal, O. Arockiasamy, M.; Godat, A. Field test performance of buried flexible pipes under live truck loads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015, 29(5), 04014124
- Chen, R. P., Tang, L. J., & Yin, X. S. (2015). An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils. *Acta Geotechnica*, 10, 683–692.
- Chen, R., Yin, X., Tang, L., & Chen, Y. (2018). Centrifugal model tests on face failure of earth pressure balance shield induced by steady state seepage in saturated sandy silt ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 315-325.
- Chevalier, B., Combe, G., & Villard, P. (2012). Experimental and discrete element modeling studies of the trapdoor problem: influence of the macro-mechanical frictional parameters. *Acta Geotechnica*, 7, 15–39.
- Chun, B. S., Lim, H., Sagong, M., & Kim, K. (2004). Development of a Hyperbolic Constitutive Model for Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam under Triaxial Compression Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 22, 223-237.
- Coombs, S. R., & Pluimer, M. (2010). Performance Evaluation Of 48” Diameter Corrugated High Density Polyethylene Pipe Under 315,000 Lbs (143,010 Kg) Rail Car Loading, Proceedings of the AREMA 2010 Annual Conference & Exposition.
- Coombs, S. R., & Pluimer, M. (2010). Performance Evaluation Of 48” Diameter Corrugated High Density Polyethylene Pipe Under 315,000 Lbs (143,010 Kg) Rail Car Loading, Proceedings of the AREMA 2010 Annual Conference & Exposition.

- Costa, Y. D., Zornberg, J. G., Bueno, B. S., & Costa, C. L. (2009). Failure mechanisms in sand over a deep active trapdoor. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1741-1753.
- CPPA (Corrugated Polyethylene Pipe Association). Recommended Installation Practices For Corrugated Polyethylene Pipe and Fittings; CPPA: Washington, DC, USA, 2006; pp. 25–26
- Dave, T. N., & Dasaka, S. M. (2014). Surcharge Induced Earth Pressure Reduction on Rigid Retaining Wall using EPS Geofoam, and Underground Construction GSP 242 © (ASCE).
- Dewoolkar, M. M., Santichaiant, K., & Ko, H. Y. (2007). Centrifuge modeling of granular soil response over active circular trapdoors. *Soils and Foundations*, 47(5), 931–945.
- Dhar, A. S., & Moore, I. D. (2008). Analysis of local bending in twin-wall pipes: Comparison with measurements. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 36(1), 43-63.
- Dhar, A. S., Moore, I. D., & McGrath, T. J. (2004). Two-Dimensional Analyses of Thermoplastic Culvert Deformations and Strains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 199-208.
- Dove, J. E., & Frost, J. D. (1999). Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane Particle Interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(7), 544-555.
- Duncan, J. M. (1979). Behavior and Design of Long Span Metal Culverts. ASCE.
- Dyer, M. R., & Milligan, G. W. E. (1984). A Photoelastic Investigation of the Interaction of a Cohesionless Soil with Reinforcement Placed at Different Orientations. In *Proceedings of the International Conference on Insitu Soil and Rock Reinforcement*, Paris (pp. 257–262).
- EDO. (1992). Expanded Polystyrene Construction Method [in Japanese]. Riko Tosho Publishers, Tokyo, Japan.
- Elragi, A. F. (2000). Selected engineering properties and applications of EPS geofoam. State University of New York College of Environmental Science and Forestry, Doctoral dissertation.
- Ertuğrul, O. L., & Trandafir, A. C. (2011). Reduction of Lateral Earth Forces Acting on Rigid Non-yielding Retaining Walls by EPS Geofoam Inclusions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12), 1711-1718.
- Ertuğrul, O. L., & Trandafir, A. C. (2012). Reduction of Lateral Earth Forces on Yielding Flexible Retaining Walls by EPS Geofoam Inclusions. *GeoCongress 2012(ASCE)*, 2068-2077.
- Evans, C. H. (1983). An examination of arching in granular soils. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Fang, H., Tan, P., Du, X., Li, B., Yang, K., & Zhang, Y. (2019). Influence of backfill compaction on mechanical characteristics of high-density polyethylene double-wall corrugated pipelines. *Mathematical Problems in Engineering*.

- Fang, H., Tan, P., Du, X., Li, B., Yang, K., & Zhang, Y. (2020). Numerical and experimental investigation of the effect of traffic load on the mechanical characteristics of HDPE double-wall corrugated pipe. *Applied Sciences*, 10(2), 627.
- Faragher, E., Fleming, P. R., & Rogers, C. D. (2000). Analysis of repeated-load field testing of buried plastic pipes. *Journal of Transportation Engineering*, 126(3), 271–277.
- Gassman, S. L., Schroeder, A. J., & Ray, R. P. (2005). Field performance of high density polyethylene culvert pipe. *Journal of Transportation Engineering*, 131(2), 160.
- George, T. I., & Dasaka, S. M. (2023). Mechanics of arch action in soil arching. *Acta Geotechnica*, 18(7), 1991–2009. 01697-0
- German ATV rules and standards. (1990). ATV-A 161 E-90. Structural calculation of driven pipes (pp. 18–20). Hennef.
- Guido, V. A., Kneuppel, J. D., & Sweeney, M. A. (1987). Plate loading test on geogrid reinforced earth slabs. In *Geosynthetics'87 conference*, New Orleans, LA, February 24–25, 1987 (pp. 1–8). Industrial Fabrics Association International.
- Gulen, M., & Kilic, H. (2024). Effects of pipe deflection and arching on stress distribution and lateral earth pressure coefficient in buried flexible pipes. *Applied Sciences*, 14(4), 1667.
- Gür, T. C. (2022). *Geoteknik Mühendisliği Malzemelerinde Ara Yüzey Etkileşiminin Büyük Ölçekli Direkt Kesme Deneyleriyle İncelenmesi* [Investigation of interface interaction in geotechnical engineering materials through large-scale direct shear tests] (Master's thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Han, J., Wang, F., Al-Naddaf, M., & Xu, C. (2017). Progressive development of two-dimensional soil arching with displacement. *International Journal of Geomechanics*, 17(12), 04017112.
- Handy, R. L. (1985). The arch in soil arching. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(3), 302–318.
- Hazarika, H. (2006). Stress-strain modeling of EPS Geofoam for large strain applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 79–90.
- He, L., & Zhang, Q. B. (2015). Numerical investigation of arching mechanism to underground excavation in jointed rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 54–67.
- Heger, F. J. (1988). New installation designs for buried concrete pipe. In *Proc., Pipeline Infrastructure* (pp. 117–135).
- Hello, L. B., & Villard, P. (2009). Embankments reinforced by piles and geosynthetics—numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment. *Engineering Geology*, 106(1–2), 78–91.
- Hewlett, W. J., & Randolph, M. F. (1988). Analysis of piled embankments. *Ground Engineering*, 22(3), 12–18.
- Horvath, J. S. (1995). *Geofoam geosynthetic*. Horvath Engineering.

- Horvath, J. S. (1997). The compressible inclusion function of EPS geof foam. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1–3), 77–120.
- Iglesia, G. R., Einstein, H. H., & Whitman, R. V. (2014). Investigation of soil arching with centrifuge tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013005.
- Indraratna, B., Biabani, M. M., & Nimbalkar, S. (2015). Behavior of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading in plane-strain condition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1).
- IREX. (2012). Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements. ASIRI National Project, Presses des Ponts.
- Janssen, H. A. (1895). Versuche über Getreidedruck in Silozellen [Experiments on grain pressure in silo cells]. *Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure*, 39, 1045-1049.
- Järvenkylä, J. J. (1989). Thin-walled thermoplastic pipes. *Construction and Building Materials*, 3(4), 191–200.
- Kang, J. (2019). Finite element analysis for deeply buried concrete pipe proposed imperfect trench installations with expanded polystyrene (EPS) foams. *Engineering Structures*, 286–295.
- Kang, J. S., Han, T. H., Kang, Y. J., & Yoo, C. H. (2009). Short-term and long-term behaviors of buried corrugated high-density polyethylene (HDPE) pipes. *Composites Part B*, 40(5), 404–412.
- Kang, J., Jung, Y., & Ahn, Y. (2013). Cover requirements of thermoplastic pipes used under highways. *Composites Part B*, 55, 184–192.
- Kang, J., Parker, F., Kang, Y. J., & Yoo, C. H. (2008). Effects of frictional forces acting on sidewalls of buried box culverts. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(3), 289-306.
- Katona, M. G. (2017). Influence of soil models on structural performance of buried culverts. *International Journal of Geomechanics*, 17(1), 04016031.
- Katona, M. G., & Akl, A. Y. (1985). Analysis and behavior of buried culverts with slotted joints. In *Culverts: Analysis of Soil-Culvert Interaction and Design* (pp. 211-82). Transportation Research Record 1008, TRB, Washington, D.C.
- Kefçi, Y. (2020). Determination of the optimum geof foam geometry for shallowly buried flexible pipe by finite element analyses. Middle East Technical University (Master's thesis).
- Khan, M. I., & Meguid, M. A. (2018). Experimental investigation of the shear behavior of EPS Geof foam. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4(2).
- Khan, M. I., & Meguid, M. A. (2021). Evaluating the role of geof foam properties in reducing lateral loads on retaining walls: A numerical study. *Sustainability*, 13, 4754.

- Kılıç, H., & 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, H., Choi, B., & Kim, J. (2010). Reduction of earth pressure on buried pipes by EPS geofoam inclusions. *Geotechnical Testing Journal*, 33(4), 1–10.
- Kim, H., Witthoeft, A. F., & Kim, D. (2018). Numerical study of earth pressure reduction on rigid walls using EPS geofoam compressible inclusions. *Geosynthetics International*, 25(2), 180-199.
- Kirişçi, H. (2019). Genleştirilmiş polistiren (EPS) köpüğün geoteknikte kullanılması [Use of expanded polystyrene (EPS) foam in geotechnical engineering] (Master dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kishida, T., & Yoshimi, Y. (1981). A ring torsional apparatus for evaluations of friction between soil and metal surface. *Geotechnical Testing Journal*, 4(4), 145-152.
- Kitane, Y., & McGrath. (2006). Three-dimensional modeling of live loads on culverts. *Pipelines*, 40854(211), 82.
- Krynine, D. P. (1945). Discussion of stability and stiffness of cellular cofferdams by Karl Terzaghi. *Transactions, ASCE*, 110, 1175–1178.
- Ladanyi, B., & Hoyaux, B. (1969). A study of the trap-door problem in a granular mass. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(1), 1–14.
- Lai, H. J., Zheng, J. J., Zhang, R. J., & Cui, M. J. (2018). Classification and characteristics of soil arching structures in pile-supported embankments. *Computers and Geotechnics*, 98, 153–171.
- Lal, B. R. R., Padade, A. H., & Mandal, J. N. (2014). Numerical simulation of EPS geofoam as compressible inclusions in fly ash backfill retaining. *Ground Improvement and Geosynthetics*, 526-535.
- Leonards, G. A., & Juang, C. H. (1985). Predicting performance of buried metal conduits. In *Culverts: Analysis of Soil-Culvert Interaction and Design* (Transportation Research Record 1008, pp. 82-211). TRB.
- Li, W., Zhang, C., Zhang, D., Ye, Z., & Tan, Z. (2022). Face stability of shield tunnels considering a kinematically admissible velocity field of soil arching. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 505–526.
- Liang, L., Xu, C., Chen, Q., & Chen, Q. (2020). Experimental and theoretical investigations on evolution of soil-arching effect in 2D trapdoor problem. *International Journal of Geomechanics*, 20(6), 06020007.
- Lin, X. T., Chen, R. P., Wu, H. N., & Cheng, H. Z. (2019). Three-dimensional stress-transfer mechanism and soil arching evolution induced by shield tunneling in sandy ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 93, 103104.
- Lin, X., Chen, R., Wu, H., Meng, F., Liu, Q., & Su, D. (2022). A composite function model for predicting the ground reaction curve on a trapdoor. *Computers and Geotechnics*, 142, 104581.

- Liu, S. H. (2006). Simulating a direct shear box test by DEM. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(2), 155–168.
- Lohnes, R. A., Wipt, T. J., Klaiber, F. W., Conard, B. E., & Ng, K. W. (1997). Investigation of plastic pipes for highway applications. Final Rep.: Phase II, Iowa DOT Project HR-373A, Iowa State Univ., Ames, IA.
- Ma, Q., Ku, Z., & Xiao, H. (2019). Model tests of earth pressure on buried rigid pipes and flexible pipes underneath expanded polystyrene (EPS). *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- Madhavi Latha, G., & Rajagopal, K. (2007). Parametric finite element analyses of geocell supported embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(8), 917–927.
- Mahgoud, A., & El Naggar, H. (2020). Innovative application of tire-derived aggregate around corrugated steel plate culverts. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(3), 04020025.
- Mandal, J. N. (2012). Behavior of expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial loading conditions. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2543-2553.
- Marston, A. (1930). The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments. Bulletin No. 96, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames, Iowa.
- Marston, A., & Anderson, A. O. (1913). The theory of loads on pipes in ditches: And tests of cement and clay drain tile and sewer pipe. Bulletin No. 31, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames, Iowa.
- Marston, A., & Anderson, A. O. (1913). The theory of loads on pipes in ditches: And tests of cement and clay drain tile and sewer pipe. Bulletin No. 31, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames, Iowa.
- Marston, A., & Anderson, A. O. (1913). The theory of loads on pipes in ditches: And tests of cement and clay drain tile and sewer pipe. Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts Report, 30–62.
- Masajedian, S. S. (2001). Experimental investigation of the behavior of the steel reinforced high density polyethylene and corrugated metal pipe (Master's thesis, The University Of Texas At Arlington).
- McAffee, R. P., & Valsangkar, A. J. (2004). Geotechnical properties of compressible materials used for induced trench construction. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, 32(2), 143–152.
- McGrath, T. J., Selig, E. T., Webb, M. C., & Zoladz, G. V. (1999). Pipe interaction with the backfill envelope. FHWA, Washington, DC, USA, No. FHWA-RD-98-191.
- Meguid, M. A., & Ahmed, M. R. (2020). Earth pressure distribution on buried pipes installed with geofoam inclusion and subjected to cyclic loading. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(1), 1–8.
- Meguid, M. A., Ahmed, M. R., Hussein, M. G., & Omeman, Z. (2017). Earth pressure distribution on a rigid box covered with U-shaped geofoam wrap. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3, 11.

- Moghaddas Tafreshi, S. N., Joz Darabi, N., & Dawson, A. R. (2019). Combining EPS geof foam with geocell to reduce buried pipe loads and trench surface rutting. *Geotextiles and Geomembranes*.
- Moore, I. D., Lapos, B., & Mills, C. (2004). Biaxial testing to investigate soil-pipe interaction of buried fiber-reinforced cement pipe. *Transportation Research Record*, 1868(1), 169–174.
- Moser, A. P., & Folkman, S. (2008). *Buried Pipe Design* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Motahari, A., & Abolmaali, A. (2010). Structural deformation characteristics of installed HDPE circular pipelines. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4), 298–304.
- Munro, S. M., Moore, I. D., & Brachman, R. W. I. (2009). Laboratory testing to examine deformations and moments in fiber-reinforced cement pipe. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, 1722–1731.
- NAVFAC. (1986). *US Department of Navy Engineering Manual (EM 7.02)*.
- NCHRP. (1999). *HDPE pipe: Recommended material specifications and design requirements (Report 429)*. National Academy Press.
- Oiseth, E., Svano, G., Watn, A., & Emdal, A. (2002). A computer program for designing reinforced embankments. In *Seventh International Conference on Geosynthetics (7-ICG)*, Nice, France.
- Paik, K. H., & Salgado, R. (2003). Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects. *Géotechnique*, 53(7), 643–654.
- Palmeira, E. M., & Milligan, G. W. E. (1989). Scale effects in direct shear tests on sand. In *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro (Vol. 1, pp. 739–742).
- Parker, B. A., McAfee, R. P., & Valsangkar, A. J. (2008). Field performance and analysis of 3-m-diameter induced trench culvert under a 19.4-m soil cover. *Transportation Research Record*, 2045, 68–76.
- Pengpeng, N., Guoxiong, M., & Yanlin., Z. (2017). Displacement-dependent earth pressures on rigid retaining walls with compressible geof foam inclusions: Physical modeling and analytical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 17(6), 04016132.
- Potyondy, J. G. (1961). Skin friction between various soils and construction material. *Geotechnique*, 11(4), 339–353.
- Rogbeck, Y., Gustavsson, S., Sodergren, I., & Lindquist, D. (1998). Reinforced piled embankments in Sweden—design aspects. In *Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, GA, Industrial Fabrics Association International, Roseville, MN.
- Rogers, C. D. F., Fleming, P. R., & Talby, R. (1996). Use of visual methods to investigate influence of installation procedure on pipe-soil interaction. *Transportation Research Record*, 1514, 76–85.

- Samanta, M., Punetha, P., & Sharma, M. (2018). Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface. *Geomechanics and Engineering*, 14(4), 387–398.
- Sargand, S. M., Hazen, G. A., Liu, X., Masada, T., & Hurd, J. O. (1995). Structural performance of buried polyvinyl chloride pipes under large distributed load. *Transportation Research Record*, 1514, 59–67.
- Sargand, S. S., Masada, T., Hazen, G. A., & Schehl, D. (2002). Field verification of structural performance of thermoplastic pipe under deep backfill conditions. NASA STI/Recon Technical Report N, NASA, Washington, DC, USA.
- Söylemez, B. (2017). Laboratory experiments on improvement of buried flexible pipes by using geofoam (Master's thesis). Middle East Technical University.
- Spangler, M. G. (1941). The structural design of HDPE pipe culverts (Report No. 153). Iowa State University.
- Spangler, M. G. (1950). Field measurements of the settlement ratios of various highway culverts (Bulletin No. 170). Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College.
- Spangler, M. G., & Handy, R. L. (1982). *Soil Engineering* (4th ed.). Harper & Row.
- Sun, L., Hopkins, T. C., & Beckham, T. L. (2009). Reduction of stresses on buried rigid highway structures using the imperfect ditch method and expanded polystyrene (geofoam) (Research Report No. KTC-07-14/SPR-228-01- 1F). Kentucky Transportation Center, University of Kentucky.
- Sun, L., Hopkins, T. C., & Beckham, T. L. (2011). Long-term monitoring of culvert load reduction using an imperfect ditch backfilled with geofoam. *Transportation Research Record*, 2212, 56-64.
- Szypcio, K. D. (2019). Direct shear test for coarse granular soil. *International Journal of Civil Engineering*, 17(9), 1-8.
- Tanyu, B. F., Aydilek, A. H., Lau, A. W., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2013). Laboratory evaluation of geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades. *Geosynthetics International*, 20(2), 47–61.
- Tao, Q., He, Z., & Jia, Y. (2020). Influence of filling properties and culvert structure parameters on the soil arching effect of upper-buried-type culverts. *Results in Physics*, 16, 103003.
- Tavakoli Mehrjardi, G., Behrad, R., & Moghaddas Tafreshi, S. N. (2019). Scale effect on the behavior of geocell-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), 154–163.
- Tavakoli Mehrjardi, G., Moghaddas Tafreshi, S. N., & Dawson, A. R. (2012). Combined use of geocell reinforcement and rubber–soil mixtures to improve performance of buried pipes. *Geotextiles and Geomembranes*, 34, 116–130.
- Tefera, T. H., Aabøe, R., Bruun, H., & Aunaas, K. (2010). FEM simulation of full-scale and laboratory models test of EPS. The Norwegian Public Roads Administration, Norway.

- Terzaghi, K. (1936). Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trapdoor. In *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 307–311). Harvard, MA, USA.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons.
- Tiwari, B., & Al-Adhandh, A. R. (2014). Influence of relative density on static soil-structure frictional resistance of dry and saturated sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2), 411-427.
- Tognon, A. R. M., Rowe, R. K., & Brachman, R. W. I. (1999). Evaluation of side wall friction for a buried pipe testing facility. *Geotextiles and Geomembranes*, 17(3), 193–212.
- Trandafir, A. C., Moyles, J. F., & Ericson, B. A. (2010). Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls: A Numerical Study. *Sustainability*, 13, 4754.
- Trung, N. N., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., & Biabani, M. M. (2016). Experimental and discrete element modeling of geocell-stabilized subballast subjected to cyclic loading. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(4).
- TS EN 14933 (2008). Isı yalıtım mamulleri ve hafif dolgular- İnşaat mühendisliği uygulamaları için Genleştirilmiş polistirenden (EPS) fabrikasyon mamuller – Özellikler.
- Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A., Lodder, H. J., & van Tol, A. F. (2013). An analytical model of arching in piled embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 39, 78–102.
- Vardoulakis, I., Graf, B., & Gudehus, G. (1981). Trap-door problem with dry sand: a statical approach based upon model test kinematics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5(1), 57–78.
- Villard, P., Huckert, A., & Briançon, L. (2016). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: numerical approach and design. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 381–395.
- Wang, H. L., & Chen, R. P. (2019). Estimating static and dynamic stresses in geosynthetic-reinforced pile-supported track-bed under train moving loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(7), 04019029.
- Wang, H. L., Chen, R. P., Cheng, W., Qi, S., & Cui, Y. J. (2018). Full-scale model study on variations of soil stress in geosynthetic-reinforced pile-supported track bed with water level change and cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(1), 60–68.
- Watkins, R. K., & Reeve, R. C. (1982). Effect of heavy loads on buried corrugated polyethylene pipe. *Advanced Drainage Systems*, Columbus, OH.

- Witthoeft, A. F., & Kim, H. (2015). Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using EPS geofoam compressible inclusions. *Geosynthetics International*, 23, 1–14.
- Witthoeft, A. F., Kim, H., & Kim, D. (2018). Impacts of EPS inclusion density and backfill soil type on earth pressure reduction around a buried pipe. In 11th International Conference on Geosynthetics, Seoul, Korea.
- Wong, L., & Leo, C. J. (2006). A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 299–310.
- Wu, P., Matsushima, K., & Tatsuoka, F. (2008). Effects of specimen size and some other factors on the shear strength and deformation of granular soils in direct shear tests. *Geotechnical Testing Journal*, 31(1), 45–64.
- Xenaki, V. C., & Athanasopoulos, G. A. (2001). Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofoam-Sand Interface by Direct Shear Testing. *Geosynthetics International*, 8(6), 471–499.
- Yebeltal, Z. B., & Mandal, J. N. (2018). Experimental Investigation of Shear Strength Behaviors of Stone Dust–EPS Geofoam Interface. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4), 04018033.
- Zhang, C., & Moore, I. D. (1997). Nonlinear mechanical response of high-density polyethylene. Part II: uniaxial constitutive modeling. *Polymer Engineering & Science*, 37(2), 414–420.
- Zhang, H., Zhang, P., Zhou, W., Dong, S., & Ma, B. (2016). A new model to predict soil pressure acting on deep burial jacked pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60(11), 183–196.
- Zou, Y. (2001). Behavior of the expanded polystyrene (EPS) geofoam on soft soil.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Gülen, M., Kılıç, H., & Gür, T. C., (2022). EPS Geofoam Malzeme Davranışının DeneySEL Ve Sayısal Analizlerle İncelenmesi. Zemin Mekaniği Ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı, Kayseri, Türkiye.

Makaleler

1. Gülen, M., & Kılıç, H., (2024). Effects of Pipe Deflection and Arching on Stress Distribution and Lateral Earth Pressure Coefficient in Buried Flexible Pipes. APPLIED SCIENCES, vol.14, no.4, 1667-1692.

Projeler

1. Gömülü Esnek Boru Sistemlerinde EPS Kullanımının Yanal Toprak Basınçlarına Etkisinin DeneySEL ve Sayısal Analizlerle Araştırılması, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Yıldız Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenen Proje (GAP), Mayıs 2022- Aralık 2023 (Araştırmacı).

2. Gömülü Boru Tasarımında Ara Yüzey Etkileşiminin Büyük Ölçekli Direk Kesme Kutusu Deneyleri ile İncelenmesi, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Yıldız Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenen Proje (GAP), Mayıs 2022- Aralık 2023 (Araştırmacı).