T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖMÜLÜ BORU ETRAFINDA YUMUŞAK BÖLGE UYGULAMASININ SAYISAL ANALİZLER İLE İNCELENMESİ

İbrahim Furkan BEKTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı

Danışman
Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Eş-Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖMÜLÜ BORU ETRAFINDA YUMUŞAK BÖLGE UYGULAMASININ SAYISAL ANALİZLER İLE İNCELENMESİ

İbrahim Furkan BEKTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mehmet Muhit BERİLGEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üye. Hadi KHANBABAZADEH, Üye
Gebze Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Havvanur KILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan GÖMÜLÜ BORU ETRAFINDA YUMUŞAK BÖLGE UYGULAMASININ SAYISAL ANALİZLER İLE İNCELENMESİ 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.

İbrahim Furkan BEKTAŞ

İmza

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

Sevgili
Anneme ve Babama

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasının başlangıcından çalışmanın sonuçlanmasına kadar geçen yaklaşık 19 aylık süre boyunca üstesinden gelmekte zorlandığım her durumda büyük bir sabır ve ilgiyle bana değerli vaktini ayırarak bu tez çalışmasının başarıya ulaşmasında kendisine çok şey borçlu olduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Havvanur KILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca lisans eğitimimin daha ilk yılında kendisini tanıma fırsatı bulduğum ve Geoteknik Anabilim Dalı'nı inşaat mühendisliği eğitimimin ilk yılında bana sevdiren ve ilerleyen yıllarda bu alanda akademik çalışma yapma konusunda motive olmama vesile olan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM'a da teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasının en zor, zahmetli ve zaman zaman da bıktırıcı kısmı olan FLAC3D yazılımını öğrenme konusunda üzerimde çok büyük emeği olan, gece-gündüz, haftaiçi-haftasonu fark etmeksizin büyük bir nezaket ve sabırla bana yardımcı olan değerli akademisyen Dr. Öğr. Üyesi Hadi KHANBABAZADEH'ye şükranlarımı sunarım. Ayrıca değerli vakitlerini bana ayıran, bilgi ve tecrübelerinden süreç içerisinde yararlanma fırsatını bulduğum değerli akademisyeler Prof. Dr. Mehmet Muhit BERİLGEN'e ve Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlanma fırsatı bulduğum ve bu tez çalışmasında ikinci danışmanım olan Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK'a teşekkür ederim. Ayrıca tüm dostane yardımlarından dolayı Babak ROUZEGARI'ye ve Skander HAMLAOUI'ye teşekkürü borç bilirim.

Son olarak hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteği benden esirgemeyen, her durumda benim için ellerinden gelenin daha fazlasını yapan değerli anneme, babama ve kardeşlerime sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım.

İbrahim Furkan BEKTAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xvii

ÖZET xviii

ABSTRACT xx

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2

1.1.1 Borular ile İlgili Genel Bilgiler 3

1.1.2 Zeminlerde Kemerlenme Davranışı 3

1.1.3 EPS Geofoam Malzemenin Özellikleri ve Davranış Biçimi 4

1.1.4 Gömülü Boru – EPS Geofoam Malzeme İlişkisi 18

1.2 Tezin Amacı 35

1.3 Hipotez 36

2 ÇALIŞMADA KULLANILAN FLAC3D SAYISAL ANALİZ PROGRAMI VE TEORİK ARKA PLANI 37

2.1 FLAC3D Programı ve Kullanım Alanları 37

2.2 FLAC3D ile Sayısal Model Oluşturmanın Teorik Arka Planı 38

2.2.1 Flac3D ile Geometri Oluşturma Yöntemleri 41

2.2.2 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması 43

2.2.3 Yapısal Elemanların Modellenmesi ve FLAC3D Yazılımında Tanımlı Yapısal Eleman Türleri 45

3 FLAC3D İLE BORU-ZEMİN İLİŞKİSİNİN MODELLENMESİ 52

3.1 GERÇEK ÖLÇEKLİ DENEY HAKKINDA GENEL BİLGİLER 52

3.2 LABORATUVAR DENEYLERİNİN FLAC3D SONLU FARKLAR YAZILIMI İLE MODELLENMESİ VE MODEL PARAMETRELERİ İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN KALİBRASYON ÇALIŞMALARI 61
3.2.1 Borusuz Deney Modeli Kapsamında Gerçekleştirilen Çalışmalar 61
3.2.2 Referans Deney Modeli Kapsamında Gerçekleştirilen Çalışmalar 68
3.2.3 EPS Konfigürasyonlu Deney Modeli Kapsamında Gerçekleştirilen Çalışmalar 73

4 FLAC3D SAYISAL ANALİZ SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ 77
4.1 BORUSUZ DENEY ANALİZLERİ KAPSAMINDA ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 77
4.2 REFERANS DENEY ANALİZLERİ KAPSAMINDA ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 80
4.3 EPS'Lİ KONFİGÜRASYON VE PARAMETRİK ANALİZLER KAPSAMINDA ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 86
4.3.1 Düşey ve Yatay Kemerlenme Faktörlerinin Belirlenmesi 108

5 SONUÇ VE ÖNERİLER 112
5.1 FLAC3D Yazılımı ile Sayısal Modellerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 112

KAYNAKÇA 122

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 124

SİMGE LİSTESİ

A	Yüzey alanı
c	Kohezyon
C_C	Derecelenme katsayısı
D_{10}	Efektif dane çapı
D_{50}	Ortalama dane çapı
ΔY	Düşey eksende boru esnemesi
ΔX	Yatay eksende boru esnemesi
e_{max}	En büyük boşluk oranı
e_{min}	En küçük boşluk oranı
E_{50}^{ref}	PH modelde referans ortalama sekant modülü
E_{oed}^{ref}	PH modelde referans tanjant ödometre modülü
E_{ur}^{ref}	PH modelde referans yük boşaltma-geri yükleme modülü
m	PH modelde gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet
ϕ	Zemin kayma dayanımı açısı
ψ	Zemin genleşme açısı
ε	Eksenel şekil değiştirme
F_s	Sürtünme kuvveti
G_s	Özgül ağırlık
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
σ_n, σ_m	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
DEM	Discrete Element Method
EPS	Expanded Polystrene
FLAC	Fast Lagrangian Analysis of Continua
FISH	Flac - ISH
HDPE	High Density Polyethylene
LL	Likit Limit
NPRA	Norway Public Road Administration
PH	Plastic-Hardening Model
PVC	Polyvinyl Chloride

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Boru kesiti üzerinde kullanılan ifadeler [3] 3
Şekil 1.2 Üç eksenli basınç deneyleri için EPS numunesi [8] 5
Şekil 1.3 EPS numunesinin üç eksenli basınç testi [8] 6
Şekil 1.4 Üç eksenli basınç deneyleri sonucu EPS numunelerinin deformasyon durumları [8] 6
Şekil 1.5 EPS Geofoam'ın basınç yükü altında farklı yoğunluklar için gerilme-şekil değiştirme davranışı [5] 7
Şekil 1.6 EPS Geofoam'ın eğilme mukavemeti testi ve yükleme altındaki deformasyon davranışı [5] 8
Şekil 1.7 Yüksek dolgulu bir aç-kapa tünelde yük azaltmak için oluşturulan ayrık elemanlar modeli [12] 9
Şekil 1.8 Basınç testi (solda) ve çekme testi (sağda) sonuçlarının ayrık elemanlar modeli-gerçek deney sonuçları karşılaştırması [12] 9
Şekil 1.9 İstinat duvarı arkasına yerleştirilen EPS bloklarının maruz kaldığı normal gerilme ve kayma gerilmeleri [13] 10
Şekil 1.10 Test edilen malzemeler a) Geofoam blok b) Çelik Plaka c) Beton blok d) Ahşap blok [13] 12
Şekil 1.11 Kesme kutusu testinde kayma gerilmelerine maruz kalan tipik bir ara yüzeyin şematik gösterimi [13] 12
Şekil 1.12 *Passo del Bratello* (Parma)'daki EPS yol dolgusunun tasarım kesiti [7] 13
Şekil 1.13 *Passo del Bratello* (Parma)'daki EPS yol dolgusunun 2002'deki inşaat aşaması ve 2019 yılındaki durumu [7] 14
Şekil 1.14 *Adriatica* Karayolu üzerindeki köprü temel zeminin EPS dolgu tasarım kesiti [7] 14
Şekil 1.15 Roma'da bulunun *"Grande Raccordo Anulare"* karayolu altındaki aç-kapa tüneli üzerinde uygulanan EPS dolgusunun plan ve tasarım kesiti [7] 15
Şekil 1.16 *"Grande Raccordo Anulare"* karayolu çalışmasının 2007 yılındaki inşaat aşaması ile 2018 yılındaki son durumun karşılaştırılması [7] . 15
Şekil 1.17 Roma-Fuimicino Havalimanı yolunda gerçekleştirilen EPS dolgusunun tasarım kesiti [7] 16

Şekil 1.18 Patlamaya maruz kalan bir yeraltı yapısının şematik gösterimi [15] . 16
Şekil 1.19 Deney sisteminin kurulum aşamaları [15] 17
Şekil 1.20 Basınç azaltma sisteminin şematik diyagramı [15] 17
Şekil 1.21 Gömülü yapıları düşey yüklerden korumanın genel yöntemleri: a) gömülü yapı üzerine yerleştirilen hafif dolgu malzemesi, b) yapay hendek yönteminde boru üzerine yerleştirilmiş sıkışabilir hafif dolgu malzemesi, c) kazı içerisine yerleştirilen EPS'li koruma sistemi, d) boşluklu EPS sistemi içeren askılı kiriş sistemi [6] 19
Şekil 1.22 "Utah Transit Authority Frontrunner Commuter" ray hattı altındaki menfez sistemi üzerine inşa edilmiş EPS Geofoam dolgu (ACH Geofoam'ın izniyle, Murray, Utah) [6] 20
Şekil 1.23 NRPA tarafından önerilen tipik hendek kesiti [6] 21
Şekil 1.24 Hendek içerisine yerleştirilen EPS dolgusunun sayısal modelindeki yer değiştirme vektörlerinin kesit diyagramı [6] 21
Şekil 1.25 Utah, Salt Lake City'deki Wasatch fayı boyunca inşa edilen EPS dolgulu boru sistemi. [6] 22
Şekil 1.26 Geofoam-boru etkileşiminin ölçekli laboratuvar testi. Mavi renkli ızgara deforme olmayan blok şeklini, kırmızı renkli ızgara deformasyon sonucu oluşan blok şeklini ifade eder. [6] 23
Şekil 1.27 Kılıç ve Akınay'ın çalışmasında kullanılan deney konfigürasyonları. Boru çapları milimetre, diğer ölçüler metre cinsinden verilmiştir. [3] 24
Şekil 1.28 Boru tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerinin uygulanan yük ile ilişkisi [22] 25
Şekil 1.29 Boruda meydana gelen esnemelerin uygulanan yük ile ilişkisi: (a) Düşey esneme değerleri, (b) Yatay esneme değerleri [22] 25
Şekil 1.30 Deney sisteminin şematik gösterimi [24] 26
Şekil 1.31 Basınç kayıt yazılımı ve enstrümantasyon işlemi tamamlanmış yüksek yoğunluklu PVC boru [24] 27
Şekil 1.32 Deney sisteminin şematik gösterimi: a) EPS bulunmayan deney b) EPS'li deney [19] 28
Şekil 1.33 Deney sisteminin gerçek görüntüsü [19] 28
Şekil 1.34 Deney sisteminin şematik gösterimi [19] 29
Şekil 1.35 Farklı gerilmeler altında boru taç deplasmanı ve zemin yüzeyi oturma değerlerine EPS'nin etkisi [19] 29
Şekil 1.36 ABAQUS yazılımında oluşturulan modelin şematik gösterimi [19] . . 30
Şekil 1.37 ABAQUS yazılımında oluşturulan sayısal model [19] 31
Şekil 1.38 EPS bulunmayan durumda deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması [19] 32
Şekil 1.39 EPS'li durumda deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması [19] 32

Şekil 1.40 EPS yoğunluğundaki değişimin boru taç deplasmanı ve zemin yüzeyi oturması üzerindeki etkisi [19] 33
Şekil 1.41 Geocell ve EPS'nin birlikte kullanımının boru ve EPS deplasmanı üzerindeki etkisi [19] 34
Şekil 1.42 Geocell kullanımının yüzey oturmaları üzerindeki etkisi [19] 34
Şekil 2.1 1000 bölgeden oluşan örnek FLAC3D modeli [25] 38
Şekil 2.2 Örnek bir FLAC3D modelinin şematik gösterimi [25] 39
Şekil 2.3 Oluşturulan sayısal model için örnek kod dizinleri 42
Şekil 2.4 Kod dizinleri yöntemi ile oluşturulan örnek sayısal model 42
Şekil 2.5 Kiriş yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26] 46
Şekil 2.6 Kablo yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26] 47
Şekil 2.7 Kazık yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26] 48
Şekil 2.8 Kabuk yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26] 49
Şekil 2.9 Kavisli bir yüzey için üretilmiş örnek kabuk elemanı [26] 49
Şekil 2.10 Geogrid yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26] 50
Şekil 2.11 Geogrid-zemin arayüzey etkileşiminin şematik gösterimi [26] 50
Şekil 2.12 Astar yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26] 51
Şekil 2.13 Astar-zemin arayüzey etkileşiminin şematik gösterimi [26] 51
Şekil 3.1 Deney düzeneğinin doğu-batı doğrultusundaki şematik gösterimi ve borusuz ve referans deneyler için enstrümantasyon planı [1] 53
Şekil 3.2 Deney düzeneğinin güney-kuzey doğrultusundaki şematik gösterimi ve borusuz ve referans deneyler için enstrümantasyon planı [1] . . . 54
Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan HDPE boruyu ait temsili boykesit görünümü [1] 55
Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan HDPE boruya ait duvar kesiti [1] 55
Şekil 3.5 Deney zeminine ait dane çapı dağılım eğrisi [1] 56
Şekil 3.6 EPS10 numunesi için eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [1] . . 57
Şekil 3.7 EPS15 numunesi için eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [1] . . 58
Şekil 3.8 İkinci aşama deneylerde uygulanan enstrümantasyon planı (doğu-batı doğrultusu) [1] 59
Şekil 3.9 İkinci aşama deneylerde uygulanan enstrümantasyon planı (güney-kuzey doğrultusu) [1] 59
Şekil 3.10 Boru içerisine yerleştirilen potansiyometrik yer değiştirme sensörleri [1] 60
Şekil 3.11 Geometrik modelde yer alan alt kum ve üst kum katmanları 61
Şekil 3.12 FLAC3D borusuz modelinde yer alan oturma ve gerilme noktalarının konumları 63
Şekil 3.13 Borusuz deney analizlerinde elastik kum modeli ile elde edilen oturma sonuçları 64

Şekil 3.14 Borusuz deney analizlerinde elastik kum modeli ile elde edilen gerilme sonuçları 64
Şekil 3.15 Borusuz deney analizlerinde CY kum modeli ile elde edilen oturma sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması [1] 65
Şekil 3.16 Borusuz deney analizlerinde CY kum modeli ile elde edilen gerilme sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması [1] 66
Şekil 3.17 Revize edilen mesh üzerinden elde edilen oturma sonuçları 68
Şekil 3.18 Revize edilen mesh üzerinden elde edilen gerilme sonuçları 68
Şekil 3.19 FLAC3D yazılımında üretilen referans deneye ait kum zemin modeli 69
Şekil 3.20 FLAC3D yazılımında üretilen boru modeli 70
Şekil 3.21 FLAC3D yazılımında üretilen referans model üzerindeki basınç ve oturma ölçer cihazların konumları 71
Şekil 3.22 FLAC3D yazılımında oluşturulan EPS-1 konfigürasyonuna ait sayısal model 74
Şekil 3.23 FLAC3D yazılımında oluşturulan EPS-5 konfigürasyonuna ait sayısal model 75
Şekil 3.24 FLAC3D yazılımında oluşturulan PRM-1 parametrik analizine ait sayısal model 75
Şekil 4.1 S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması . . . 77
Şekil 4.2 S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması . . . 78
Şekil 4.3 P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması . . . 78
Şekil 4.4 P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması . . . 79
Şekil 4.5 P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması . . . 79
Şekil 4.6 P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması . . . 79
Şekil 4.7 P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması . . . 80
Şekil 4.8 Referans deney analizlerinde boru yan seviyesinde (S1) elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 81
Şekil 4.9 Referans deney analizlerinde boru taban seviyesinde (S3) elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 81
Şekil 4.10 Referans deney analizleri sonucunda boru taç seviyesinde (P1) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 82
Şekil 4.11 Referans deney analizleri sonucunda boru taban seviyesinde (P2) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 82
Şekil 4.12 Referans deney analizleri sonucunda boru yan duvarında (P3) elde edilen yanal gerilme değerlerinin karşılaştırması 83
Şekil 4.13 Referans deney analizleri sonucunda boru taç seviyesinin 35 cm açığında (P5) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 84
Şekil 4.14 Referans deney analizleri sonucunda boru taban seviyesinin 35 cm açığında (P7) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 84

Şekil 4.15 Referans deney analizleri sonucunda düşey (Δ Y) ve yatay (Δ X) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması . . . 85
Şekil 4.16 EPS-1 deney analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 87
Şekil 4.17 EPS-1 deney analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 87
Şekil 4.18 EPS-1 deney analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 88
Şekil 4.19 EPS-1 deney analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 88
Şekil 4.20 EPS-1 deney analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 89
Şekil 4.21 EPS-1 deney analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 89
Şekil 4.22 EPS-1 deney analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması 90
Şekil 4.23 EPS-1 deney analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve düşey (ΔY) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması . . . 91
Şekil 4.24 EPS-5 deney analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 92
Şekil 4.25 EPS-5 deney analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 92
Şekil 4.26 EPS-5 deney analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 93
Şekil 4.27 EPS-5 deney analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 94
Şekil 4.28 EPS-5 deney analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 94
Şekil 4.29 EPS-5 deney analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 95
Şekil 4.30 EPS-5 deney analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 95
Şekil 4.31 EPS-5 deney analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve düşey (ΔY) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması . . . 96
Şekil 4.32 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 97
Şekil 4.33 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 98

Şekil 4.34 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 99
Şekil 4.35 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 99
Şekil 4.36 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 100
Şekil 4.37 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 100
Şekil 4.38 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 101
Şekil 4.39 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve düşey (ΔY) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması . . . 102
Şekil 4.40 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 103
Şekil 4.41 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması 104
Şekil 4.42 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 105
Şekil 4.43 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 105
Şekil 4.44 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 106
Şekil 4.45 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 107
Şekil 4.46 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması 107
Şekil 4.47 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve (ΔY) düşey doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması . . . 108
Şekil 4.48 Düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin değişimini gösteren örnek grafik üzerinden açıklamalar [3] 110
Şekil 4.49 Gerçekleştirilen sayısal analizlere ait düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin değişimi 110
Şekil 5.1 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru yanında meydana gelen oturmaların karşılaştırılması 113
Şekil 5.2 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tabanında meydana gelen oturmaların karşılaştırılması 114
Şekil 5.3 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tacında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması 115

Şekil 5.4 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tabanında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması 116
Şekil 5.5 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru yan duvarında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması 117
Şekil 5.6 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru taç seviyesinde boru merkezinden 35 uzakta meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması 118
Şekil 5.7 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru taban seviyesinde boru merkezinden 35 uzakta meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması 119
Şekil 5.8 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tabanında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması 120

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 EPS Geofoam malzemesinin mekanik özellikleri [8] 5
Tablo 1.2 ABAQUS Sayısal modelinde kullanılan malzeme parametreleri [19] 31
Tablo 3.1 Deney zemini indeks özellikleri [1] 56
Tablo 3.2 Serbest basınç deneylerinde kullanılan EPS malzeme özellikleri [1] 57
Tablo 3.3 Kum zemine ait malzeme parametreleri 62
Tablo 3.4 Plastic-Hardening model zemin parametrelerinin kalibrasyonunda gerçekleştirilen farklı parametre kombinasyonları 67
Tablo 3.5 Revize edilen yeni sayısal modelde kullanılan PH modele ait kum parametreleri 67
Tablo 3.6 Boru duvarına ait malzeme parametreleri 71
Tablo 3.7 Referans Deney analizleri kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara ait malzeme parametreleri 73
Tablo 3.8 EPS için üç doğrusal parçalı elastik malzeme özellikleri 74
Tablo 3.9 ML90 kumlu silt zeminine ait malzeme parametreleri [27] 76

ÖZET

GÖMÜLÜ BORU ETRAFINDA YUMUŞAK BÖLGE UYGULAMASININ SAYISAL ANALİZLER İLE İNCELENMESİ

İbrahim Furkan BEKTAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Havvanur KILIÇ
Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK

Çeşitli kullanım amaçları için farklı özelliklerde tasarlanan gömülü boru uygulamalarında yakın döneme kadar rijit betonarme borular kullanılmıştır. Ancak gömülü rijit borular, içerisinde bulunduğu zemin ile bütünlük oluşturamamakta, düşey doğrultulu geostatik yüklerin tamamını boru kesit mukavemeti ile taşımakta ve zeminde oluşan negatif kemerlenmeden dolayı üzerindeki mevcut geostatik yükten daha fazlasına maruz kalmaktadır.

Son dönemde yaygınlaşmaya başlayan gömülü esnek boru uygulamaları ile pozitif zemin kemerlenmesi oluşturularak gömülü boru sistemi üzerindeki geostatik yüklerin azaltılması sağlanmaktadır. Bir HDPE esnek boru sistemi üzerindeki geostatik yük nedeniyle boru düşey doğrultuda esnediğinde zemin ortamında meydana gelen farklı oturmalar "pozitif zemin kemerlenmesi" durumunun oluşmasına neden olmaktadır. "Pozitif zemin kemerlenmesi" olarak adlandırılan bu fiziksel olgunun oluşum prensibinden hareketle, gömülü bir esnek boru sistemi çevresinde uygulanacak sıkışabilir yatak katmanının (EPS Geofoam) zeminde meydana gelen pozitif zemin kemerlenmesini artıracağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, Akınay [1] tarafından doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen gerçek ölçekli laboratuvar deneyleri arasından seçilen belirli deney konfigürasyonları FLAC3D yazılımı aracılığıyla sayısal ortamda modellenmiş ve bu modellere ait parametrik kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir. FLAC3D yazılımı

aracılığıyla modellenerek kalibre edilen sistemler üzerinden çeşitli parametrik analizler gerçekleştirilerek, boru çevresinde farklı geometrilerde uygulanan yumuşak bölgenin ve geri dolgu malzemesi özelliklerinde meydana gelen değişimlerin boru sistemini içerisinde barındıran zemin ortamında meydana gelecek pozitif zemin kemerlenmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HDPE boru, EPS Geofoam, pozitif kemerlenme, FLAC3D, boru-zemin etkileşimi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SOFT ZONE APPLICATION AROUND BURIED PIPE BY NUMERICAL ANALYSIS

İbrahim Furkan BEKTAŞ

Civil Engineering
Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Havvanur KILIÇ
Co-advisor: Assist. Prof. Dr. Murat Ergenekon SELÇUK

Rigid concrete pipes have been used until recently in buried pipe applications designed with different properties for various utilizations. However, buried rigid pipes cannot form integrity with the ground, they carries all vertical geostatic loads by sectional pipe strength and are exposed to more than the existing geostatic load because of the negative arching on the ground which is above the rigid pipe.

Having become widespread recently, with the buried flexible pipe applications, positive arching is created and the geostatic loads on the buried pipe system are reduced. When the pipe flexes in the vertical direction due to the geostatic load on HDPE flexible pipe system, different settlements in the soil cause "positive arching". Based on the formation principle of this physical phenomenon called "positive arching", it is thought that a compressible bed layer (EPS Geofoam), which is applied around a buried flexible pipe system, will increase positive soil arching in the ground.

Within the scope of this thesis, certain experimental configurations selected among the full scaled laboratory experiments carried out by Akınay [1] in the scope of his doctoral thesis were modeled numerically by using FLAC3D software and parametric calibrations of these models were performed. Various parametric analyzes were carried out on the systems that were modeled and calibrated through the FLAC3D software, and the effects of the soft zone applied in different geometries around the pipe and the changes in the properties of the backfill material on the positive arching that will occur in the soil environment containing the pipe system were investigated.

Keywords: HDPE pipe, EPS Geofoam, positive arching, FLAC3D, pipe-soil interaction

1
GİRİŞ

Tarım devrimi ile birlikte yerleşik hayata geçen toplumlarda, insan-doğa ilişkisinin zorunlu bir sonucu olarak çeşitli niteliklerdeki boru ve boru hatlarına duyulan ihtiyaç tarih boyunca artarak devam etmiştir. Arkeolojik bulgular, Antik Dönem uygarlıklarında (M.Ö.2000) özellikle su iletim hatları oluşturmak amacıyla pişirilmiş kil borular kullanıldığını, ilerleyen dönemlerde (M.Ö.500) ilk kurşun boruların kullanılmaya başlandığını göstermektedir. Dolayısıyla tarihin ilk dönemlerinden günümüze farklı materyallerden üretilen, farklı mühendislik özelliklerine sahip boru ve iletim sistemleri kullanılmaktadır [2]. Toplumların şehirleşme kabiliyetine paralel şekilde artan toplumsal ihtiyaçlarına bağlı olarak gelişen mühendislik yeteneklerinin yanı sıra boru hatlarının çeşitli ihtiyaçlara cevap verecek şekilde yeniden tasarlanması ihtiyacı, tarihsel süreçte söz konusu iletim hatlarının mühendislik özellikleri itibariyle daha fazla gelişmesinin önünü açmıştır. Günümüzde şehirlere içme suyu sağlanması, yağmur suyu ve atık suların toplanması ve tahliyesi, petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynaklı enerji üretim hammaddelerinin ulusal ve uluslararası ölçekte taşınması vb. gibi farklı alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan boru hatlarının yer altında gömülü iletim sistemleri olarak tasarlanması ise günümüzde temel bir gerekliliktir. Söz konusu alanlarda ortaya çıkan ihtiyaçların karşılanmasına yönelik olarak tasarlanan boru hatları bazı durumlarda farklı mühendislik özelliklerine sahip zemin ortamlarına yerleştirilirken bazı koşullarda deniz ya da okyanus diplerine yerleştirilecek şekilde tasarlanmakta; coğrafi ortamın koşullarına bağlı olarak fay hatları ya da ezik zonlar gibi mühendislik özellikleri itibariyle her zaman stabil olmayan yüksek riskli bölgelerde tasarlanması gerekebilmektedir. Dolayısıyla gömülü boruların mühendislik süreçleri çerçevesinde belirlenen hizmet ömrü süresince güvenli bir şekilde üretim amacına uygun olarak çalışması inşaat mühendisliği disiplininin önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Gömülü boru hatlarının mühendislik tasarımı sürecinde kabaca 70-80 yıl öncesine kadar beton ve çelik boru gibi rijit elemanlar kullanılırken; teknolojinin gelişmesiyle birlikte ekonomiklik ve uygulanabilirlik açısından rijit sistemlere göre çeşitli

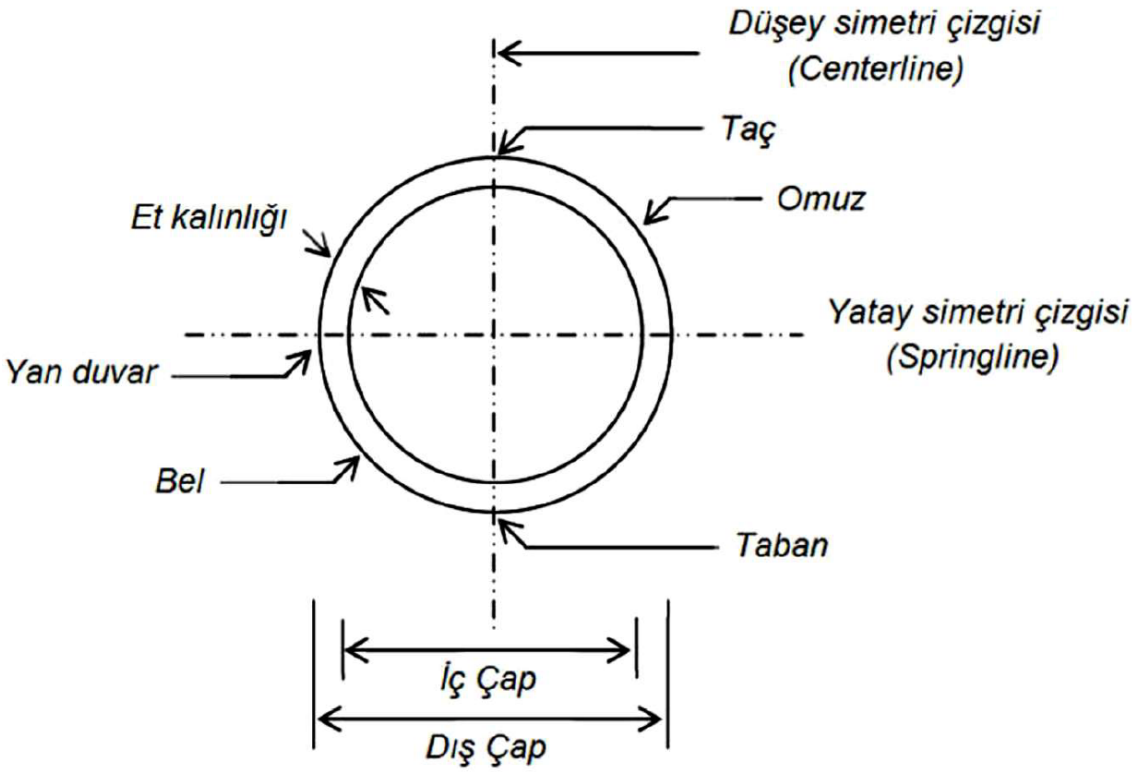
avantajlara sahip olan esnek boruların kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Boru-zemin etkileşimi bağlamında rijit borular ile esnek boruları birbirinden ayıran en temel özellik ise, rijit borular içerisinde bulunduğu zemin ortamından bağımsız çalışarak üzerindeki yükün tamamını boru kesit mukavemeti ile taşırken, esnek borularda boru ile zeminin birlikte bir bütün gibi davranmasıdır. Son dönemde yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları, düşey doğrultuda gerilme etkisine maruz kalan esnek bir borunun, zeminde meydana gelen kemerlenme davranışı sayesinde üzerindeki düşey gerilmelerin bir kısmını içerisinde bulunduğu zemin ortamına yanal gerilmeler şeklinde aktardığını ortaya koymuştur.

1.1 Literatür Özeti

Zemin içerisine farklı tekniklerle yerleştirilebilen gömülü boru sistemlerinin, içerisinde bulunduğu zemin ile etkileşim biçimi ve hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı içsel ve dışsal kaynaklı yükler altındaki davranışını tanımlamak için araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmış ve gömülü borular için davranış teorileri üretilmiştir. Gömülü boruların düşey yük etkisindeki davranışının incelendiği ilk modern teori Janssen (1895)'in ortaya koyduğu "Silo Teorisi" olarak karşımıza çıkmaktadır.
19. yy' ın sonlarında üretilen bu teoride gömülü rijit borular üzerindeki düşey yüklerin boru elemanı üzerinde oluşturduğu düşey ve yatay gerilmelerin ilişkisi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar 20. yy' ın erken dönemlerinde de devam etmiştir. Marston (1913) tarafından Iowa Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar gömülü rijit boruların zemin ile etkileşiminin incelendiği önemli çalışmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Marston (1913), çalışmasında gömülü rijit boruların düşey yükler altındaki davranış biçimini "Marston Yük Teorisi" olarak anılan matematiksel model ile ifade etmiştir [1]. İlerleyen süreçte boru-zemin ilişkisi çalışmaları kapsamında rijit borular yerine esnek boruların davranışını inceleyen araştırmalar da çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. 1941 yılında yine Iowa Üniversitesi'nde Spangler tarafından gerçekleştirilen bir dizi deneysel çalışma sonrasında "Iowa Eşitliği" olarak adlandırılan bir formülasyon geliştirilmiş, bu eşitlik aracılığıyla boruya etkiyen pasif itkilerin hesaplanmasının zor olduğu gerekçesiyle Watkins (1958) tarafından "Geliştirilmiş Iowa Eşitliği" ortaya konmuştur [1]. Gömülü esnek boruların davranışı üzerine Howard (1977), Nielsen (1967), Allgood (1972), GreenWood & Lang (1990) ve McGarth (1998) gibi araştırmacılar çalışmalar yapmış ve sonuç olarak çeşitli yaklaşımlar ortaya koymuşlardır [1].

1.1.1 Borular ile İlgili Genel Bilgiler

Mühendislik terminolojisinde, boruların mühendislik ve davranış özelliklerinin net ve anlaşılır bir şekilde ifade edilebilmesi amacıyla boru kesitindeki belirli nokta ya da düzlemleri ifade edebilmek amacıyla bir takım terimler kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Boru kesiti üzerinde kullanılan ifadeler [3]

Şekil 1.1'de gösterildiği üzere, boru cidar kalınlığı "et kalınlığı", boru kesiti düşey simetri çizgisi (centerline) üzerindeki tepe noktası "taç (crown)", taban noktası "taban (invert)", boru kesiti yatay simetri çizgisi (springline) üzerinde kalan kısım "omuz (shoulder)" ve yatay simetri çizgisinin altında kalan kısım da "bel(haunch)" olarak ifade edilmektedir.

1.1.2 Zeminlerde Kemerlenme Davranışı

Bir zemin ortamında birbirine komşu farklı zemin kütleleri birbirinden farklı davranışlar gösterebilmektedir. Zeminlerde kemerlenme davranışı bu tür bir davranış farklılığını ifade etmek için kullanılan bir kavramdır. Komşu zemin kütleleri arasındaki bu davranış farklılığı bir zemin ortamına yerleştirilen ve rijitliği mevcut zeminin rijitliğinden farklı olan boru gibi yapısal elemanlar nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Kemerlenme davranışı zeminlerde yaygın görülen bir davranış olup, birbirine komşu farklı zemin hacimlerinden biri düşeyde herhangi bir hareket yapmazken; diğer bir zemin hacmi düşey doğrultuda hareket ettiğinde ortaya çıkmaktadır. Komşu zemin

hacimlerinin birbirlerine göre bu rölatif hareketi, hareketli ve sabit zemin kütleleri arasında oluşan sürtünme kuvvetleri etkisiyle oluşan yük aktarımının gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte zemin içerisine yerleştirilen yapısal elemanın rijitlik değeri zeminin rijitlik değerinden büyükse oluşan kemerlenme durumu "negatif kemerlenme", yapısal elemanın rijitlik değeri zeminin rijitlik değerinden daha küçükse "pozitif kemerlenme" durumu ortaya çıkar. Kemerlenme ile ilgili yaygın kabul gören başlıca teoriler ise Janssen Silo Teorisi (Janssen,1985), Marston Yük Teorisi (Marston & Anderson,1913) ve Terzaghi Kemerlenme Teorisi (Terzaghi,1943)'dir[3].

1.1.3 EPS Geofoam Malzemenin Özellikleri ve Davranış Biçimi

EPS Geofoam ilk olarak Almanya'da BASF tarafından 1950 yılında icat edilmiştir [4]. Yaklaşık 70 yıllık kullanım geçmişi olan EPS (Expanded Polystyrene) Geofoam petrol kaynaklı hammaddelerden çeşitli kimyasal yöntemler kullanılarak imal edilmekte olan polistiren granüllerinin kalıp makinelerinde eritilerek birleştirilmesiyle oluşturulan bir geri dolgu malzemesidir [3]. EPS doğal yapısı itibariyle mükemmel derecede hafif olmasının yanı sıra sert, suya dayanıklı ve su geçirmez, biyolojik ayrışmaya karşı dirençli ve çevre dostu bir malzeme olması dolayısıyla inşaat sektöründe kendisine oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır [5]. EPS Geofoam, karayolu üstyapıları altındaki zayıf zeminlerin iyileştirilmesi uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra yol genişletme çalışmalarında, köprü ayaklarının inşa edileceği zeminlerde, demiryolu hatlarının inşa sürecinde, boru ve hendek gibi gömülü yapı sistemlerinin üzerindeki düşey yükleri azaltmak amacıyla, peyzaj ve çevre düzenleme çalışmalarında, şev stabilitesini sağlamak için gerçekleştirilen iyileştirme uygulamalarında, stadyum ve tiyatro binaları gibi geniş temel alanına sahip yapıların temel zeminlerinde, rıhtım, dalgakıran gibi deniz yapılarının inşasında ve diğer çeşitli özel uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Ortalama bir zemin yoğunluğunun yaklaşık olarak %1'i mertebesinde malzeme yoğunluğuna sahip olan EPS Geofoam malzemesi uygulama aşamalarında da herhangi özel bir ekipmana ihtiyaç duyulmaması, inşasının basit ve pratik olması ve basit insan gücüyle inşa edilebilir olması dolayısıyla farklı ortam ve koşullar altında rahatlıkla kullanılabilmektedir [5]. İsimlendirilmesi uluslararası standartlarda ASTM D6817/D6817M-13a standartlarına göre yapılmakta olan EPS, malzeme yoğunluğuna veya %10 deformasyon durumundaki basınç gerilmesinin kPa cinsinden değerine göre isimlendirilmektedir (EPS15, EPS20, EPS30 gibi) [7].

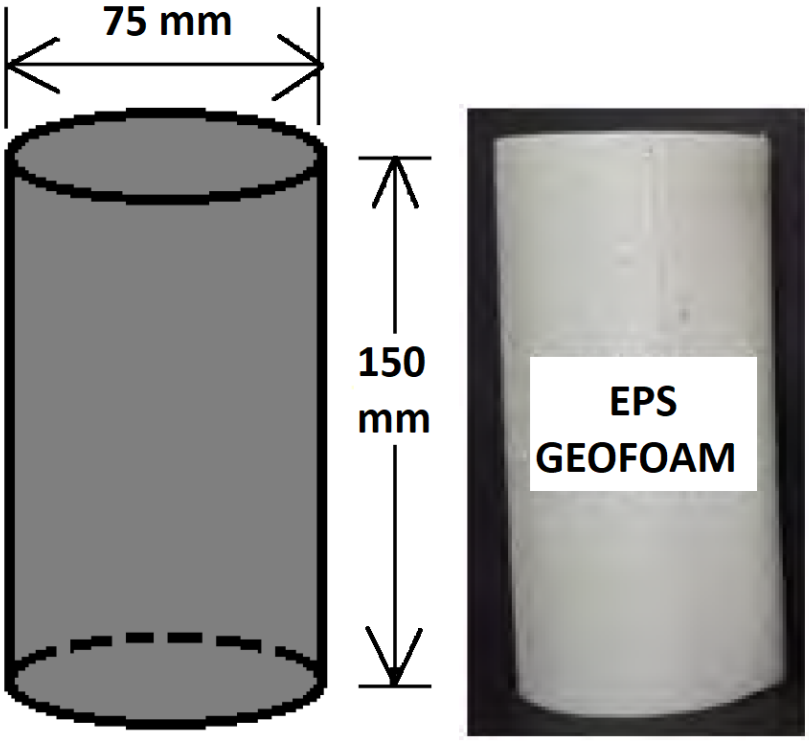
Son 10 yıllık süreçte çeşitli araştırmacılar tarafından ilgi odağı olan EPS malzemesinin, farklı yükleme koşulları altındaki davranışı, malzemenin çekme dayanımı ve elastisite modülü, kayma direnci, tek eksenli basınç dayanımı, köpük malzemesinin su emme

kapasitesi gibi geniş çerçevedeki davranış ilişkileri incelenmektedir. Sırasıyla 0.15 kN/m^3, 0.20 kN/m^3, 0.22 kN/m^3, 0.30 kN/m^3 yoğunluklara sahip silindirik EPS numuneleri üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyleri ile farklı yoğunluklardaki EPS malzemesinin kesme dayanımı parametreleri belirlenmiştir (Tablo 1.1) [8].

Tablo 1.1 EPS Geofoam malzemesinin mekanik özellikleri [8]

Geofoam Yoğunluğu (kN/m^3)	**Basınç Dayanımı (kPa)**	**Başlangıç Modülü (kPa)**	**Çekme Dayanımı (kPa)**	**Eğilme Mukavemeti (kPa)**	**Kesme Dayanımı (kPa)**
0.15	61.95	2480.76	154.59	149.9	83.65
0.20	91.39	4070.55	216.40	211.3	94.37
0.22	110.53	5508.16	244.54	240.6	121.57
0.30	146.80	7550.28	407.78	277.0	139.27

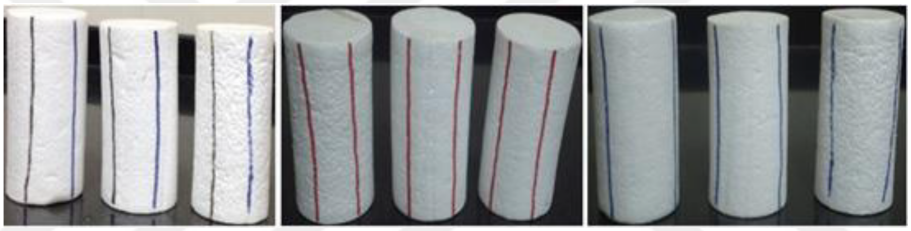
Gerçekleştirilen bu çalışmada deneyler sırasında yüklemeye, %15 eksenel şekil değiştirmeye kadar devam edilmiş ve deneyler 50, 100 ve 150 kPa eksenel yükler altında tekrarlanmıştır (Şekil 1.2, Şekil 1.3 ve Şekil 1.4).



Şekil 1.2 Üç eksenli basınç deneyleri için EPS numunesi [8]



Şekil 1.3 EPS numunesinin üç eksenli basınç testi [8]



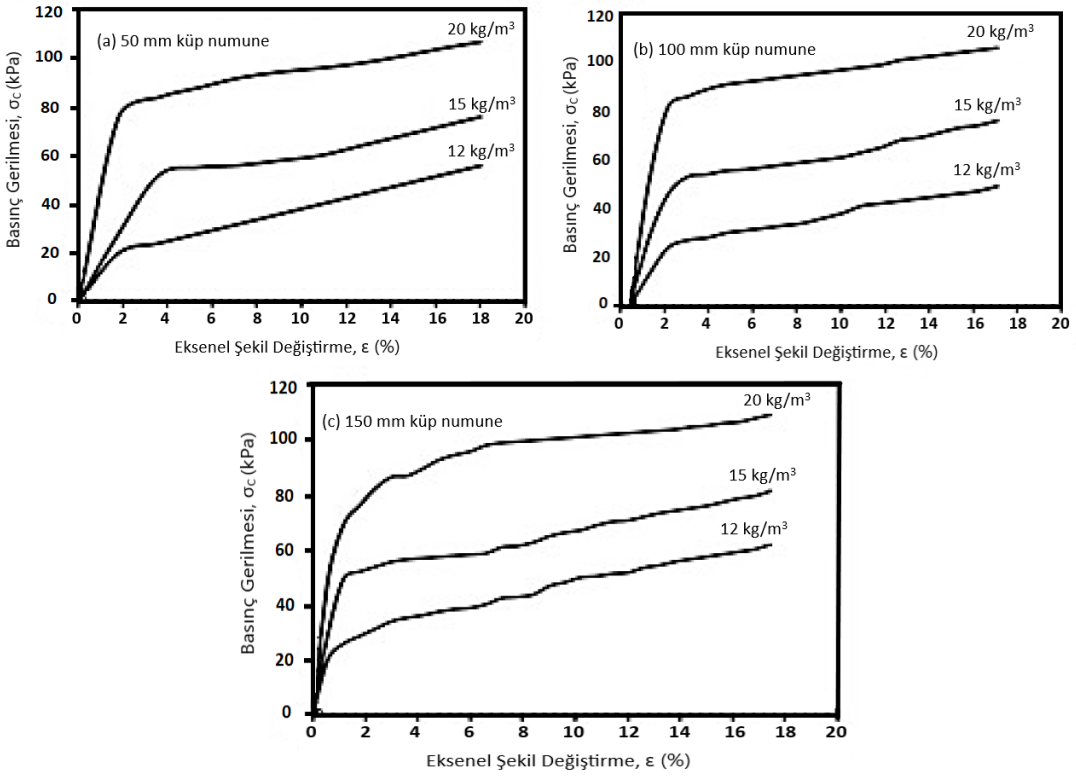
Şekil 1.4 Üç eksenli basınç deneyleri sonucu EPS numunelerinin deformasyon durumları [8]

Elde edilen sonuçlarda EPS Geofoam malzemenin yoğunluğundaki artışın, malzemenin kohezyon ve içsel sürtünme açılarını da artırdığı ve yoğunluktaki artışın pik deviatorik gerilme değerini de artırdığı saptanmıştır.

EPS Geofoam davranışını incelemek üzere Birhan ve Negussey (2014) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise EPS malzeme davranışının malzeme yoğunluğu, uygulanan şekil değiştirme oranı ve çevre basıncına ek olarak sıcaklıktan da etkilendiği sonucuna varılmıştır [5].

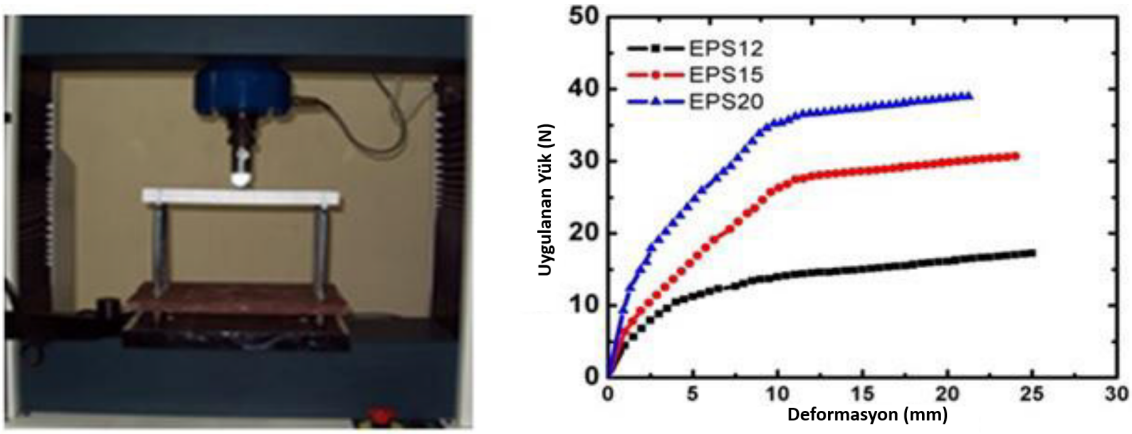
Beju ve Mandal [5] tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise farklı yoğunluklara sahip EPS Geofoam malzeme davranışının su emme potansiyeli, basınç dayanımı ve eğilme mukavemeti çeşitli laboratuvar testleriyle analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneylerde 12 kN/m^3, 15 kN/m^3 ve 20 kN/m^3 yoğunluklara sahip silindirik, dikdörtgen prizma, kübik formlu ve farklı boyutlardaki numuneler kullanılmış ve laboratuvar testleri ASTM D7557-09 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

ASTM C272-12 test metodu standartlarına göre ve 75 mm x 75 mm x 13 mm boyutlarındaki numuneler kullanılarak gerçekleştirilen su emme testi sonuçlarına göre EPS malzemesinin su emme kapasitesi 12 kN/m^3, 15 kN/m^3 ve 20 kN/m^3 yoğunluklardaki numuneler için sırasıyla %4,41, %3,6 ve %2,88 değerleri olarak bulunmuştur. Farklı yoğunluklara ve farklı kesit ölçülerine sahip kübik numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı testlerinde EPS malzemesinin basınç dayanımının, malzeme yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen yükleme testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde malzeme yoğunluğu arttıkça numunelerin daha yüksek gerilme değerlerine kadar elastik deformasyonlar yapabildikleri ve dolayısıyla malzeme yoğunluğu arttıkça akma sınırına daha büyük gerilmelerde ulaşıldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 EPS Geofoam'ın basınç yükü altında farklı yoğunluklar için gerilme-şekil değiştirme davranışı [5]

ASTM C203-12 standartlarında ve 300 mm x 100 mm x 25 mm boyutlarındaki numune ile gerçekleştirilen eğilme mukavemeti testlerinde ise yoğunluk arttıkça malzeme rijitliği de arttığından malzemenin eğilme mukavemeti değerinin azaldığı görülmüştür (Şekil 1.6).

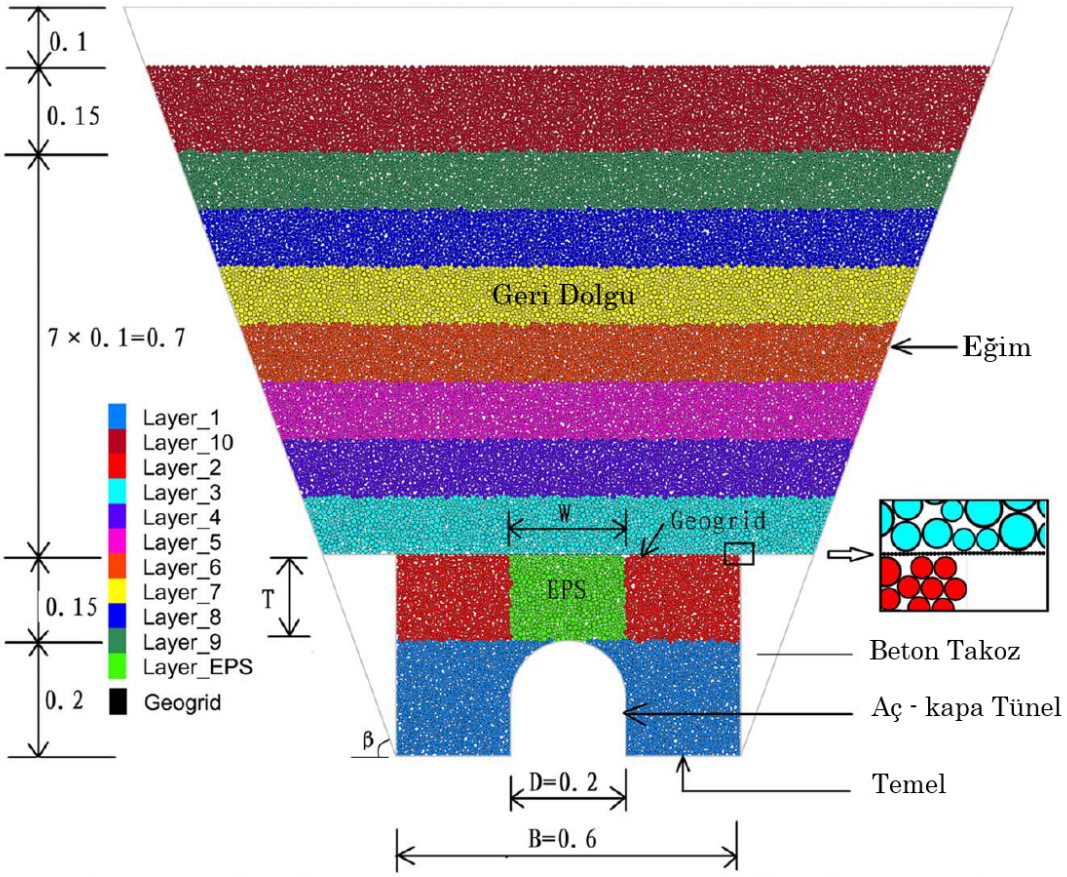


Şekil 1.6 EPS Geofoam'ın eğilme mukavemeti testi ve yükleme altındaki deformasyon davranışı [5]

Düşey gerilmeler etkisindeki rijit yeraltı yapısal sistemlerinde (boru hatları, menfez, aç-kapa tüneller vb.), belli bir derinlikte inşa edilen sistemin geri dolgusu sonrasında ortaya çıkan negatif kemerlenme durumu dolayısıyla, söz konusu rijit yapıya etkiyen ağırlık, yapı üzerindeki geri dolgu malzemesinin ağırlığından daha büyük olmaktadır [9]. Bu nedenle inşa edilecek bu tür sistemler üzerindeki yükü azaltmak için bu etkiyi tersine çevirecek özelliklerde yapı malzemelerine inşa sürecinde ihtiyaç duyulur. EPS ise yapısal özelliğinin oldukça uygun olması nedeniyle zeminlerde negatif kemerlenme durumunu ortadan kaldırmak ve pozitif kemerlenme miktarını yüksek düzeylere çıkarmak için kullanmaya elverişli bir geri dolgu malzemesidir [10]. İçerisine yerleştirilen zemine kıyasla çok düşük rijitlik değerlerine sahip EPS Geofoam, yükleme koşulları altında istenen elasto-plastik davranışı iyi derecede karşılar [11]. EPS Geofoam malzemesinin zeminlerdeki kemerlenme davranışı üzerine etkilerini incelemek için yapılan bir çalışmada [12] yüksek dolgulu aç -kapa tünellerde (high-filled cut-and-cover tunnel) EPS ve EPS-geogrid kombinasyonunun zemin kemerlenmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yüksek dolgulu aç-kapa tüneller engebeli arazi yapılarındaki vadilerin dolgu yapılarak ıslah edilmesi yöntemine dayanan bir tünel inşa tekniğidir. Çin'in kuzeybatı bölgesinde bulunan *Loess Plateau* bölgesindeki yüksek hızlı tren hattı altında yer alan bir aç-kapa tünel kesiti üzerindeki yük aktarım mekanizması ayrık elemanlar yöntemi (Discrete-element method, DEM) (Cundall and Strack, 1979) prensiplerine göre analiz yapan PFC2D sayısal analiz yazılımıyla modellenerek incelenmiştir.

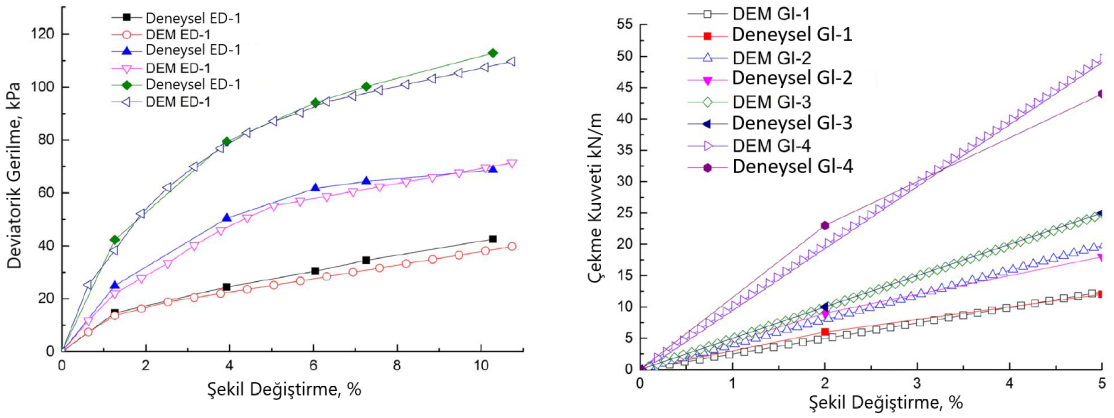
Yapılan parametrik çalışmalarda aç-kapa tünelin üzerine yalnızca EPS katmanı ve EPS ve geogrid olmak üzere iki farklı kombinasyon uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal analiz aşamaları ise S1, S2, S3, S4 olmak üzere dört farklı aşamadan oluşmaktadır. S1 durumu modelde EPS ya da geogrid bulunmaması durumunu, S2 modele sadece EPS malzemesinin eklendiği durumu, S3 EPS ile birlikte geogridin de modelde yer aldığı durumu ve S4 ise modelde geogridin

etkinliğini artırmak için EPS ve geogride ek olarak modelin her iki yanına beton kamaların eklendiği durumu ifade etmektedir [12] (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 Yüksek dolgulu bir aç-kapa tünelde yük azaltmak için oluşturulan ayrık elemanlar modeli [12]

Gerçekleştirilen sayısal analizler neticesinde elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 1.8).



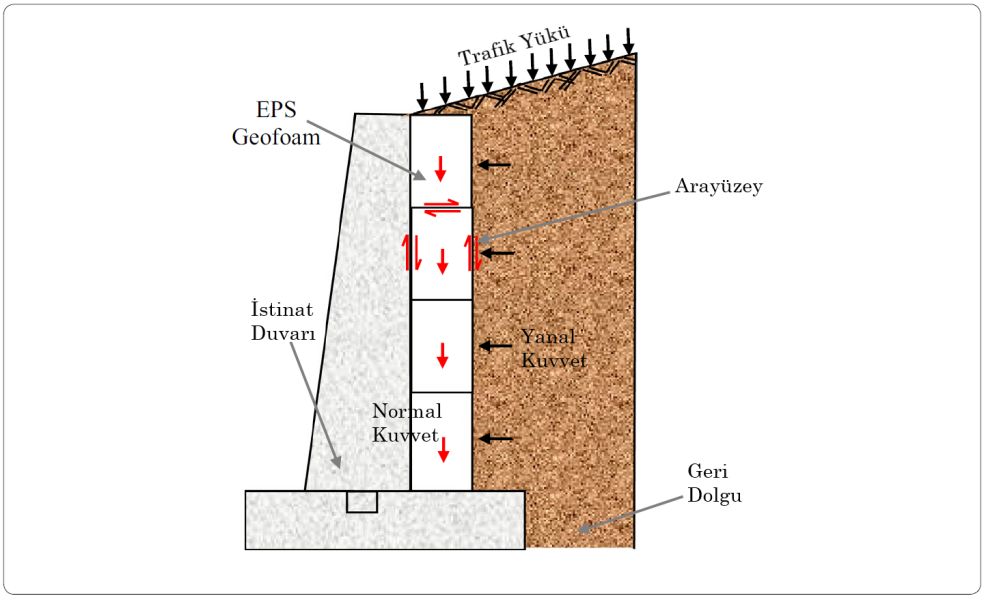
Şekil 1.8 Basınç testi (solda) ve çekme testi (sağda) sonuçlarının ayrık elemanlar modeli-gerçek deney sonuçları karşılaştırması [12]

Çalışmadan elde edilen nihai sonuçlara göre;

1. Ortamda EPS ve “EPS + geogrid” kombinasyonu varlıklarının pozitif kemerlenme sayesinde düşey gerilmelerin aktarım mekanizmasının yönünü değiştirerek tünelin tepe noktasına etki eden gerilme değerini azalttığı,
2. Eğimli yüzeylerin her iki tarafına beton kamalar yerleştirildiğinde, artan pozitif kemerlenmenin yanı sıra geogrid ve beton kamalar arasındaki etkileşim dolayısıyla düşey yüklerin en uygun şekilde beton kamalara aktarılarak tünele etkiyen yüklerin önemli ölçüde azaldığı,

sonuçlarına ulaşılmıştır [12].

İnşaat uygulamalarında çeşitli gömülü yapılar, dayanma yapıları vb. gibi alanlarda yaygın kullanım alanına sahip olan EPS köpük malzemesi, hangi yapı türünde kullanılırsa kullanılsın mutlaka uzun süreli basınç etkilerine maruz kalacak şekilde yerleştirildiğinden, bu alanda EPS malzemenin çeşitli koşullar altındaki basınç dayanımının tespit edilmesine yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak EPS köpükler birçok durumda tek başına bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktan ziyade kum, PVC boru, HDPE boru, betonarme duvar gibi çeşitli yapı elemanlarıyla birlikte kullanıldığından ve basınç etkilerinin yanı sıra kayma gerilmelerine ve kesme etkilerine de maruz kalabildiğinden (Şekil 1.9), EPS malzemesinin çeşitli yapı malzemeleriyle etkileşimi sırasında ortaya çıkan ara yüzey davranışı ve malzemenin kesme etkilerine karşı direnci önem arz etmektedir [13] .



Şekil 1.9 İstinat duvarı arkasına yerleştirilen EPS bloklarının maruz kaldığı normal gerilme ve kayma gerilmeleri [13]

Bu çerçevede Sheeley ve Negussey (2000), Chrysikos vd. (2006), Padade ve Mandal (2014), Abdel-Salam ve Azzam (2016), Khan ve Meguid (2018) gibi araştırmacılar tarafından yapılan bazı deneysel çalışmalarda EPS köpüğün geomembran, geotekstil, uçucu kül, beton, PVC gibi farklı yapı malzemeleri ile olan ara yüzey etkileşimleri inceleme konusu olmuştur [13].

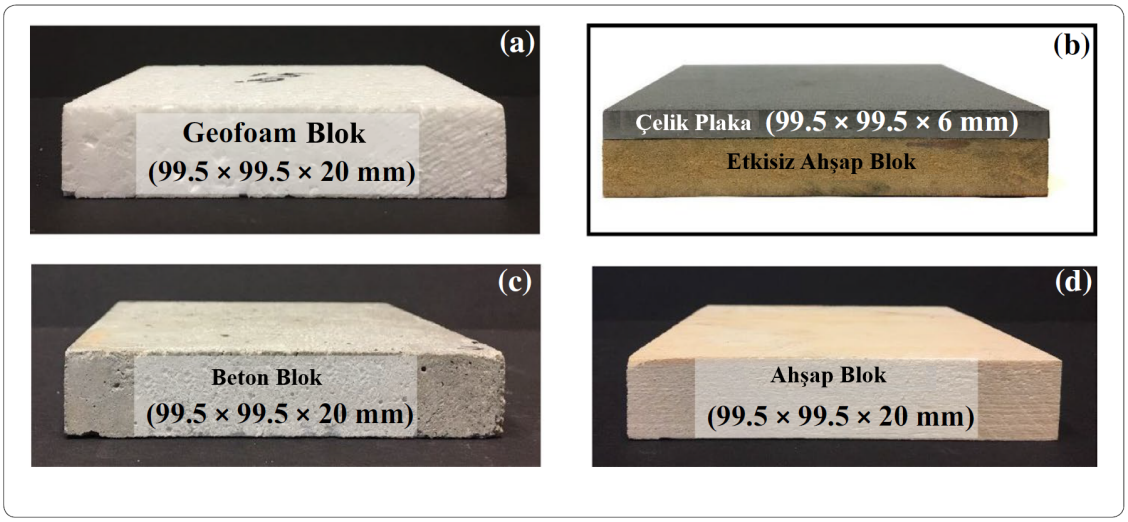
EPS sert köpük malzemesinin kesme mukavemetini belirlemek için Khan ve Meguid [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 15 kg/m^3, 22 kg/m^3 ve 35 kg/m^3 olmak üzere üç farklı yoğunluklardaki EPS numuneleri üzerinde yapılan bir dizi kesme kutusu deneyi ile numunelerin kesme dayanımının yanı sıra numunelerin kum ve PVC boru ile etkileşimleri durumundaki ara yüzey dayanımlarına dair tespitlere de yer verilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre;

1. Basit kesme kutusunda kayma gerilmelerine maruz bırakılan EPS numunelerde tam göçme (kesilme) oluşmaksızın kayma deformasyonları oluşturulmuş ve 15 kg/m^3 yoğunluğa sahip numunede 28 kPa iken 35 kg/m^3 yoğunluğa sahip numunede 56 kPa değerinde kohezyon bulunmuş ve içsel sürtünme açıları ise sırasıyla 10,5° ve 9° olarak bulunmuştur. Yani bir başka ifadeyle numune yoğunluğunun artışı kohezyon değerinde artışa, içsel sürtünme açısında ise azalmaya neden olmaktadır.

2. EPS-PVC ara yüzeyinde oluşan adezyon kuvvetleri EPS numunesinde 15 kg/m^3 ve 35 kg/m^3 yoğunluk değerlerinde sırasıyla 2 kPa ve 5 kPa olarak bulunmuştur. Ancak EPS-kum ara yüzeyinde bunun tersi bir durumla karşılaşılmış ve EPS numunesinde 15 kg/m^3'ten 35 kg/m^3 yoğunluğa adezyon değeri 12 kPa'dan 2 kPa değerine düşmüştür. Bu duruma ise düşük yoğunluklu köpük malzemesinin yüksek basınç altında kum partikülleriyle yüksek yoğunluklu köpüğe göre daha iyi tutunmasının neden olduğu değerlendirilmiştir.

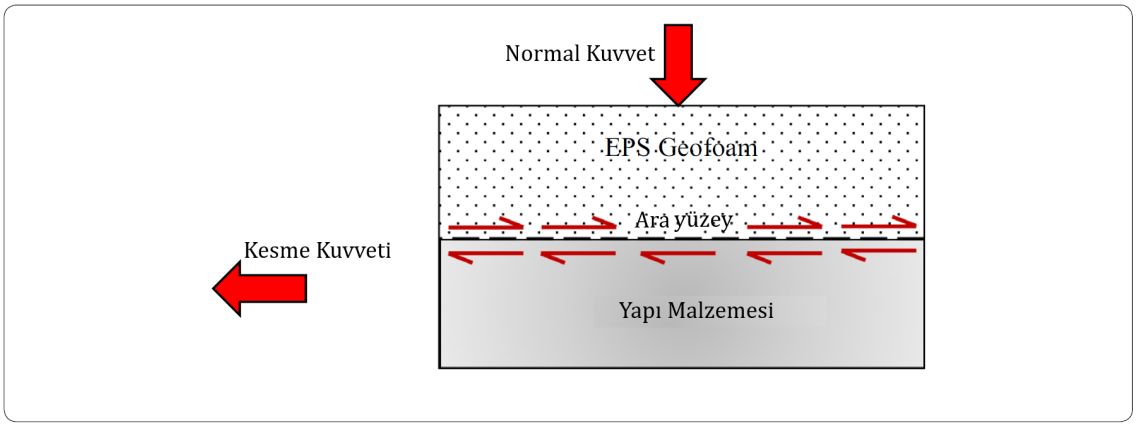
3. Yalnızca EPS numunesinin yer aldığı kesme deneyi ile ara yüzey dayanımının test edildiği deneylerin her ikisinde de benzer eğilimler gözlenmekle beraber elde edilen dayanım verilerinin EPS numunesinin kalınlığına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

EPS köpük malzemesinin farklı yapı elemanlarıyla olan ara yüzey etkileşiminin Meguid ve Khan [13] tarafından araştırıldığı çalışmada ise EPS sert köpüğün beton, ahşap ve çelik malzemelerle etkileşimi durumundaki ara yüzey karakteristiği ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Test edilen malzemeler a) Geofoam blok b) Çelik Plaka c) Beton blok d) Ahşap blok [13]

McGill Üniversitesi'nde yapılan bu çalışmada [13] 18 kPa, 36 kPa ve 54 kPa normal gerilmeleri altında sıkıştırılan 15 kg/m^3, 22 kg/m^3 ve 39 kg/m^3 yoğunluklara sahip 100 mm x 100mm x 50mm boyutlarındaki EPS numuneleri kesme kutusunda bir dizi direkt kesme deneyine tabii tutulmuş ve deney sistemi (Şekil 1.11)'de şematize edilmiştir.



Şekil 1.11 Kesme kutusu testinde kayma gerilmelerine maruz kalan tipik bir ara yüzeyin şematik gösterimi [13]

EPS blok, çelik levha, beton blok ve ahşap blok numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen 27 direkt kesme deneyinden oluşan laboratuvar deneylerinde sonuç olarak;

1. EPS sert köpük malzemesi normal ve kayma gerilmelerine maruz bırakıldığında EPS köpüğün yoğunluğunun ve uygulanan normal gerilmenin ara yüzey kayma dayanımı üzerinde önemli ölçüde etkisinin olduğu,

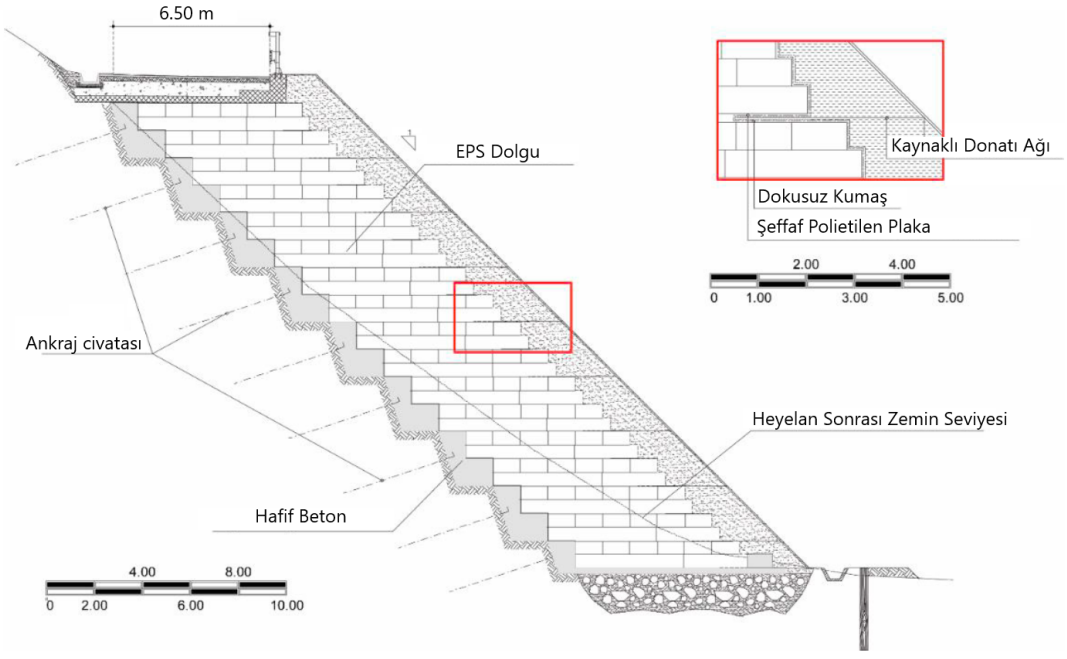
2. EPS Geofoam yoğunluğunun 15 kg/m^3'ten 39 kg/m^3'e artmasıyla EPS köpüğün çelik ahşap ve beton ile oluşturduğu ara yüzeydeki adezyonda azalma görülmesiyle birlikte adezyon değerinin betonda ahşap ve çeliğe göre daha yüksek olduğu,

3. EPS malzemesinin basınç dayanımının sadece uygulanan düşey yük ve malzeme yoğunluğuna bağlı olduğu ve beton, çelik ya da ahşap ile birlikte çalışmasının basınç dayanımı üzerine bir etkisinin olmadığı,

4. EPS malzemesinin pürüzlü yüzeyler ile kullanılmasının ara yüzey kayma dayanımını artırdığı,

sonuçlarına ulaşılmıştır [13].

Giuliani vd. [7] tarafından yapılan çalışmada ise İtalya'da EPS Geofoam malzeme kullanılarak inşa edilen çeşitli yol yapılarındaki EPS performansları değerlendirilmiş ve bu tür yapılarda EPS kullanımının avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen yapıların ilki, *Passo del Bratello* (Parma)'da SP20 kodlu karayolunun bir bölümünde meydana gelen toprak kayması sonucu göçmeye uğrayan yolun restorasyon çalışması olmuştur. 2002 yılında meydana gelen olay sonrasında şev bölgesindeki su yalıtımını ve stabilizasyonu sağlamak amacıyla 15.200 m^3 zemin malzemesi ve 1.200 m^3 donatılı zemin malzemesinin yanı sıra 6.550 m^3 EPS sert köpük kullanılmıştır (Şekil 1.12).



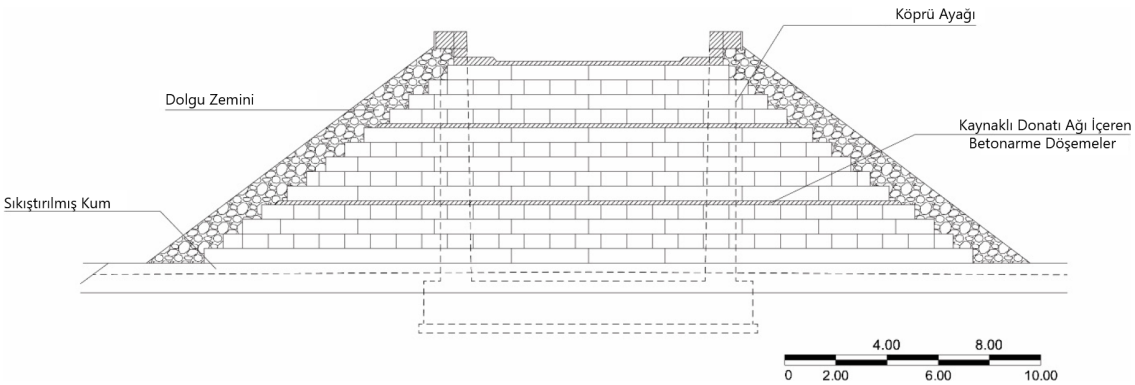
Şekil 1.12 *Passo del Bratello* (Parma)'daki EPS yol dolgusunun tasarım kesiti [7]

2019 yılında yapılan kontrollerde ise EPS ile rehabilite edilen ve üzerine yol yapılan bu şev yüzeyinin tamamen bitkiler hatta ağaçlarla kaplandığı ve ayrıca artık herhangi bir bakım - onarım çalışması gerektirmediği görülmüştür (Şekil 1.13).



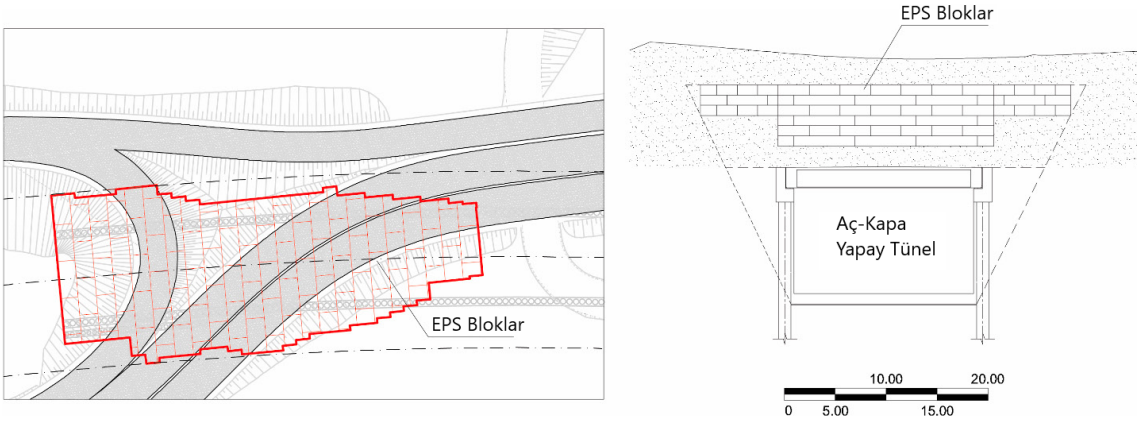
Şekil 1.13 *Passo del Bratello* (Parma)'daki EPS yol dolgusunun 2002'deki inşaat aşaması ve 2019 yılındaki durumu [7]

Çalışma kapsamında incelenen ikinci yapı Savio bölgesinde bulunan (Ravenna, İtalya) *Adriatica* Karayolu üzerindeki bir köprü temel zemininin iyileştirilmesi projesi olmuştur (Şekil 1.14).



Şekil 1.14 *Adriatica* Karayolu üzerindeki köprü temel zeminin EPS dolgu tasarım kesiti [7]

İncelenen üçüncü yapıda Roma'da bulunan *Grande Raccordo Anulare* isimli karayolunun altında bulunan bir aç-kapa tünel üzerindeki sabit yüklerin azaltılması amacıyla 2004-2005 yıllarında yapılan çalışmada, yaklaşık 14.000 m^3 EPS25 bloğu kullanılmıştır (Şekil 1.15, Şekil 1.16).

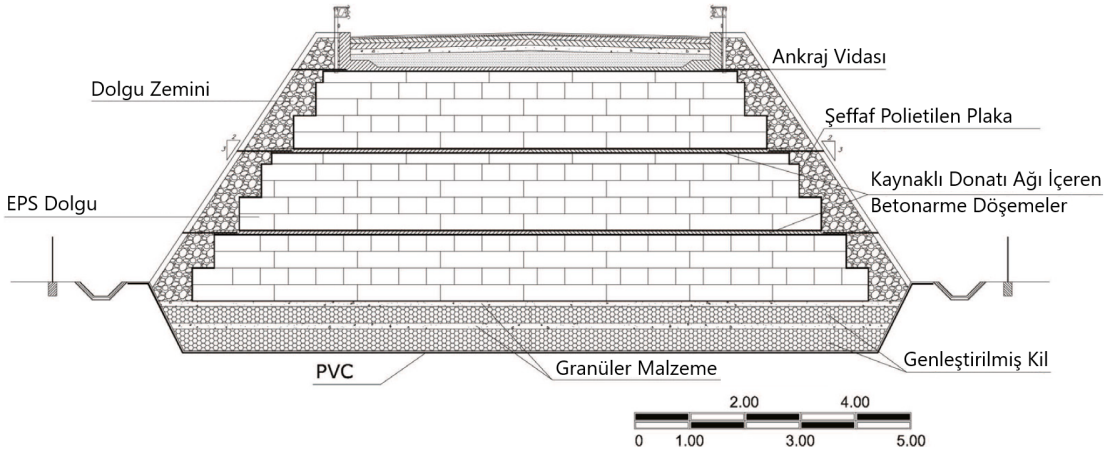


Şekil 1.15 Roma'da bulunun *"Grande Raccordo Anulare"* karayolu altındaki aç-kapa tüneli üzerinde uygulanan EPS dolgusunun plan ve tasarım kesiti [7]



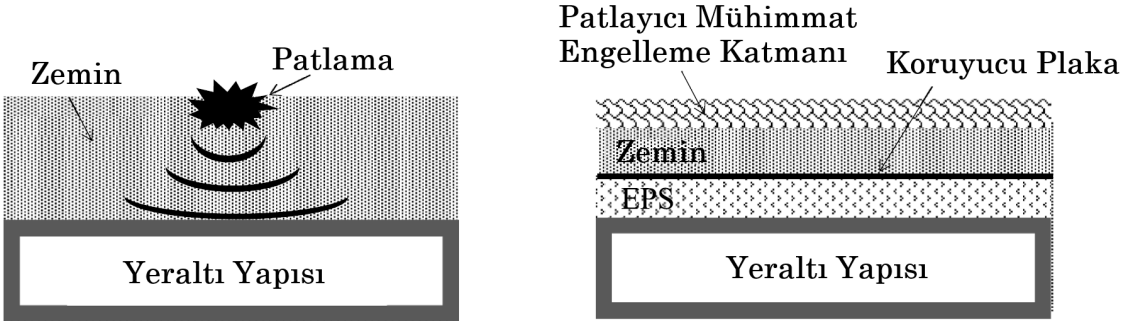
Şekil 1.16 *"Grande Raccordo Anulare"* karayolu çalışmasının 2007 yılındaki inşaat aşaması ile 2018 yılındaki son durumun karşılaştırılması [7]

Roma-Fuimicino Havalimanı arasındaki karayolunda dinamik yüklerin şişmiş kil zemine aktarımını azaltmak için EPS blokların yol dolgusu olarak kullanıldığı 2012 yılında hayata geçirilen dördüncü projede (Şekil 1.17) ise zamanla EPS25 bloklarda ölçülen deformasyonların sabit kaldığı, özellikle EPS35 bloklarındaki deformasyonların çok sınırlı kaldığı görülmüştür. Giuliani vd. [7] tarafından EPS davranışının dört farklı karayolu projesi üzerinden incelendiği çalışmada sonuç itibariyle bir yol dolgu malzemesi olarak gerekli nitelikleri sağlamanın yanı sıra EPS malzemenin oldukça etkili bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır .



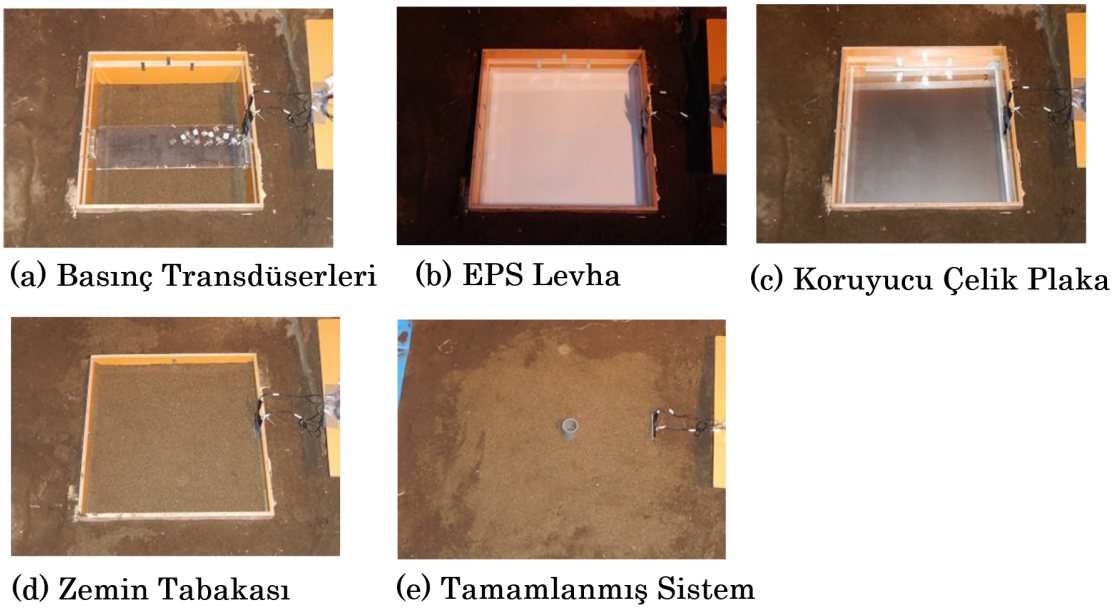
Şekil 1.17 Roma-Fuimicino Havalimanı yolunda gerçekleştirilen EPS dolgusunun tasarım kesiti [7]

Son 70-80 yıldır çeşitli altyapı projelerinde dolgu malzemesi olarak kendisine yaygın kullanım alanı bulan EPS sert köpük malzemesinin düşey yükler altındaki davranışı birçok araştırmaya konu olmuştur. Sözkonusu tüm bu çalışmaların yanı sıra Ichino vd. [15] tarafından yapılan çalışmada EPS Geofoam köpüğün farklı bir etki altındaki davranışını incelemek için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Japonya Ulusal Savunma Akademisi, Texas Üniversitesi ve KANEKAKENTEC Company (Japonya) ortaklığında gerçekleştirilen çalışmada terör saldırıları sırasında patlatılan bombaların veya örneğin Sakarya'da gerçekleşen havai fişek fabrikası patlaması (Temmuz, 2020, Sakarya, Türkiye), Beyrut Limanı patlaması (Ağustos, 2020, Beyrut, Lübnan) gibi kaza sonucu gerçekleşen büyük ölçekli patlamaların yer altı gömülü sistemlerine zarar vermemesi ya da bu zararı minimum seviyelere indirmek amacıyla EPS Geofoam kullanımının etkinliği araştırılmıştır. Yer altı yapısının bulunduğu zemin yüzeyinde bir patlama meydana geldiğinde patlamanın neden olduğu yoğun basınç yükünün zemin içinde dağılmasının yer altı yapısı üzerindeki etkisi ve EPS ile zeminin oluşturduğu koruyucu katmanın etkisi Şekil 1.18'de gösterilmiştir [15].



Şekil 1.18 Patlamaya maruz kalan bir yeraltı yapısının şematik gösterimi [15]

Bu etkileşim durumunda EPS'nin davranışını incelemek için kurulan deney sistemi kapalı bir ortamda teşkil edilmiştir ve deney sisiteminin kurulum aşamaları Şekil 1.19'da gösterilmiştir.

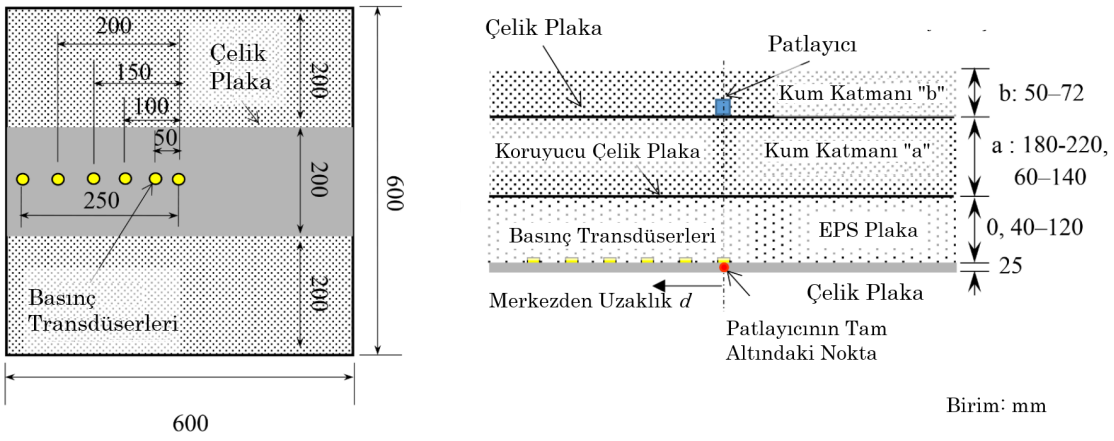


(a) Basınç Transdüserleri (b) EPS Levha (c) Koruyucu Çelik Plaka

(d) Zemin Tabakası (e) Tamamlanmış Sistem

Şekil 1.19 Deney sisteminin kurulum aşamaları [15]

İlk aşamada test alanında 400 mm derinliğinde bir kazı yapılmış ve 12 mm kalınlığında bir kompozit panel bu derinliğe yerleştirilmiştir. Ardından bu panelin üzerine 620 mm x 620 mm boyutlarında ahşap bir panel yerleştirilmiş ve basınç transdüserleri ile koruyucu çelik bir panel yerleştirilmiştir. Yerleştirilen basınç transdüserlerinin konumu Şekil 1.20'de gösterilmiştir.



Şekil 1.20 Basınç azaltma sisteminin şematik diyagramı [15]

Bir ahşap katman daha eklenen deney sisteminin üzerinde EPS paneller son eklenen ahşap katmana yapıştırılarak kullanılmış ve deney sisteminde deneyler boyunca 600 mm x 600 mm ölçülerinde kalınlığı 40 mm ile 120 mm arasında değişen EPS16 levhalar kullanılmıştır. EPS levhaların üzerine koruyucu katman olarak 0,5 mm kalınlığında koruyucu çelik bir katman uygulandıktan sonra, kalınlığı deneylerde 40 mm ile 140 mm arasında değişen kum katmanları ve üzerine 0,5 mm kalınlığında ikinci bir çelik levha eklendikten sonra son kum katmanı da uygulanarak patlayıcı hücre sistemin üzerine yerleştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu seri deneyler sonucunda;

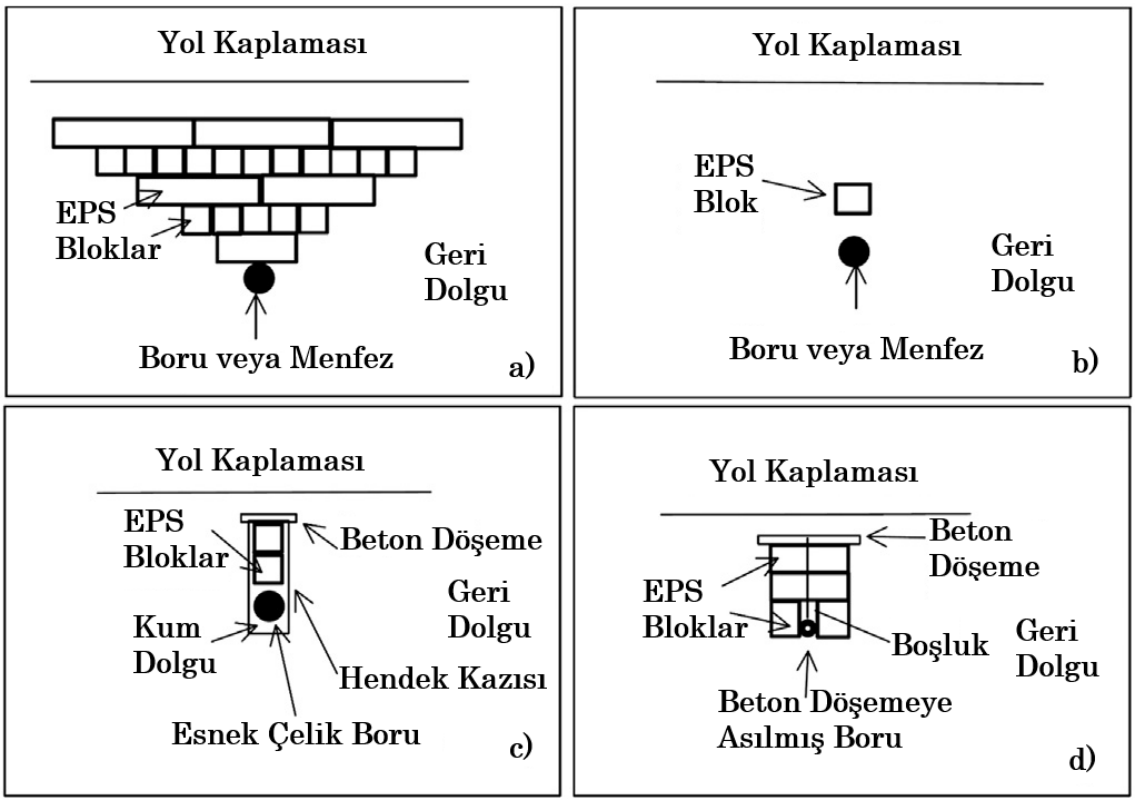
1. EPS levha içeren basınç azaltma katmanları ile gerçekleştirilen deneylerde EPS içermeyen durumlara göre d = 0 konumunda daha az ani basınç artışı gözlenmiştir. Bununla birlikte kullanılan EPS kalınlığının yetersiz kaldığı deneylerde EPS kullanılmayan deneylere göre daha fazla ani basınç artışları görülmüştür.
2. Kum katmanının kalınlığı sabit tutularak EPS levha kalınlığının artırıldığı durumlarda, sistemin tabanındaki patlama basıncının daha düşük değerlere indiği ve daha fazla dağıldığı gözlemlenmiştir.
3. EPS ve kum katmanı kalınlıkları arasında optimum bir oran olduğu saptanmıştır.

1.1.4 Gömülü Boru – EPS Geofoam Malzeme İlişkisi

EPS Geofoam ve gömülü boru ilişkisinin incelendiği çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Son dönemde bu çerçevede gerçekleştirilen başlıca çalışmalar [6], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24] olarak karşımıza çıkmaktadır.

Gömülü yapıların hizmet ömrünü büyük ölçüde etkileme potansiyeline sahip kalıcı zemin deplasmanları zemindeki farklı mekanizmalardan kaynaklanabilmektedir. Yumuşak kil ya da gevşek zeminlerdeki olumsuz koşullar, zeminlerde görülen birincil konsolidasyon oturmaları, zemindeki su muhtevasının çeşitli nedenlerle değişmesi sonucu meydana gelen oturmalar, zemin iyileştirme amacıyla yapılan ancak yanlış şekilde uygulanan kompaksiyon teknikleri, göçmeye elverişli zeminlerdeki oturmalar, yüksek plastisiteye sahip kil zeminlerde gerçekleşebilen şişme ve büzülme davranışı sonucu ortaya çıkan hacim değişimlerinden kaynaklı oturmalar, şevlerdeki stabilite problemleri sonucu meydana gelen göçmeler ya da fay hatlarındaki kırılma zonları boyunca oluşan yüzey çatlakları gibi tektonik deformasyonlardan kaynaklı oturmalar kalıcı düşey zemin deformasyonlarına neden olmaktadır [6]. Zeminlerde görülebilen bu deformasyonların gömülü yapı sistemleri üzerindeki etkilerini mümkün olduğunca

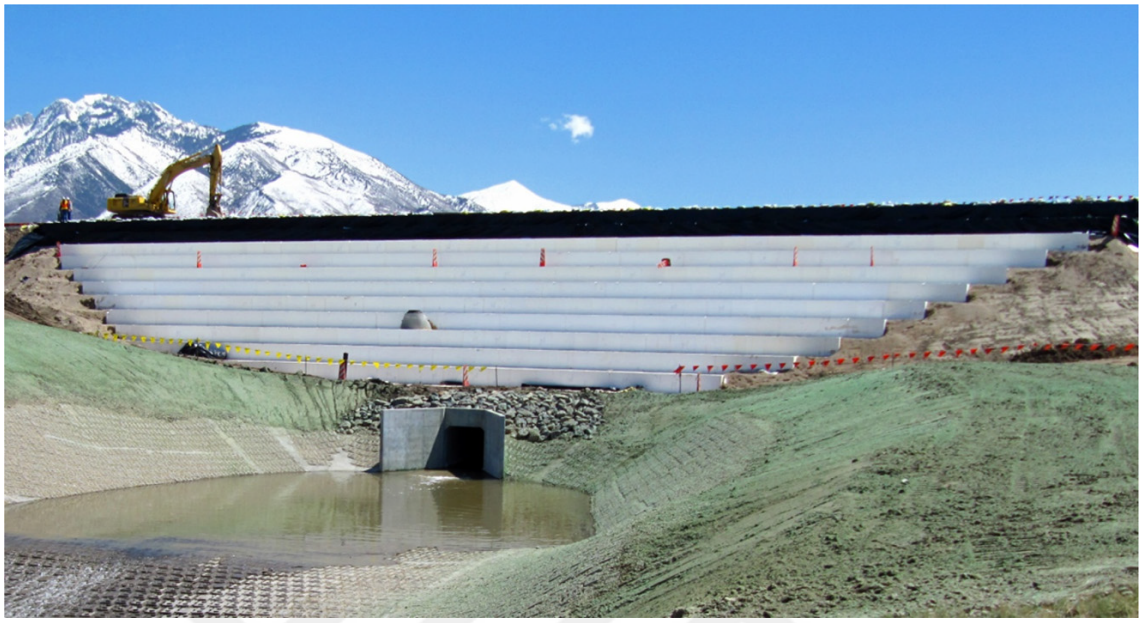
ortadan kaldırmak ya da hafifletmek amacıyla kullanılan EPS sert köpük malzemesi iki temel özelliği dolayısıyla gömülü yapı sistemlerini bu etkilerden korumak için kullanılmaktadır. Bu temel özelliklerden birincisi, zemine kıyasla çok düşük yoğunluk değerlerine sahip olması, ikincisi ise orijinal şeklinin bozulmadan kontrollü basınç yüklerine ve deformasyonlara izin veren ve sıkışabilirlik özelliği iyi bilinen bir dolgu malzemesi olmasıdır [6]. Gömülü boru sistemlerini muhtemel aşırı düşey gerilmelerden korumak için kullanılan EPS malzemesi farklı tekniklerle uygulanabilmektedir. Literatürde yer alan farklı uygulama teknikleri Şekil 1.21'de gösterilmiştir.



Şekil 1.21 Gömülü yapıları düşey yüklerden korumanın genel yöntemleri: a) gömülü yapı üzerine yerleştirilen hafif dolgu malzemesi, b) yapay hendek yönteminde boru üzerine yerleştirilmiş sıkışabilir hafif dolgu malzemesi, c) kazı içerisine yerleştirilen EPS'li koruma sistemi, d) boşluklu EPS sistemi içeren askılı kiriş sistemi [6]

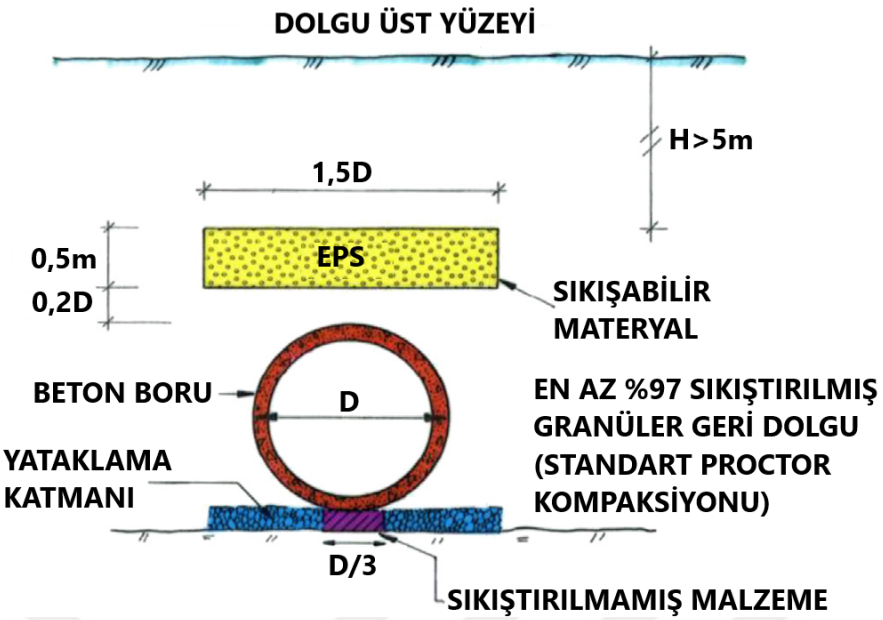
Gömülü boruların zemin içerisine yerleştirilmesi aşamasında kullanılan bu farklı tekniklerden Şekil 1.21a'da gösterilen yöntem boru sisteminin üzerine düşük yoğunluklu dolgu malzemesi kullanılarak dolgu yapılması esasına dayanır ve geçmişten günümüze bu uygulama yöntemi ile inşa edilmiş birçok proje bulunmaktadır. Örneğin bu yöntem esaslarına göre Norveç Kamu Yolları İdaresi (NPRA) tarafından 1970'li yılların başlarında yumuşak bir zemin ortamında hayata geçirilen karayolu projesinde zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve gerçekleşecek oturmaları azaltmak amacıyla EPS Geofoam bloklar kullanılmıştır. İlerleyen dönemde

birçok Avrupa, Asya ülkesinde ve ABD'de söz konusu yöntemin uygulama esasları dikkate alınarak geri dolgu malzemesi olarak EPS kullanımı yaygınlaşmıştır [6]. (Şekil 1.22).



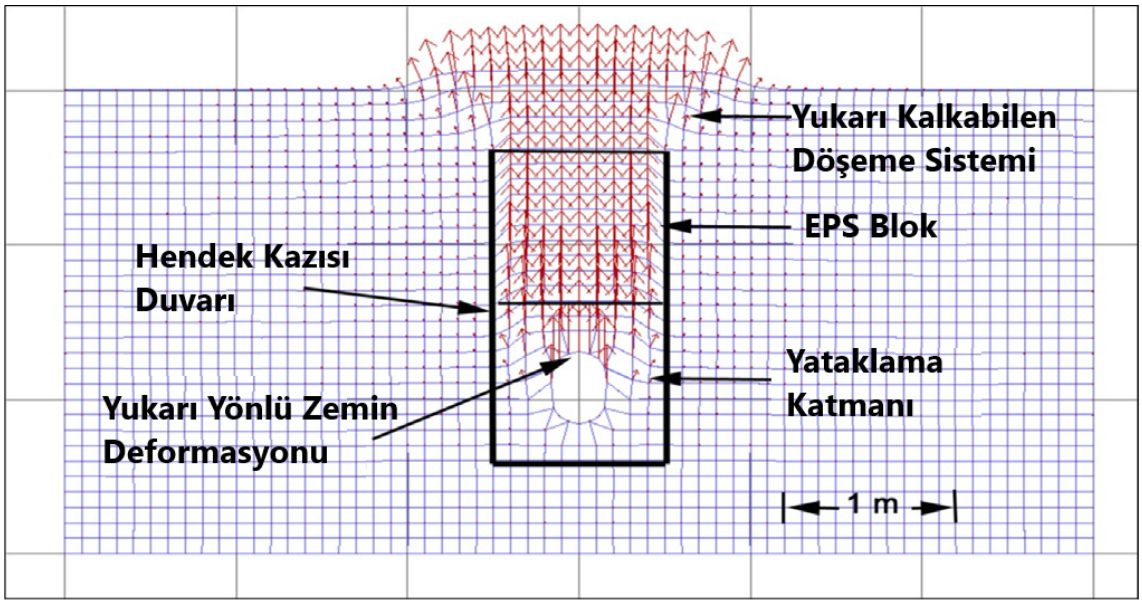
Şekil 1.22 "Utah Transit Authority Frontrunner Commuter" ray hattı altındaki menfez sistemi üzerine inşa edilmiş EPS Geofoam dolgu (ACH Geofoam'ın izniyle, Murray, Utah) [6]

Şekil 1.21b'de gösterilen ve literatürde "yapay (eksik) hendek yöntemi (imperfect trench intallation)" olarak isimlendirilen yöntemde ise rijit bir boru üzerinde EPS gibi sıkışabilir özellikte dolgu malzemesi kullanılmaktadır. Bu yöntemde EPS malzeme rijit boru ve boruyu çevreleyen granüler dolgu malzemesine kıyasla daha fazla sıkışmakta ve gömülü rijit boru üzerinde pozitif zemin kemerlenmesinin oluşması sağlanmaktadır. Yapay hendek yöntemi kullanılarak NPRA tarafından inşa edilen bir projeden alınan uzun dönem ölçüm sonuçlarına göre rijit borunun taç seviyesinde oluşan düşey gerilme değerlerinin granüler dolgu malzemesi kullanıldığında %25'e, kohezyonlu geri dolgu malzemesi kullanıldığında ise %45'e kadar düştüğü gözlenmiştir [6]. Buradan hareketle geri dolgu malzemesinin mühendislik özelliklerinin kemerlenme miktarı üzerinde etkili olduğu ve granüler geri dolgu malzemesi kullanımının siltli-killi geri dolgu malzemesine göre daha fazla kemerlenme oluşumuna imkân sağladığı değerlendirilmiştir. Şekil 1.21a ve Şekil 1.21b'de gösterilen uygulama teknikleri birçok araştırmacı tarafından çalışma konusu olarak seçildiğinden bu iki yöntem daha fazla gelişme fırsatı bulmuştur. Ayrıca yapay hendek yönteminin inşası için NPRA tarafından tipik bir hendek kesiti önerilmiştir (Şekil 1.23).



Şekil 1.23 NRPA tarafından önerilen tipik hendek kesiti [6]

Şekil 1.21c'de görülen hendek borusu gömülme tekniğinde ise genellikle 2-3 m gibi sığ derinliklere gömülmesi planlanan yataklama katmanı içerisine yerleştirilen rijit boru hatlarının üzerine EPS köpük yerleştirilir. Bu yöntemle yerleştirilen boru hatlarında hendek içerisindeki borunun olası bir fay kırılması durumunda üzerindeki EPS katmanını sıkıştırarak yukarı yönlü hareket etmesi ve sistemin herhangi bir zarar görmemesi amaçlanmaktadır (Şekil 1.24).



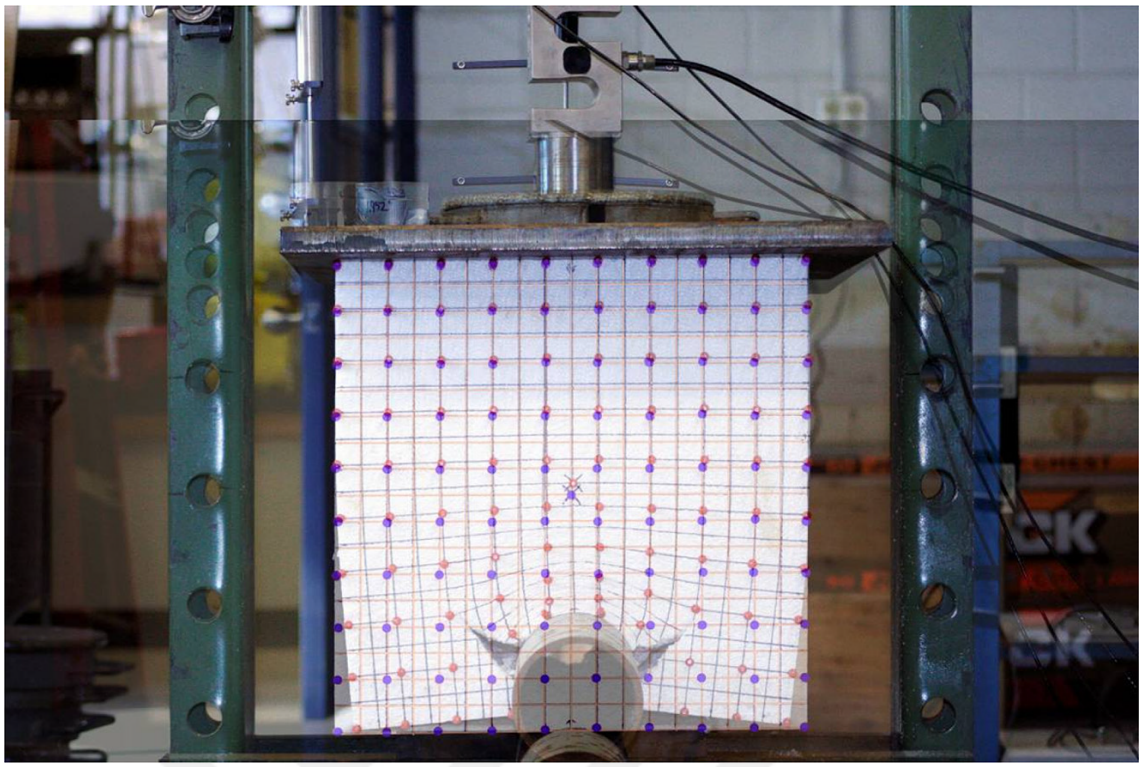
Şekil 1.24 Hendek içerisine yerleştirilen EPS dolgusunun sayısal modelindeki yer değiştirme vektörlerinin kesit diyagramı [6]

Şekil 1.25'te bu yöntem kullanılarak Salt Lake City, Utah'ta bulunan Wasatch fayı üzerinde inşası gerçekleştirilen boru hattı gösterilmiştir. Soldaki görselde açılan sığ hendeğe 0,6 m çapındaki çelik rijit boruların yerleştirilme aşaması, ortadaki görselde boru hattı üzerine yerleştirilen EPS bloklar ve sağdaki görselde yol kaplaması yapılmadan önce yük dağıtımını sağlamak amacıyla uygulanan beton katmanın yerleştirilme aşamaları görülmektedir.



Şekil 1.25 Utah, Salt Lake City'deki Wasatch fayı boyunca inşa edilen EPS dolgulu boru sistemi. [6]

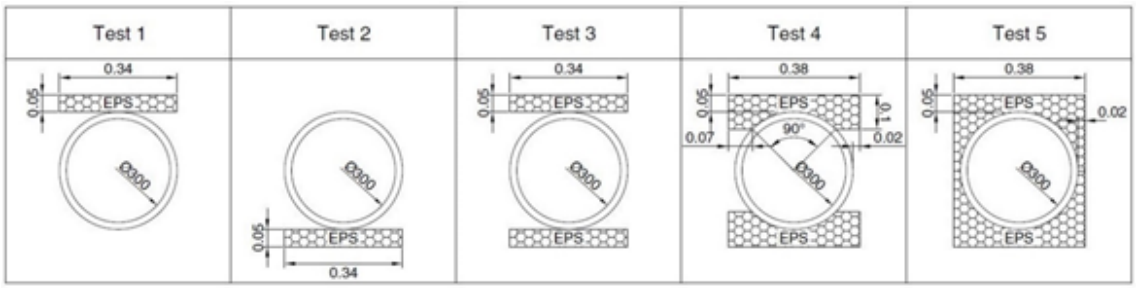
Hendek içerisine yerleştirilen rijit boru ve EPS Geofoam'ın birlikte çalışma performansını değerlendirmek amacıyla Lingwall (2011) tarafından bir dizi deneysel çalışma ve FLAC yazılımı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.26'da bu deneyler kapsamında düşey yüke maruz bırakılan EPS blok – rijit boru konfigürasyonunun yükleme sonrasındaki son durumu gösterilmiştir. 101,6 mm çapında bir çelik boru ve 457 mm x 457 mm x 457 mm boyutlarında EPS15 blok kullanılarak gerçekleştirilen yükleme testinde çelik boru EPS blok tabanının tam orta noktasına ve hidrolik yükleyicinin düşey doğrultusunda yerleştirilerek yüklemeye maruz bırakılmış ve test sonucunda EPS-boru etkileşiminin, doğrusal bir sıkışma davranışının ardından akma davranışı ve sonuçta pekleşme davranışı gösteren non-lineer bir problem olduğu sonucuna varılmıştır [6].



Şekil 1.26 Geofoam-boru etkileşiminin ölçekli laboratuvar testi. Mavi renkli ızgara deforme olmayan blok şeklini, kırmızı renkli ızgara deformasyon sonucu oluşan blok şeklini ifade eder. [6]

Aynı çalışma kapsamında gerçekleştirilen tek eksenli basınç testleri, gerçek boyutlu arazi deneyleri ve FLAC yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, kalıcı zemin deformasyonlarının gömülü rijit borular üzerinde oluşturduğu düşey ve yanal gerilmelerin EPS Geofoam kullanımı ile büyük ölçüde azaltılabileceği görülmüştür [6].

EPS Geofoam – rijit boru etkileşiminin incelendiği çalışmaların yanı sıra HDPE boru – EPS Geofoam ilişkisinin incelendiği çalışmalar da son birkaç yılda literatürde yer almaya başlamıştır. Bu amaçla Kılıç ve Akınay [22] tarafından gerçekleştirilen çalışmada HDPE boru ile birlikte EPS Geofoam malzeme kullanımının boru davranışı üzerindeki etkileri gerçek ölçekli deneyler ile incelenmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde 5 farklı geometrik konfigürasyona sahip EPS Geofoam malzeme ile HDPE borunun birlikte davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda Kılıç ve Akınay [22] tarafından gerçekleştirilen gerçek ölçekli laboratuvar deneylerinde 10 kg/m^3 nominal yoğunluğa sahip EPS bloklar ve 300 mm nominal çap değerine sahip termoplastik (HDPE) koruge boru kullanılmıştır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen gerçek ölçekli bu deneylerde oluşturulan 5 farklı konfigürasyona ait şematik gösterim Şekil 1.27'de gösterilmiştir [3].

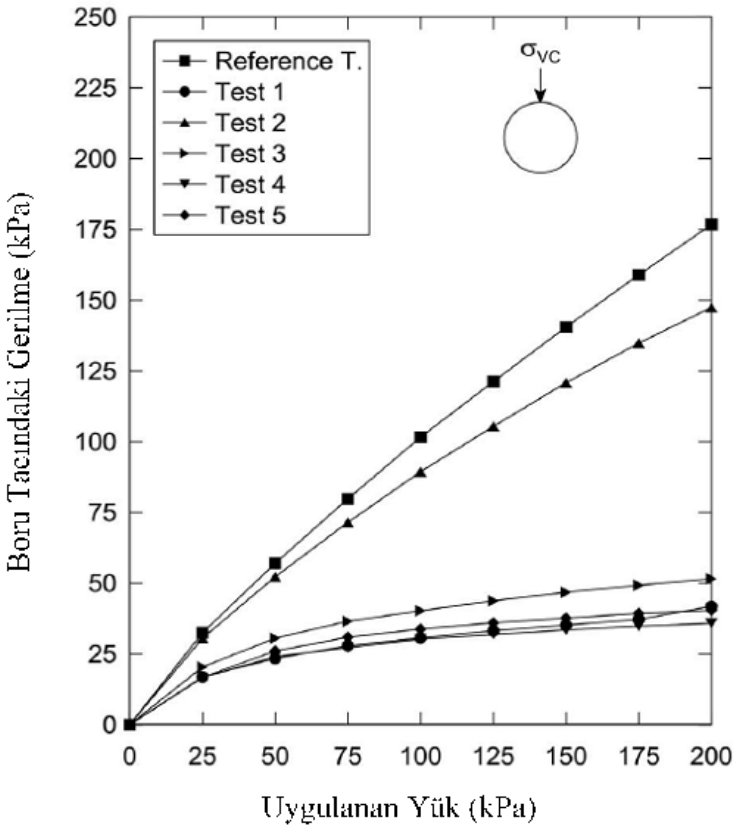


Şekil 1.27 Kılıç ve Akınay'ın çalışmasında kullanılan deney konfigürasyonları. Boru çapları milimetre, diğer ölçüler metre cinsinden verilmiştir. [3]

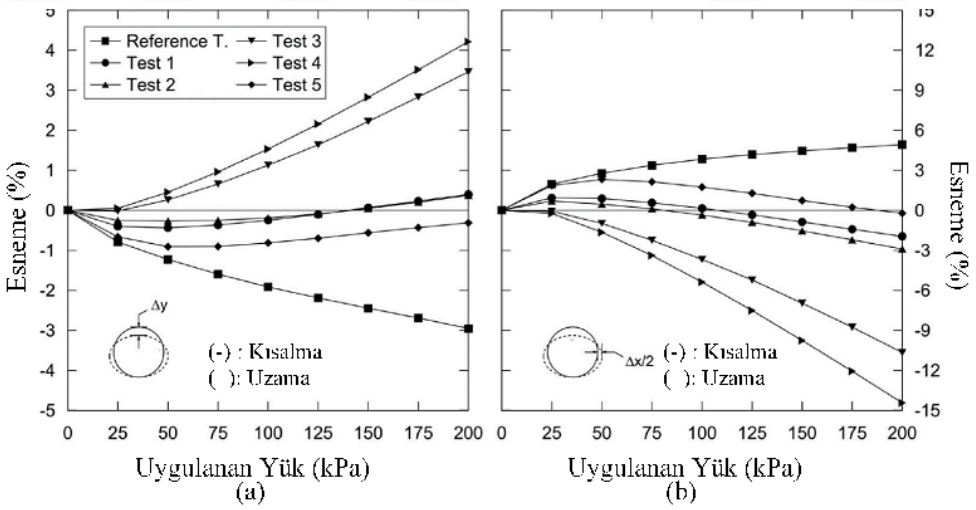
5 farklı EPS – boru konfigürasyonun denendiği gerçek ölçekli laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre;

1. 10 kg/m^3 nominal yoğunluğa sahip EPS malzemesinin daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip EPS sert köpüklere kıyasla daha fazla sıkışabildiği,
2. Düşey doğrultudaki boru esnemesine bakılmaksızın gömülü esnek bir boru üzerindeki zemin kütlesinde gerçekleşmesi beklenen pozitif zemin kemerlenmesi miktarının yapay hendek yöntemi kullanımıyla artırılabileceği,
3. 200 kPa'a kadar çıkan sürşarj gerilmeleri altında HDPE borunun üzerine yerleştirilen EPS panel sayesinde üzerindeki düşey yükleri %70 düzeylerine kadar azaltılabildiği (Şekil 1.28),
4. Gömülü HDPE bir borunun sadece taç seviyesine tekil EPS panel yerleştirilmesi durumunda optimum panel kalınlığının, boru dış çapının 1/6'sı kadar olması gerektiği ve bu koşullar altında boru taç seviyesinde %76, boru yatay simetri düzlemi seviyesinde ise %65 düzeylerine kadar gerilme azalışının mümkün olduğu,
5. Yalnızca 10 kg/m3 yoğunluğa sahip EPS Geofoam malzeme kullanıldığında düşey ve yatay esnemelerin sırası ile %87 ve %60 oranında azaltılabildiği (Şekil 1.29)

sonuçlarına ulaşılmıştır [22].



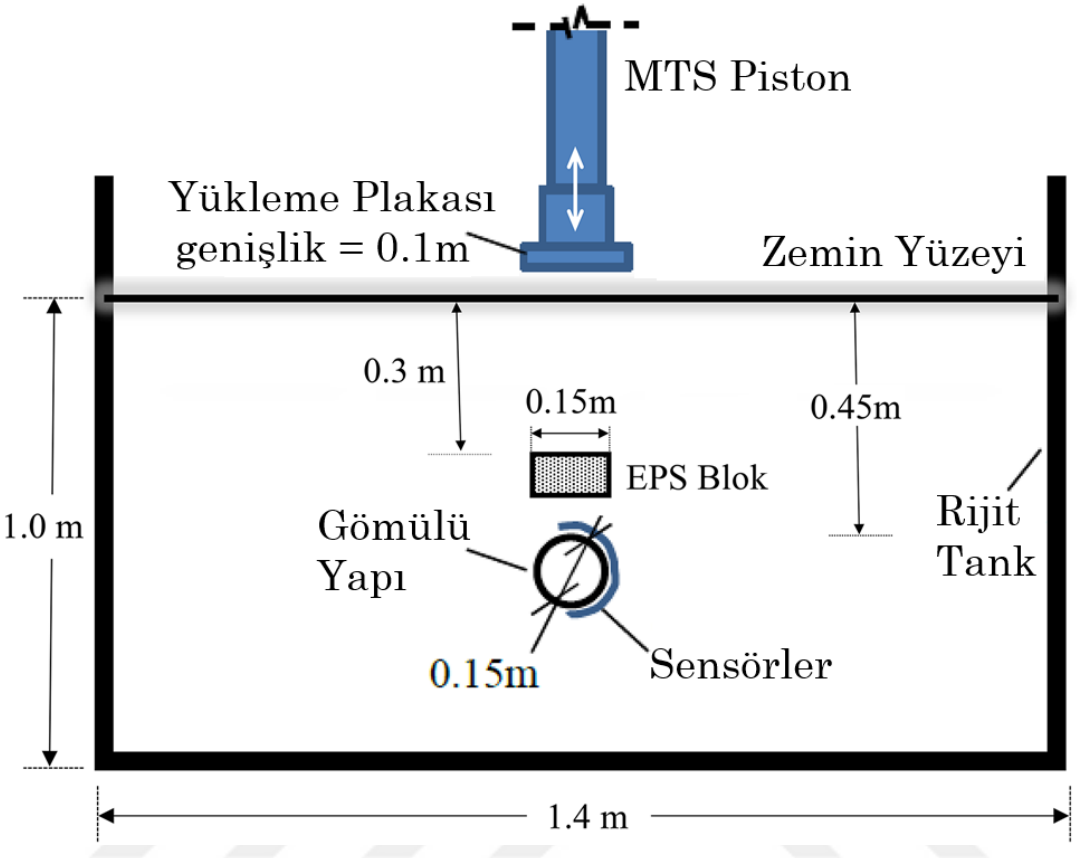
Şekil 1.28 Boru tacında meydana gelen düşey zemin gerilmelerinin uygulanan yük ile ilişkisi [22]



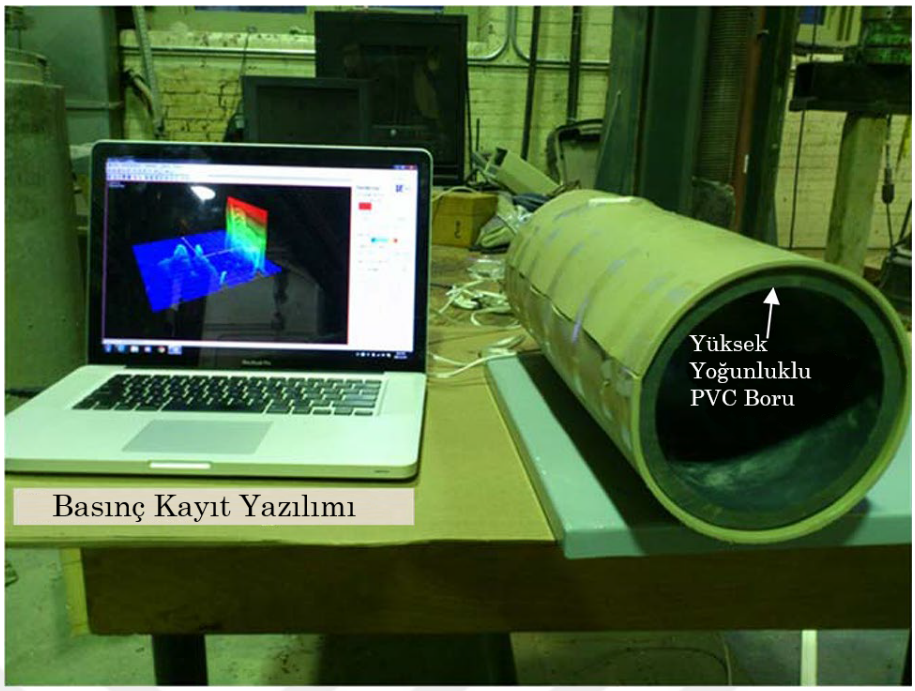
Şekil 1.29 Boruda meydana gelen esnemelerin uygulanan yük ile ilişkisi: (a) Düşey esneme değerleri, (b) Yatay esneme değerleri [22]

Gömülü esnek boru üzerinde çevrimli yükler dolayısıyla oluşan temas basınç dağılımının incelendiği, Meguid ve Ahmed [24] tarafından gerçekleştirilen güncel bir çalışmada ise 0,45 m (en) x 1,4 (boy) m x 1,0 m (yükseklik) boyutlarındaki çelik tank içerisinde granüler geri dolgu malzemesi, 15 cm iç çap ve 1 cm et kalınlığına sahip

yüksek yoğunluklu PVC borunun yanı sıra EPS22 sert köpük blokları kullanılmıştır (Şekil 1.30, Şekil 1.31).



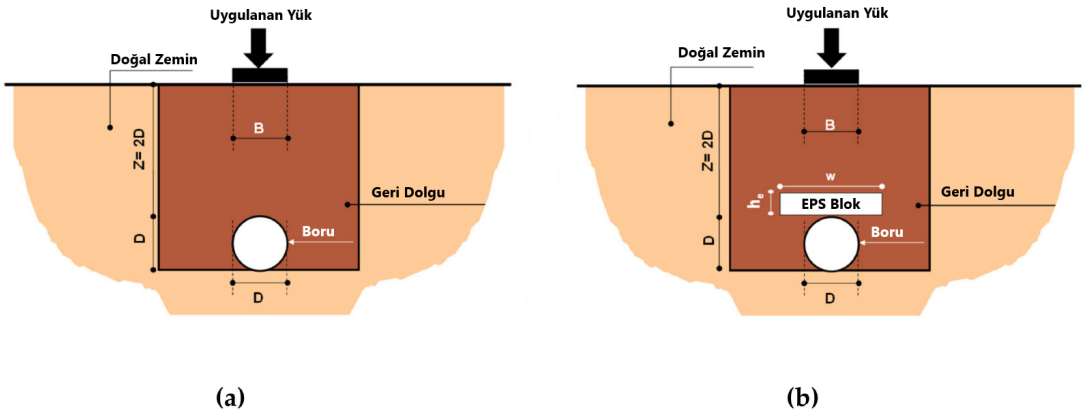
Şekil 1.30 Deney sisteminin şematik gösterimi [24]



Şekil 1.31 Basınç kayıt yazılımı ve enstrümantasyon işlemi tamamlanmış yüksek yoğunluklu PVC boru [24]

Gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile elde edilen sonuçlara göre [24], deney sisteminde kurgulanan koşullar altında EPS kullanımının özellikle boru taç seviyesinde olmak üzere boru çevresinde tekrarlı yükler nedeniyle oluşan radyal basıncı azalttığı ve boru omuz seviyesinde borunun yakın çevresindeki zeminin pozitif kemerlenme davranışı dolayısıyla hafif basınç artışlarının tespit edildiği rapor edilmiştir.

Khalaj vd. [19] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise gömülü HDPE borular üzerindeki basınç yüklerinin azaltılması amacıyla EPS Geofoam ve Geocell'in birlikte kullanımının etkinliği gerçek ölçekli laboratuvar deneyleri ve üç boyutlu sayısal analizler yardımıyla araştırılmıştır. Bu amaçla EPS'nin bulunmadığı ve EPS kullanılarak gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden ilkinde boru beton bir zemine yerleştirilmek suretiyle granüler malzeme kullanılarak geri dolgu yapılmış (Şekil 1.32a), ikinci konfigürasyonda ise ek olarak boru üzerine EPS blok yerleştirilmiştir (Şekil 1.32b).



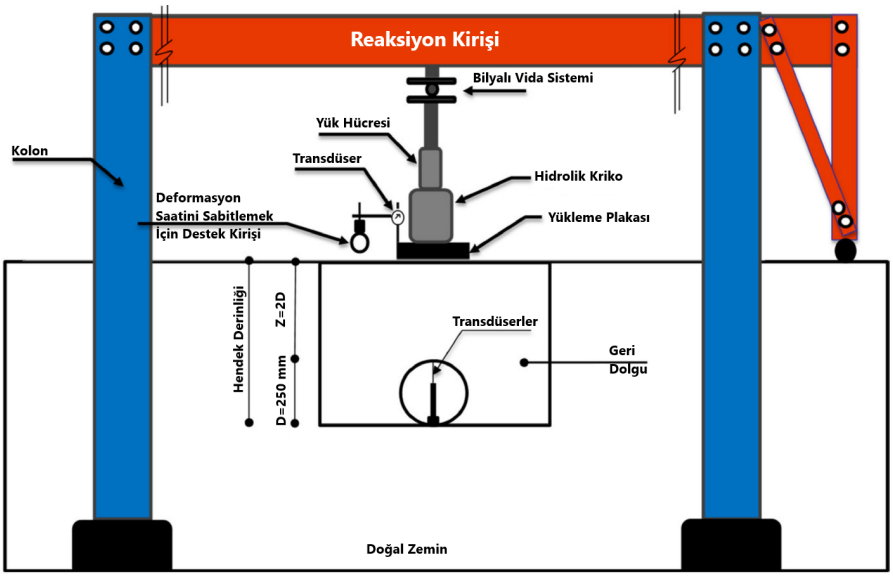
Şekil 1.32 Deney sisteminin şematik gösterimi: a) EPS bulunmayan deney b) EPS'li deney [19]

Geri dolgu malzemesi olarak USCS zemin sınıflandırma sistemine göre (ASTM D 2487-11) iyi derecelenmiş granüler malzeme kullanılmıştır. Kullanılan HDPE borunun dış çapı (D) 250 mm ve boru et kalınlığı 4 mm olmakla beraber, ikinci konfigürasyonda kullanılan EPS bloğun nominal yoğunluğu 30 kg/m^3 genişlik değeri 1,5D ve kalınlık değeri 0,3D oranlarında kullanılmıştır. Deney sistemine ilişkin görseller Şekil 1.33 ve Şekil 1.34'te paylaşılmıştır.



Şekil 1.33 Deney sisteminin gerçek görüntüsü [19]

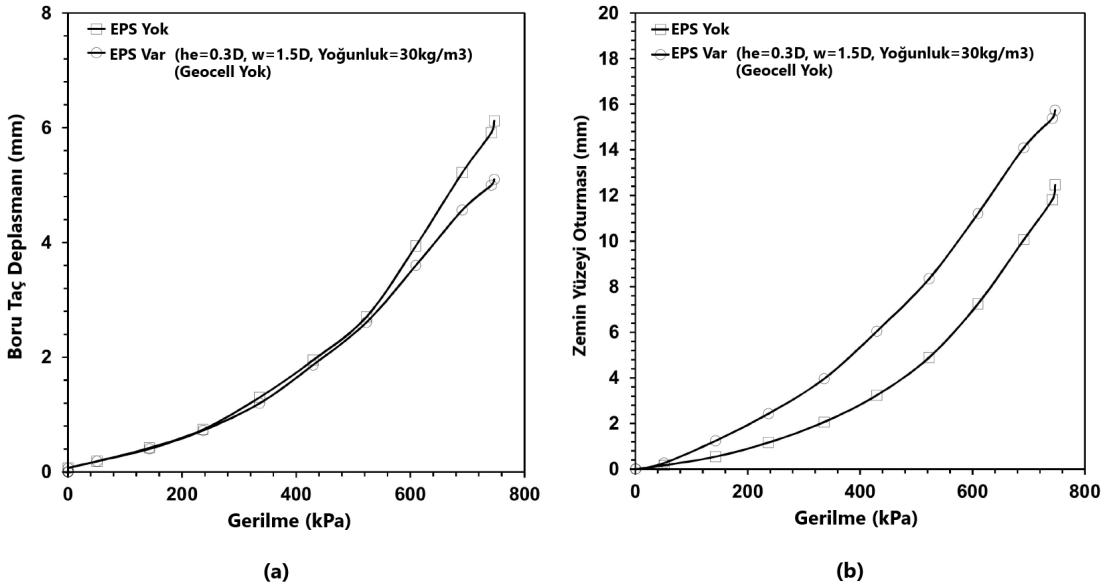
Elde edilen deneysel veriler neticesinde EPS üzerindeki zemin prizmasında pozitif kemerlenme durumunun oluştuğu ve boru üzerinde düşey gerilme azalışı meydana



Şekil 1.34 Deney sisteminin şematik gösterimi [19]

geldiği görülmüştür.

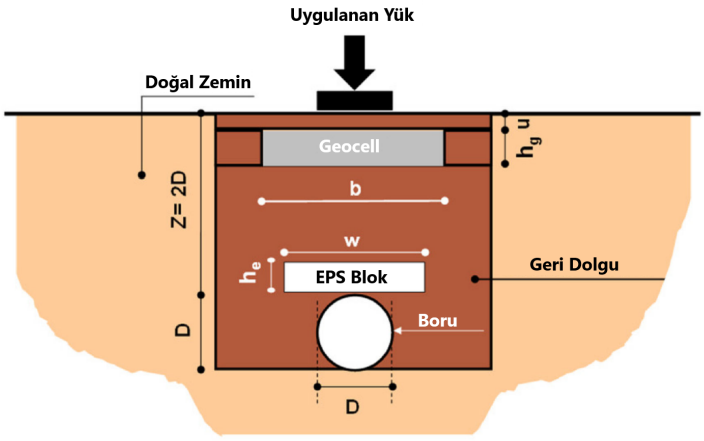
Şekil 1.35'te ise EPS bulunan ve bulunmayan durumlarda düşey gerilmeler altında boru taç seviyesinde meydana gelen deplasman miktarları ile yüzeydeki zemin oturma miktarları karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.35 Farklı gerilmeler altında boru taç deplasmanı ve zemin yüzeyi oturma değerlerine EPS'nin etkisi [19]

Bu sonuçlara göre EPS kullanımının boru taç seviyesinde meydana gelen deplasman miktarını %16,7 oranında azalttığı, yüzeyde meydana gelen zemin oturmalarında da artışa neden olduğu sonuçlarına varılmıştır. Deneysel çalışmanın ardından ABAQUS yazılımı kullanılarak sayısal analizler de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.

ABAQUS yazılımında modellenen laboratuvar deney sisteminin tipik geometrik modeli Şekil 1.36'da gösterilmiştir.



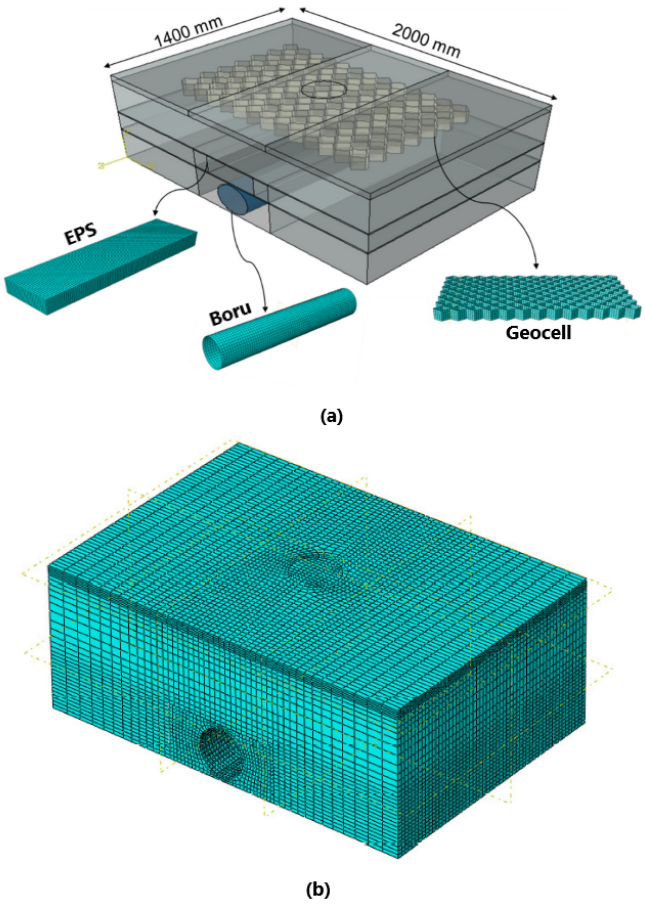
Şekil 1.36 ABAQUS yazılımında oluşturulan modelin şematik gösterimi [19]

Oluşturulan sayısal modelde geri dolgu malzemesinin elastik ve plastik davranışlarını modellemek için Drucker – Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Söz konusu model gerçekleştirilen çalışma için daha gerçekçi sonuçlar alabilmek ve pekleşme davranışını daha iyi gözlemleyebilmek için tercih edilmiştir [19]. Bununla birlikte geocell ve HDPE boru elastik malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Sayısal modelde kullanılan kum, geocell ve boru için malzeme parametreleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2 ABAQUS Sayısal modelinde kullanılan malzeme parametreleri [19]

Malzeme	**Yoğunluk** (kN/m^3)	**Young's Modülü (MPa)**	**Poisson Oranı**	**İçsel Sürtünme Açısı**	**Kohezyon (kPa)**	**Genleşme Açısı**
Zemin	2062	45	0.3	59.86	0	12
Geocell	333	200	0.35	–	–	–
Boru	560	1000	0.45	–	–	–

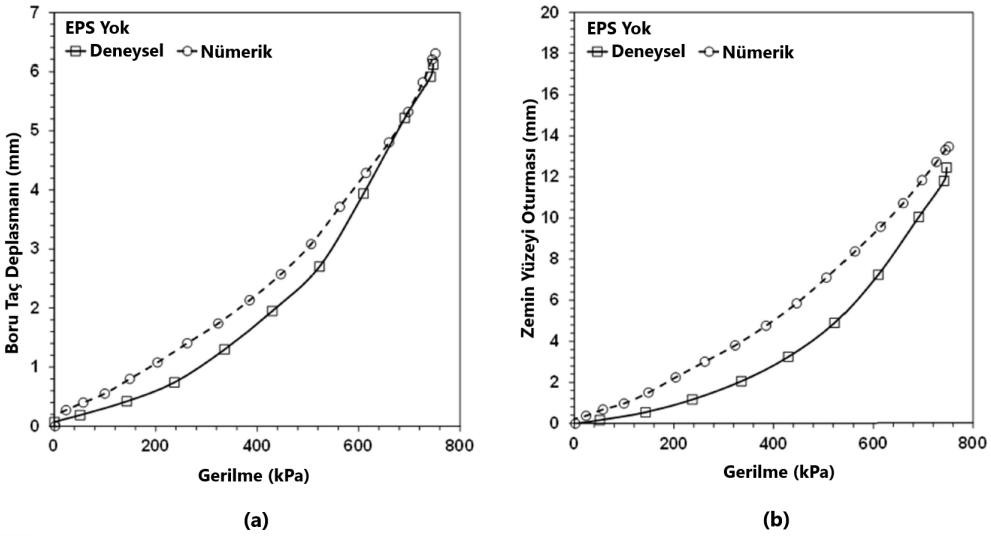
Toplam 94.928 adet hekzahedral lineer elemandan oluşan gerçek ölçekli geometrik model Şekil 1.37'de paylaşılmıştır.



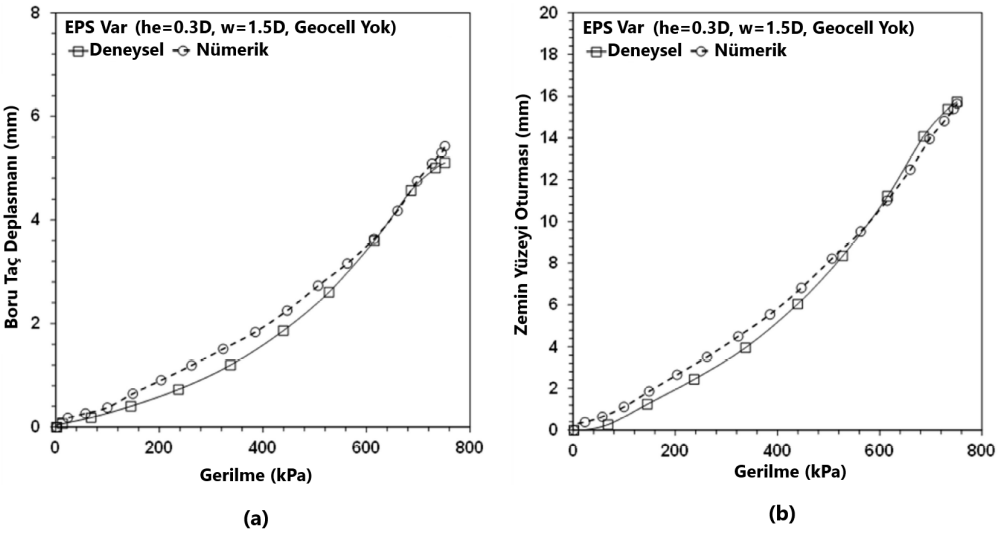
Şekil 1.37 ABAQUS yazılımında oluşturulan sayısal model [19]

Üretilen geometrik modelde yüklemeye maruz kalacak yüzey ve boru çevresindeki mesh sistemi büyük deformasyonları daha sağlıklı hesaplayabilmek ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla daha küçük birim elemanlardan oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan geometrik modelde toplam 8.160 lineer membran elemanı kullanılarak geocell ve toplam 2.370 lineer dört-yüzlü kabuk eleman kullanılarak boru geometrisi oluşturulmuştur.

ABAQUS yazılımında oluşturulan sayısal modelin doğrulama aşamasında ise gerçekleştirilen iki deneysel analizin sayısal olarak doğrulaması yapılmıştır. Şekil 1.38'de EPS'nin kullanılmadığı, Şekil 1.39'da ise EPS'li modele ait gerçek deney sonuçları ile doğrulanmış sayısal modele ait sonuçlar gösterilmiştir.

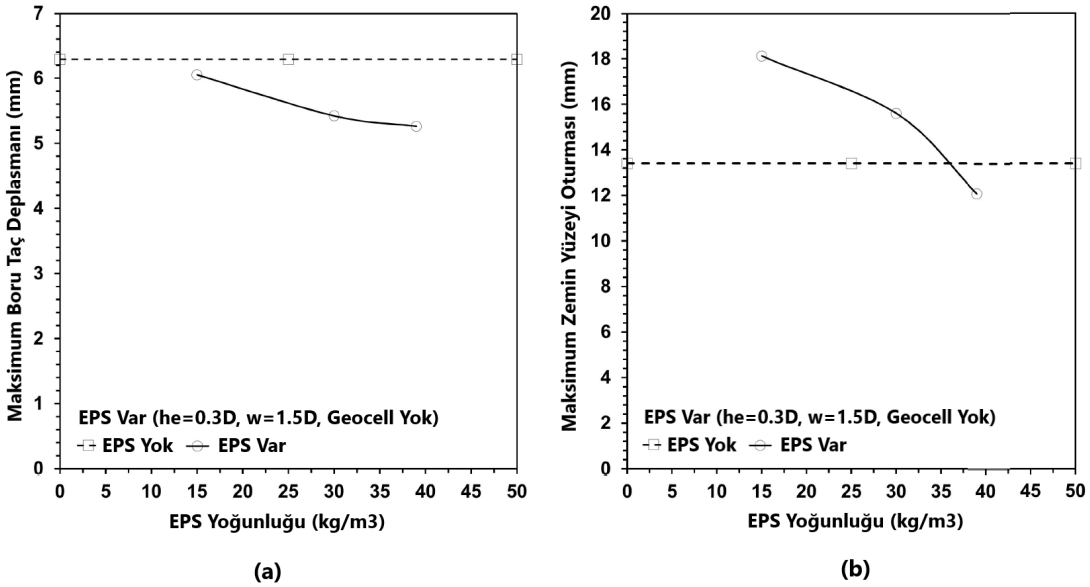


Şekil 1.38 EPS bulunmayan durumda deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması [19]



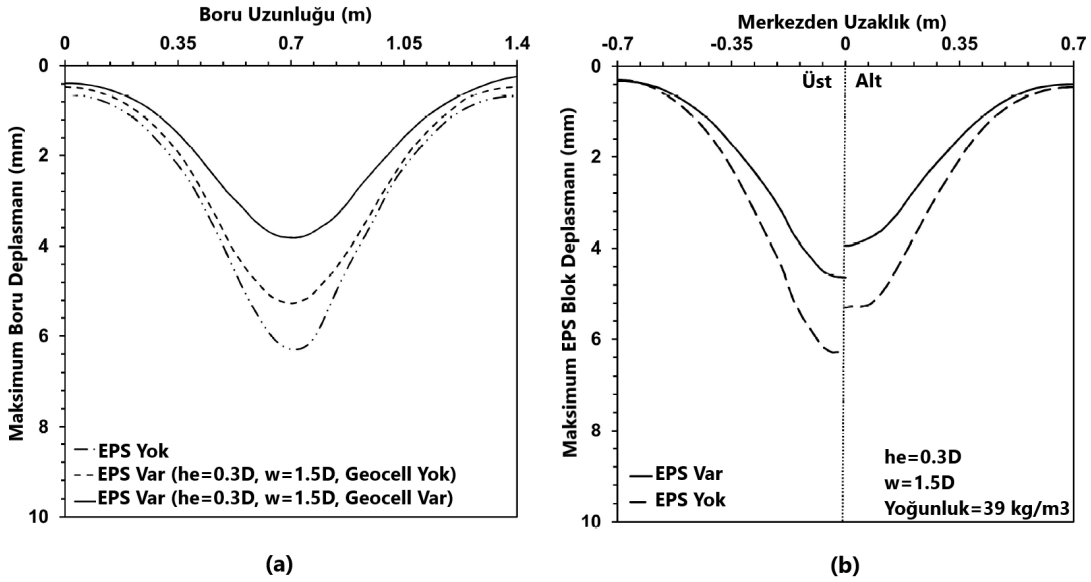
Şekil 1.39 EPS'li durumda deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması [19]

15 kg/m^3, 30 kg/m^3 ve 39 kg/m^3 nominal yoğunluk değerlerine sahip EPS kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarına göre EPS yoğunluğu artırıldığında boru tacındaki deplasman miktarının azaldığı ve buna paralel olarak zemin yüzeyinde hesaplanan oturma miktarının da azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 1.40'ta gösterilen sonuç grafiklerinden hareketle EPS yoğunluğunun 39 kg/m3'ten 15 kg/m^3'e düşürülmesi durumunda boru tacında ölçülen maksimum düşey deplasman değerinin %15 arttığı sonucuna ulaşılabilir.

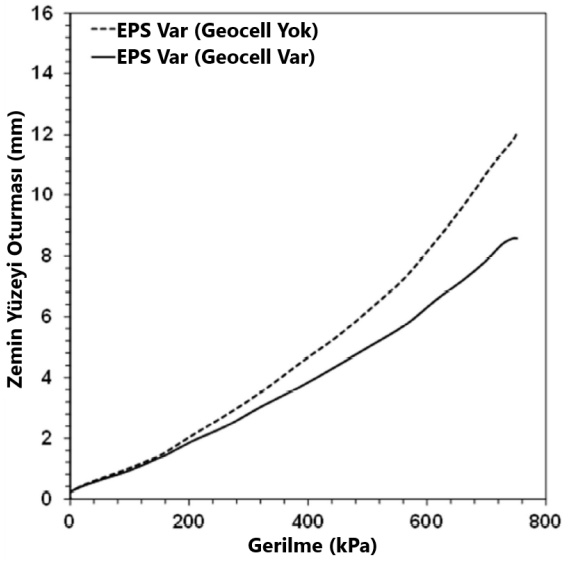


Şekil 1.40 EPS yoğunluğundaki değişimin boru taç deplasmanı ve zemin yüzeyi oturması üzerindeki etkisi [19]

Geocell kullanımının boru davranışı üzerindeki etkilerinin tespitine ilişkin gerçekleştirilen sayısal analizde geocell ile birlikte EPS39 kullanılmıştır. Şekil 1.41a'da gösterilen sonuçlara göre, boru üzerinde sadece EPS bulunan durumda boru tacındaki maksimum deplasman değeri %17 azalmışken iken, modele geocell eklendiğinde boru tacında ölçülen deplasman miktarındaki azalmanın %39,5 olduğu görülmüştür. Geocell kaynaklı %22,5 düzeyindeki bu azalma, geocell kullanımının boru davranışı üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır [19]. Şekil 1.41b'de geocell kullanılan ve kullanılmayan durumlarda EPS bloğun alt ve üst yüzeylerindeki oturma miktarları; Şekil 1.42'de ise EPS bloğa ek olarak geocell kullanılan ve kullanılmayan durumlarda zemin yüzeyinde ölçülen maksimum oturmalar karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.41 Geocell ve EPS'nin birlikte kullanımının boru ve EPS deplasmanı üzerindeki etkisi [19]



Şekil 1.42 Geocell kullanımının yüzey oturmaları üzerindeki etkisi [19]

Khalaj vd. [19] tarafından gerçekleştirilen çalışmada elde edilen veriler ışığında;

1. EPS yoğunluğundaki artışın boru tacında ölçülen maksimum deplasman değerini artırdığı,
2. EPS yoğunluğundaki artışın zemin yüzeyinde ölçülen oturma değerlerini azalttığı,
3. EPS bloğun gömülme derinliğinin EPS performansını etkilediği,

4. Yalnızca EPS blok kullanımının maksimum boru deplasmanını %17, EPS ve geocell kullanımının maksimum boru deplasman değerini %39,5 oranında azalttığı,

5. Geocell kullanımının zemin yüzeyindeki oturma miktarını %29 oranında azalttığı,

sonuçlarına ulaşılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amaçları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. HDPE borular, yüksek sürşarj yüklerine maruz kaldıklarında rijit beton borulara kıyasla çok fazla şekil değişimi göstermeleri nedeniyle kullanılamamaktadır. HDPE boru ile birlikte yüksek sıkışabilirlik özelliğine sahip bir malzeme olan EPS Geofoam'ın sıkışabilir yatak katmanı olarak kullanılması durumunda, zemin ortamında meydana gelen kemerlenme davranışından yararlanarak boru üzerine etki eden zemin gerilmelerinin azaltılması suretiyle boruda meydana gelecek deformasyonların en aza indirilebileceğinin ve borunun orjinal formunu kaybetmeden servis ömrü boyunca performansını koruyabileceğinin gösterilmesi

2. Akınay [1] tarafından laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen gerçek ölçekli deneyler dikkate alınarak FLAC3D yazılımı ile oluşturulan sayısal modellerin kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi

3. Kalibrasyonu gerçekleştirilen sayısal modeller üzerinde gerçekleştirilecek analizler ile EPS geometrisi ve zemin özellikleri değişkenlerinin düşey yükler altındaki HDPE boru davranışına olan etkilerinin incelenmesi

1.3 Hipotez

Gömülü borular, yerleştirildikleri derinliklere ve yerleşim biçimine bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde düşey zemin gerilmelerine maruz kalırlar. Yapay hendek yöntemi esasına göre inşa edilen bir boru hattında, sıkışabilir yatak katmanı kullanımı ile boruyu çevreleyen zemin ortamındaki kemerlenme oranı arttırılarak boruya etki eden düşey zemin gerilmeleri bir ölçüye kadar azaltılabilmektedir. Bu yaklaşımdan hareketle HDPE boru ile EPS Geofoam malzemenin birlikte kullanılması durumunda boru sistemine etki eden düşey zemin gerilmelerine ek olarak yatay zemin gerilmelerinin de azaltılabileceği düşünülmektedir. Böylelikle, yüksek sürşarj gerilmelerine maruz kalacak gömülü boru sistemlerinde, HDPE borunun hizmet ömrü boyunca güvenli bir biçimde mevcut formunu koruyabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla HDPE boru sistemi üzerine aktarılan gerilmelerde meydana gelecek bu yük azalımı sonucunda HDPE borunun şekil değişimi sınırlandırılacaktır. Dolayısıyla, yüksek sürşarj yükleri altında yaygın olarak kullanılan beton ve çelik borular yerine nakliye, montaj ve bakım çalışmaları bakımından daha avantajlı olan HDPE boruların kullanılabileceği düşünülmüştür.

2
ÇALIŞMADA KULLANILAN FLAC3D SAYISAL ANALİZ PROGRAMI VE TEORİK ARKA PLANI

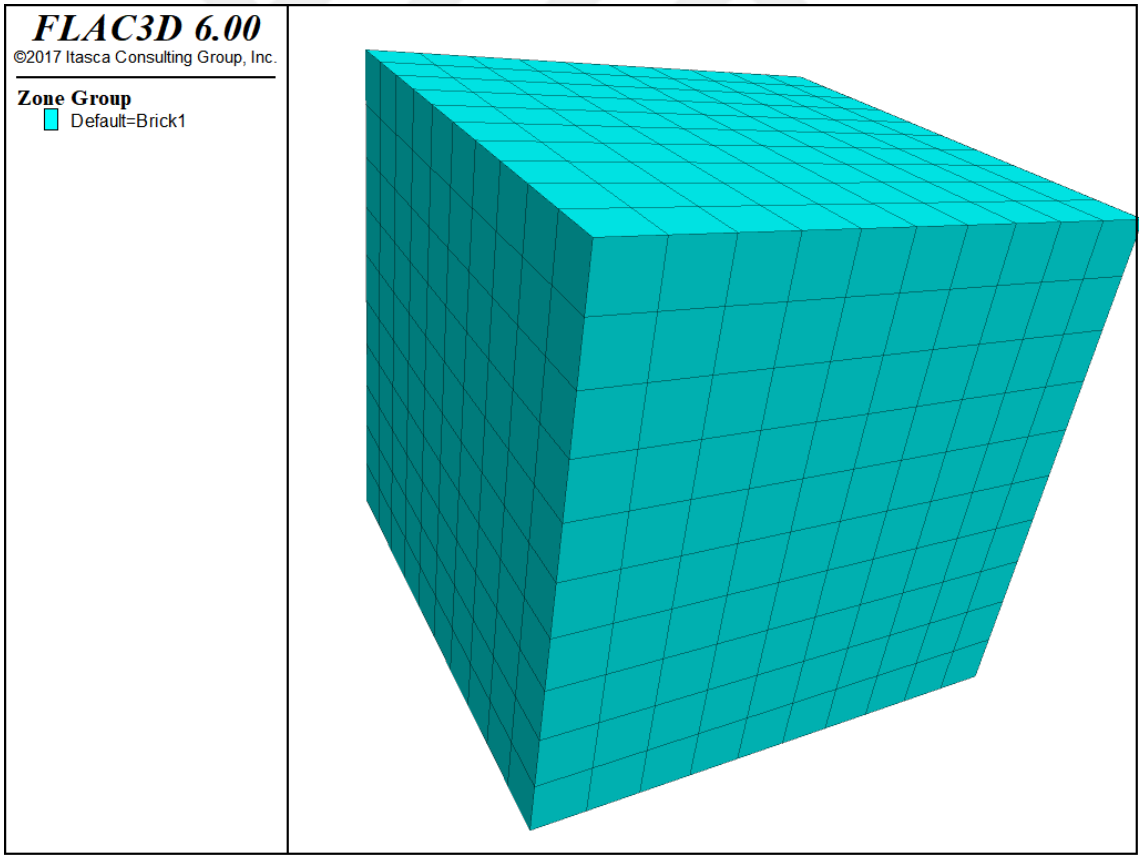
2.1 FLAC3D Programı ve Kullanım Alanları

FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) yazılımı sonlu farklar yöntemi esasına göre 3 boyutlu sayısal analizler gerçekleştiren bir programdır. İnşaat mühendisliği alanındaki farklı disiplinlerde karşılaşılan problemlerin sayısal olarak modellenmesi ve oluşturulan modellerin sonlu elemanlar ya da sonlu farklar yöntemleri esasına göre çözdürülmesinde kullanılan ABAQUS, ANSYS, PLAXIS gibi programlardan biri olan FLAC3D yazılımı geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümüne yönelik projelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sektörde çok daha yaygın bir şekilde kullanılan Plaxis2D, Plaxis3D programlarının aksine FLAC3D programında hazır butonlara program arayüzünde daha az yer verilmektedir. Bunun yerine FLAC3D programında komut dizileri ve FISH (FLAC-ISH) isimli kodlama dili kullanılarak sayısal modeller üretilmektedir. FLAC3D programı söz konusu kodlama dili sayesinde kullanıcısına özellikle yapı zemin etkileşimi problemlerinde oldukça önemli olan ara yüzey etkileşimleri konusunda diğer sayısal analiz programlarına kıyasla daha hassas modelleme ve analiz imkanı sunarken, gerçeğe daha yakın sonuçlar alma imkanı vermektedir. Statik çözümlemenin yanı sıra dinamik analizler yapmaya da imkan veren FLAC3D yazılımında, çeşitli elastik ve plastik malzeme modellerinden oluşan 14 farklı malzeme modeli tanımlanmıştır. Ayrıca bünyesinde tanımlı olan bu 14 farklı malzeme modeli dışında kodlama yoluyla incelenen problemin koşullarına özel farklı malzeme modeli (bünye bağıntıları) oluşturmaya imkan vermektedir. Ancak probleme özel farklı malzeme modeli oluşturmak programın kendi kodlama dili olan FISH aracılığıyla değil, C++ isimli Java dili aracılığıyla oluşturulabilmektedir. FLAC3D programı inşaat mühendisliği alanında tünel, kaya dolgu, toprak dolgu ve betonarme barajların tasarımı, derin kazı ve şev yüzeylerindeki stabilite problemlerinin analizi, çeşitli dayanma yapılarının (perde, ankraj, fore kazık, vb.), zemin iyileştirmesi amacıyla üretilen çeşitli kazık ve kazık gruplarının (çakma-yerinde dökme kazıklar, jet-grout gibi enjeksiyon yöntemleriyle üretilen kazıklar vb.) modellenmesi, kıyı

ve liman yapılarının modellenmesi, yüzeysel ve derin temellerin modellenmesi, donma-çözünme etkisi altındaki tamamen ve kısmen suya doygun zeminler ile yer altı su akımının bulunduğu zeminlerin davranış analizleri gibi inşaat mühendisliği alanındaki farklı disiplinlerde ve araştırma alanlarında kullanılmakla birlikte maden ve çevre mühendisliği problemlerinde de kullanılmaktadır [25].

2.2 FLAC3D ile Sayısal Model Oluşturmanın Teorik Arka Planı

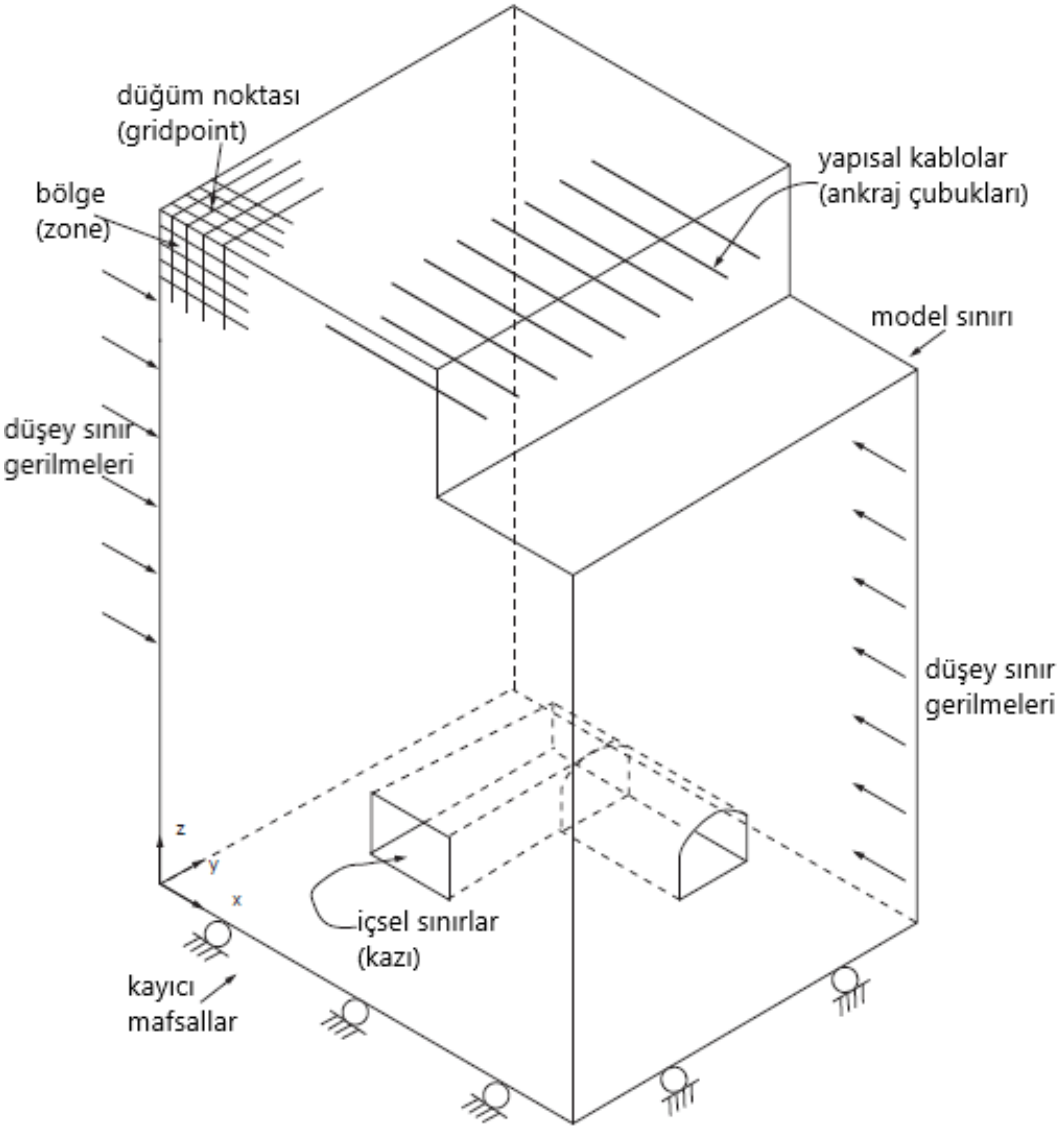
FLAC3D yazılımında üretilen geometriler lagranj sonlu hacim ağlarından oluşmaktadır. Sayısal analizler süresince üzerinde çözüm yapılan geometrik modeller, modellenen problemin büyüklüğüne koşullarına bağlı olarak binlerce veya milyonlarca birim elemandan oluşabilmektedir. Yazılım içerisinde "zone" olarak adlandırılan bu birim hacimler görsel olarak her ne kadar kübik formda algılansa da gerçekte sekiz köşeli ve altı dörtgen yüzlü olan bir altı yüzlü hacim elemanıdır. FLAC3D yazılımı ile oluşturulan ve 1000 adet birim elemandan oluşan örnek bir sayısal model Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 1000 bölgeden oluşan örnek FLAC3D modeli [25]

Bununla beraber bu altı yüzlü hacim elemanının dejenerasyonu ile oluşturulabilen kama,piramit ve düzgün dörtyüzlü birim elemanlar da bulunmaktadır. Birim elemanlardan oluşan bir FLAC3D ağı x, y ve z koordinatları cinsinden ifade edilmektedir. Ayrıca her birim elemanı tanımlayan bir kimlik numarası da geometri üretimi sırasında otomatik olarak üretilir ve bu kimlik numaraları sayesinde her birim sonlu farklar elemanı için istenen özellik kodlama aşamasında tanımlanabilmektedir [25].

FLAC3D yazılımı, diğer sayısal analiz programlarına benzer şekilde kendisine ait bir terminolojiye sahiptir ve söz konusu terminoloji üretilen sonlu farklar ağını oluşturan farklı elemanları tanımlamak için kullanılır. Şekil 2.2'deki şematik diyagram üzerinde FLAC3D terminolojisindeki temel geometrik terimler sunulmuştur [25].



Şekil 2.2 Örnek bir FLAC3D modelinin şematik gösterimi [25]

FLAC3D, bünyesinde geometrik terimler dışında modelleme ve çözüm aşamalarına dair de kavramlar barındırmaktadır. Yazılım kapsamında kullanılan başlıca kavramlar aşağıda listelenmekle beraber yazılım dili İngilizce olduğundan terminolojinin orjinal dilindeki karşılıkları da parantez içinde belirtilmiştir.

- **Model (model):** Model (veya FLAC3D modeli) gerçek bir problemi çözmek için yazılım bünyesinde oluşturulan geometriyi ifade etmektedir.
- **Bölge (zone):** Oluşturulan model içerisindeki en küçük birim elemanlardır.
- **Düğüm noktası (gridpoint):** Modeli oluşturan bölgelerin köşelerini ifade etmektedir. Her bir düğüm noktası dört, beş, altı, yedi veya sekiz farklı düğüm noktası ile ilişkili olabilmektedir.
- **Sonlu hacim ağı(finite volume grid):** Oluşturulan modeldeki bir veya daha fazla bölgenin birleşimini ifade etmektedir.
- **Model sınırı (model boundary):** Model sınırı üretilen sonlu farklar ağının çevresini ifade etmektedir.
- **Sınır koşulu (boundary condition):** Sınır koşulu, oluşturulan modelin sınırlarındaki davranışı modellemek için kod dizinleriyle tanımlanan girdileri ifade etmektedir.
- **Başlangıç koşulları (initial conditions):** Modellenen gerçek problemdeki tüm başlangıç durumlarını ifade eder. Sayısal modeli oluşturulan zemin ortamındaki yer altı suyu durumu, zeminin maruz kaldığı ön gerilme durumları, incelenen problem bir kazı çalışması içeriyorsa bu kazı öncesi zeminde oluşan gerilme değişimleri gibi durumlar sayısal modelde başlangıç koşulları ile tanımlanmaktadır.
- **Yapısal model(bünye bağıntısı) (constitutive model):** Oluşturulan geometrik modeldeki farklı bölgeler gerçek problemde yer alan farklı özelliklerdeki zemin ortamlarının incelenen koşullar altındaki davranışını tanımlamak için kullanılan malzeme modelleridir. FLAC3D yazılımı bünyesinde tanımlı bulunan 14 farklı malzeme modeli ve bu modellere ait parametre girdileri ile zemin ortamlarının gerçeğe yakın davranış modeli elde edilmeye çalışılmaktadır.
- **Yapısal eleman (structural element):** İncelenen gerçek problemde zemin ortamında bulunan farklı yapısal elemanları modellemek için kullanılan unsurlardır. FLAC3D bünyesinde iki düğüm noktalı ve üç düğüm noktalı olmak üzere iki farklı yapısal eleman türü bulunmaktadır. İki düğüm noktalı doğrusal yapısal elemanlar, incelenen gerçek problemde yer alan kiriş, kablo ve kazık

elemanlarının modellenmesinde kullanılırken, üç düğüm noktalı düzlemsel yapısal elemanlar kabuk, astar ve geogrid elemanlarının modellenmesinde kullanılır. Yapısal elemanlar, gerçek problemde yer alan yapısal bir bileşenin (tünel, kazık, geogrid, boru vb.) zemin ya da kaya ortamı ile ilişkisinin simüle edilmesinde kullanılır.

- **Arayüzey (interface):** Zemin veya kaya ortamı ile etkileşim halinde olan yapısal elemanların söz konusu zemin veya kaya ortamı ile etkileşimi sırasında ortaya çıkan ara yüzey etkileşimini sayısal olarak modellemek için kullanılan bileşenlerdir.

- **Adım (step):** FLAC3D yazılımı doğrudan girilen kodlar aracılığıyla çözüm yaptığından, çözüme ulaşmak için belli sayıda işlem adımına ihtiyaç duyulmaktadır. İncelenen sistem kararlı duruma ulaşıncaya kadar analiz devam etmekle beraber basit geometrilerde bu değer ortalama 2000-4000 adım düzeylerinde olurken, kompleks ve büyük geometriye sahip problemlerde bu değer on binler hatta yüz binlerle ifade edilebilmektedir.

2.2.1 Flac3D ile Geometri Oluşturma Yöntemleri

FLAC3D yazılımı ile incelenecek problemin sayısal modelinin oluşturulması aşamasında program farklı alternatif yöntemler sunmaktadır. Bu yöntemler doğrudan kod dizinleri oluşturularak (primitives) model üretimi, program arayüzünde bulunan "extrusion pane" sayesinde AutoCad çıktı dosyaları olan ".dxf" veya ".dwg" uzantılı dosyaların üç boyutlu modele çevrilmesi ve yine program arayüzünde bulunan "building blocks" isimli hazır geometrik modellerin düzenlenmesi yöntemleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Model geometrisi üretmek amacıyla yazılım bünyesinde tanımlı bulunan bu üç farklı yöntem temel farklılıklara sahip olmakla birlikte her birinin çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında ise daha sağlıklı modelleme imkanı verdiği değerlendirilen kod dizinleri (primitives) yöntemi ile sayısal modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal modele ait kod dizinlerine dair bir örnek Şekil 2.3'te, bu yöntemle oluşturulan örnek model ise Şekil 2.4'te sunulmuştur.

Edit geometry.f3dat

```
;////////////////////////////////////////////////////////GEOMETRY.F3DAT\\\
```

2.2.2 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

FLAC3D yazılımı ile sayısal modeli oluşturulan bir geometrinin tüm bölgelerine mutlaka malzeme modeli tanımlanmalıdır ve atanan malzeme modelinin gerektirdiği parametreler tanımlanmalıdır. Malzeme modelinin tüm bölgeler için tanımlanarak ilgili parametrelerin tanımlanmasıyla, üretilen modelin temel karakteristik özellikleri belirlenmiş olacaktır. Yazılım bünyesinde tanımlı malzeme modelleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. Boş (kukla) model
2. İzotropik (elastik) model
3. Ortotropik (elastik) model
4. Anizotropik (transvers elastik) model
5. Drucker-Prager plastik model
6. Mohr-Coulomb plastik model
7. Ubiquitous-joint plastik model
8. Anizotropik-elastik ubiquitous-joint plastik model
9. Strain-hardening/softening Mohr-Coulomb plastik model
10. Bilinear strain-hardening/softening ubiquitous-joint (SUBI) plastik model
11. Double-yield plastik model
12. Modifiye Cam-clay plastik model
13. Hoek-Brown plastik model
14. Hoek-Brown-PAC plastik model
15. Cap-Yield (CYSoil) plastik model
16. Basitleştirilmiş Cap-Yield (CHSoil) plastik model
17. Plastic-Hardening (PH) plastik model
18. Swell plastik model
19. Mohr-Coulomb Tension Crack plastik model

FLAC3D yazılımı içerisinde tanımlı olan bu malzeme modellerinin her biri farklı mühendislik özelliklerine sahip farklı jeolojik malzemeleri sayısal olarak modelleyebilmek için üretilmiştir. Bununla beraber geomekanik malzeme davranışını temsil eden malzeme modellerinin sayısal çözüm şemaları içerisindeki tanımlanma aşamalarında üç temel zorlukla karşılaşılabilmektedir. Bunlardan ilki fiziksel kararsızlık durumudur. Yükleme koşulları altında göçme davranışı gösteren bir malzemede yumuşama (softening) potansiyeli nedeniyle fiziksel kararsızlık durumu oluşabilmektedir. Sayısal çözüm şemalarında genellikle bu aşamada zorluklar yaşanabilmekte ve ortaya çıkan kararsız durum nedeniyle sayısal model dengeye ulaşamamaktadır. Karşılaşılması muhtemel ikinci zorluk ise nonlineer özellik gösteren malzemelerin davranışının modellemeye bağlı olarak farklı sonuçlar verebilmesidir. Geomekanik sistemlerin sayısal analizleri aşamasında sistemin denge, uyumluluk ve malzemeler arasındaki yapısal ilişkilerin farklı alternatif tanımlanma biçimleri vardır. Dolayısıyla kullanıcıdan kullanıcıya değişebilen farklı modelleme biçimleri ile farklı sonuçlar elde etmek olasıdır. Bu nedenle geometrik modelin doğru şekilde oluşturulması ve yapısal modellerin doğru biçimde tanımlanması hayati öneme sahiptir. Sayısal model ve çözüm algoritmaları oluşturulurken karşılaşılması muhtemel üçüncü zorluk ise modellenmek istenen malzemelerin gerilme-şekil değiştirme tepkilerinin lineer olmamasıdır. Bu durum hem elastik rijitlik hem de gerilme zarfları bakımından çevresel basınç ile non-lineer bir ilişkinin var olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum ayrıca nihai göçme davranışı sonucunda malzemenin karakteristik özelliklerinde meydana gelen değişimlerden de kaynaklanabilmektedir. Bu nedenle sayısal çözüm aşamalarının tanımlandığı akış diyagramlarının bu tür non-lineer davranış biçimlerini doğru bir şekilde çözebilecek yapıları içermesi gerekmektedir. FLAC3D yazılımı içerisinde barındırdığı farklı çözüm şemalarına sahip yapısal modeller sayesinde, sayısal çözümler sırasında karşılaşılabilecek söz konusu bu tür kararsızlık problemlerini gerçekçi bir biçimde aşmayı mümkün hale getirmektedir.

FLAC3D yazılımı bünyesinde barındırdığı bünye bağıntılarından boş (kukla) model ortamdan uzaklaştırılan malzemeleri veya kazı aşamalarını modellemek için kullanılmaktadır. İzotropik elastik model basit ifadeyle gerilme-şekil değiştirme davranışı bakımından homojen, izotropik ve sürekli özellik gösteren malzemeleri tanımlamak için; ortotropik elastik model üç farklı doğrultuda farklı elastisite özelliklerine sahip materyalleri; anizotropik elastik model ise incelenen düzleme normal ve paralel doğrultularda farklı mühendislik özelliklerine sahip materyalleri detaylı bir biçimde tanımlamak için üretilmiş malzeme modelleridir. Plastik veya elasto-plastik model grubundaki bünye bağıntılarından Drucker-Prager model düşük içsel sürtünme açısına sahip yumuşak kil zeminleri tanımlamak için yazılım içerisine yerleştirilmiştir. Mohr-Coulomb model zemin ve kaya ortamlarındaki

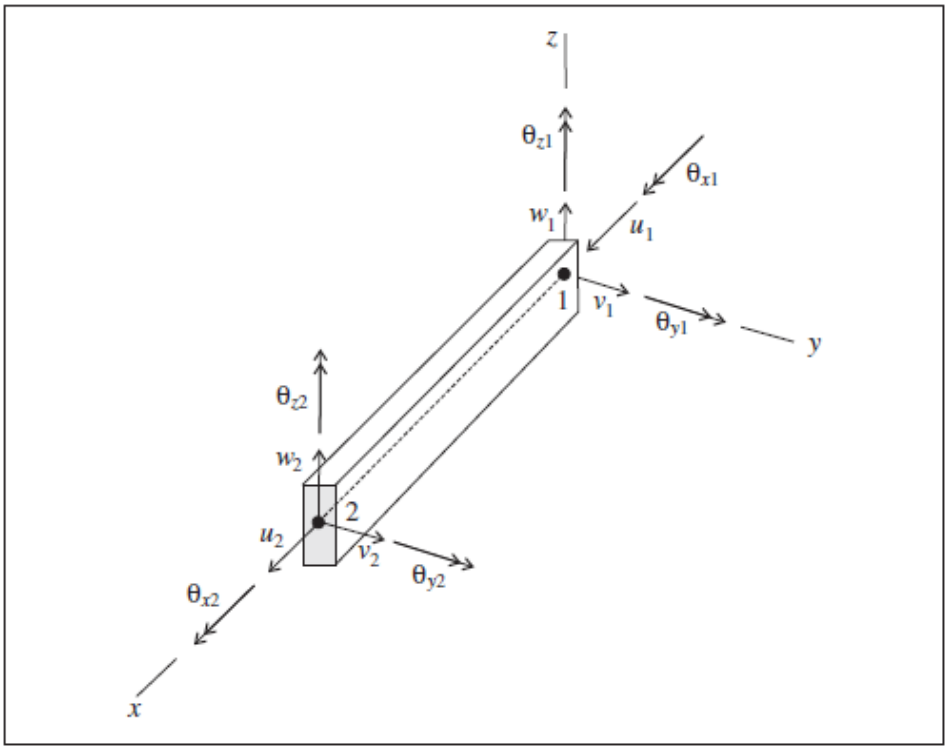
kesme göçmelerini tanımlamak için kullanılan geleneksel Mohr-Coulomb modelini temsil etmektedir. Ubiquitos-Joint model bir anizotropik plastik model olarak belirli doğrultularda zayıflık düzlemleri içeren Mohr-Coulomb hacimlerini tanımlamak için; anizotropik-elastik ubiquitous-joint plastik model ise anizotropik-elastik özellik gösteren zayıflık düzlemlerini modellemek için kullanılır. Strain softening/hardening model yumuşama ve pekleşme davranışı gösteren malzemeleri Mohr-Coulomb malzeme parametrelerini (kohezyon, içsel sürtünme açısı, genleşme açısı ve çekme gerilmesi) de kullanarak tanımlamak için kullanılmaktadır. Bilinear strain-hardening/softening ubiquitous-joint (SUBI) plastik model ubiquitous-joint modelin bir varvasyonu olarak yumuşama ve pekleşme davranışı gösteren malzemelerin modellenmesinde kullanılır. Double-yield model hafif çimentolu granüler malzemeler gibi akışkan bir formda iken yerleştirilmiş ve sıkıştırma sonucunda geri döndürülemez davranışlar gösteren malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Modifiye Cam-clay plastik model yumuşak killerdeki hacim değişimlerinin malzemenin "bulk modülü" üzerindeki etkilerini modelleyebilmek için kullanılmaktadır. Hoek-Brown plastik model ve Hoek-Brown-PAC plastik model, sağlam kaya ve kaya kütlelerinde bozulmaya neden olan göçme kriteri ile plastik akma sonrası karakteristik malzeme özelliklerini tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Cap-Yield (CYSoil) plastik model doğrusal olmayan zemin davranışının kapsamlı bir şekilde tanımlasını sağlamaktadır. CYSoil model, malzemenin sürtünme ile ilişkili yumuşama ve pekleşme davranışı, plastik hacimsel şekil değiştirme davranışı gibi detaylı materyal davranışlarının tanımlanmasına imkan tanıdığından zeminlerin yükleme-boşaltma etkileri altındaki davranışını gerçekçi bir biçimde modellemeye imkan sağlamaktadır. Plastic-Hardening elasto-plastik model ise kayma ve hacimsel pekleşme davranışının detaylı modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca burada kısaca özetlenen yapısal modellere ek olarak FLAC3D yazılımı, malzemelerdeki sünme (creep) davranışının modellenmesi amacıyla zaman tanım alanında tanımlanan 9 farklı malzeme modeli daha içermektedir. Bunun yanı sıra ayrıca satın alınabilen modüller sayesinde FLAC3D, java temelli C++ dilinde bünye bağıntıları oluşturmaya da imkan vermektedir [25].

2.2.3 Yapısal Elemanların Modellenmesi ve FLAC3D Yazılımında Tanımlı Yapısal Eleman Türleri

Geomekanik disiplini çerçevesinde gerçekleştirilen sayısal tasarım ve analizlerin en önemli bölümlerinden biri bir kaya veya zemin kütlesinin stabilizasyonunu sağlamak için yapısal destek elemanlarının doğru biçimde kullanılmasıdır. FLAC3D yazılımı, içerisinde tanımlı ve farklı özelliklere sahip yapısal destek elemanları (kirişler, kablolar, kazıklar, kabuklar, geogridler ve astarlar) sayesinde kullanıcıya büyük ölçüde gerçeğe

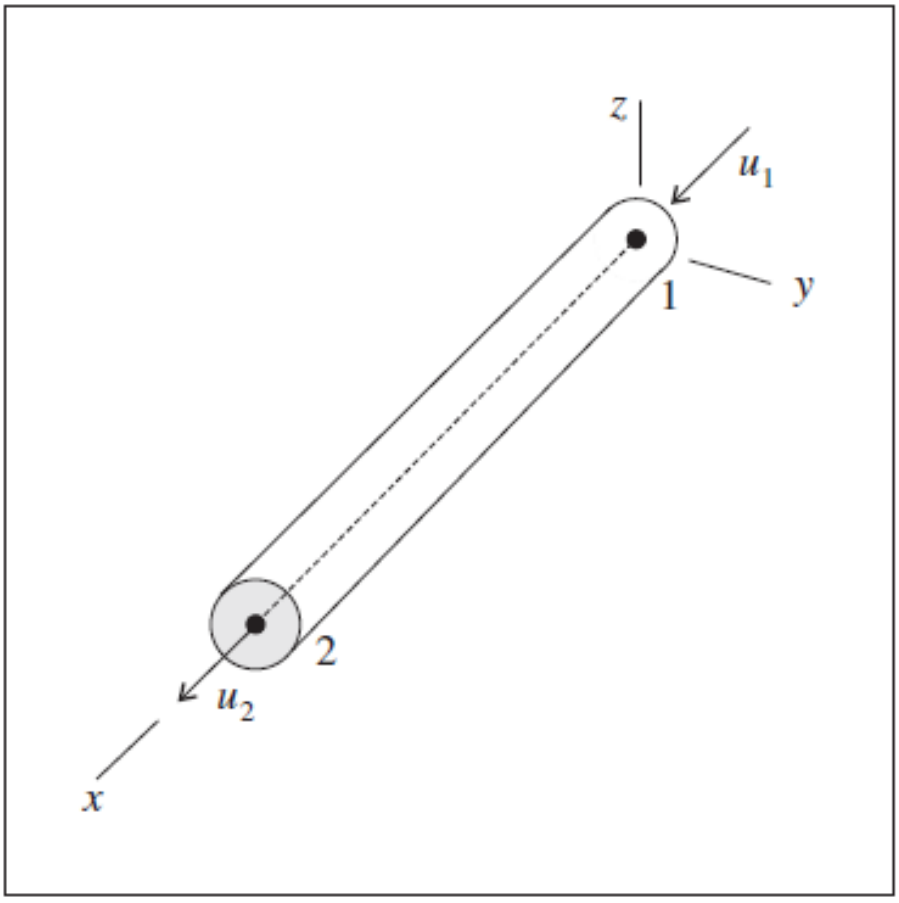
yakın tanımlamaları yapma imkanı sunmaktadır. Yazılım içerisindeki yapısal destek elemanları, üretilen model geometrisindeki katı sürekliliğini temsil ederken zemin bölgeleriyle veya diğer yapısal elemanlarla bağımlı ya da bağımsız olarak çalışabilecek şekilde tanımlanabilmektedir. FLAC3D yazılımı içerisinde tanımlı yapısal destek elemanları ve özellikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır:

1. **Kiriş (Beam) yapısal destek elemanı:** Kiriş yapısal elemanları iki düğüm noktalı, düz, sonlu elemanlardır (Şekil 2.5). Kiriş elemanları herhangi bir göçme sınırı olmaksızın doğrusal elastik bir malzeme gibi davranmasının yanı sıra iki kiriş elemanı arasına plastik mafsalların eklenmesine izin veren ve düğüm noktası başına üçü dönme üçü ötelenme olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahip elemanlardır. Kiriş elemanları düğüm noktaları aracılığıyla modele sıkı sıkıya bağlanabildiğinden yükleme koşulları altında sayısal model deforme olurken, kiriş içinde kuvvetler ve eğilme momentleri oluşur.Ancak büyük eğilme momenti değerlerini taşımaya müsait olmayan yapısı nedeniyle daha sınırlı eğilme momentlerine maruz kalan destek elemanlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Kiriş yapısal elemanları açık bir kazıdaki destek çubukları ve noktasal veya yayılı yüklere maruz kalan genel çerçeveli sistemler gibi burulma ya da eğilme momentlerine sınırlı düzeyde maruz kalan yapıların modellenmesinde kullanılmaktadır [26].



Şekil 2.5 Kiriş yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26]

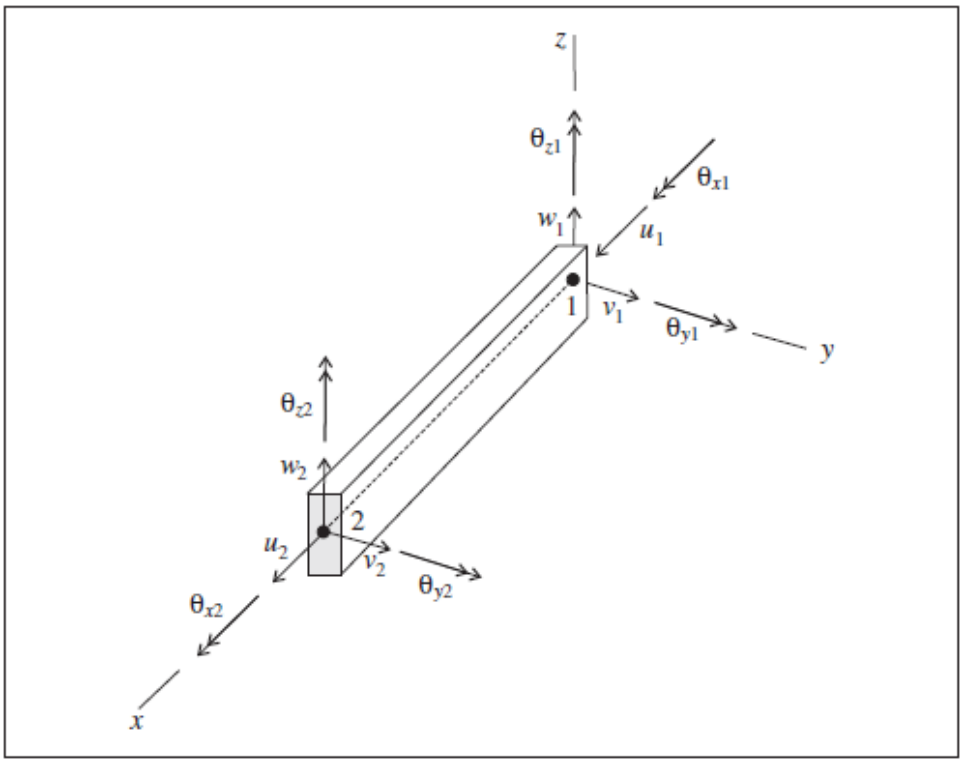
2. **Kablo (Cable) yapısal destek elemanı:** Kablo yapısal elemanları iki düğüm noktalı ve düğüm noktası başına eksenel olarak yönlendirilmiş bir öteleme serbestlik derecesine sahip olan iki düğüm noktalı, düz, sonlu elemanlardır (Şekil 2.6). Kablo elemanları büyük ölçüde çekme etkilerine karşı çalışabilirken sınırlı düzeyde basınç kuvvetlerini de taşıyabilmekte, ancak eğilme ve burulma etkilerine karşı direnç gösterememektedir. Kablo elemanları, etkileşim halinde bulunduğu bölge elemanlarıyla sürtünme etkileşimlerinin oluşmasına izin vermektedir. Bir kablo genel olarak modeldeki belirli bir noktaya sabitlenerek uzunluk doğrultusu boyunca model içerisindeki çekme etkilerini karşılaması amacıyla kullanılır Kablo yapısal elemanları ankraj uygulamaları gibi çekme etkisi altında çalışan elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır [26].



Şekil 2.6 Kablo yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26]

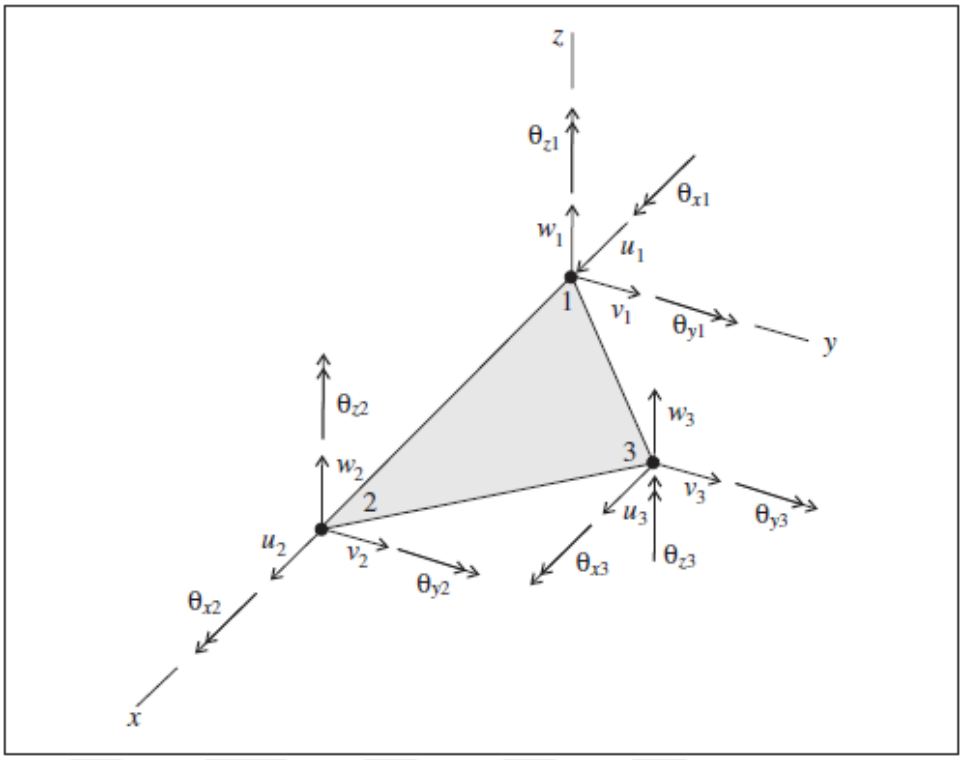
3. **Kazık (Pile) yapısal destek elemanı:** Kazık yapısal elemanları iki düğüm noktalı ve düğüm noktası başına altı serbestlik derecesine sahip düz, sonlu elemanlardır (Şekil 2.7). Bir kazık elemanının rijitlik matrisi bir kiriş elemanının rijitlik matrisi ile aynıdır. Ancak kiriş elemanının yapısal davranışını sağlamasına ek olarak, kazık ve zemin arasındaki hem normal yönlü (kazık eksenine dik yönlü) hem de kayma yönündeki (kazık eksenine paralel) sürtünme

etkileşimlerine modeller. Bu özelliği itibariyle kazık destek elemanları, kiriş ve kablo elemanlarının birleşimi niteliğindedir. Kazık destek elemanları, kaya veya diğer zemin ortamları ile normal ve kayma doğrultularında sürtünme etkileşiminin meydana geldiği temel kazıkları gibi destek elemanlarının modellenmesinde kullanılmaktadır [26].

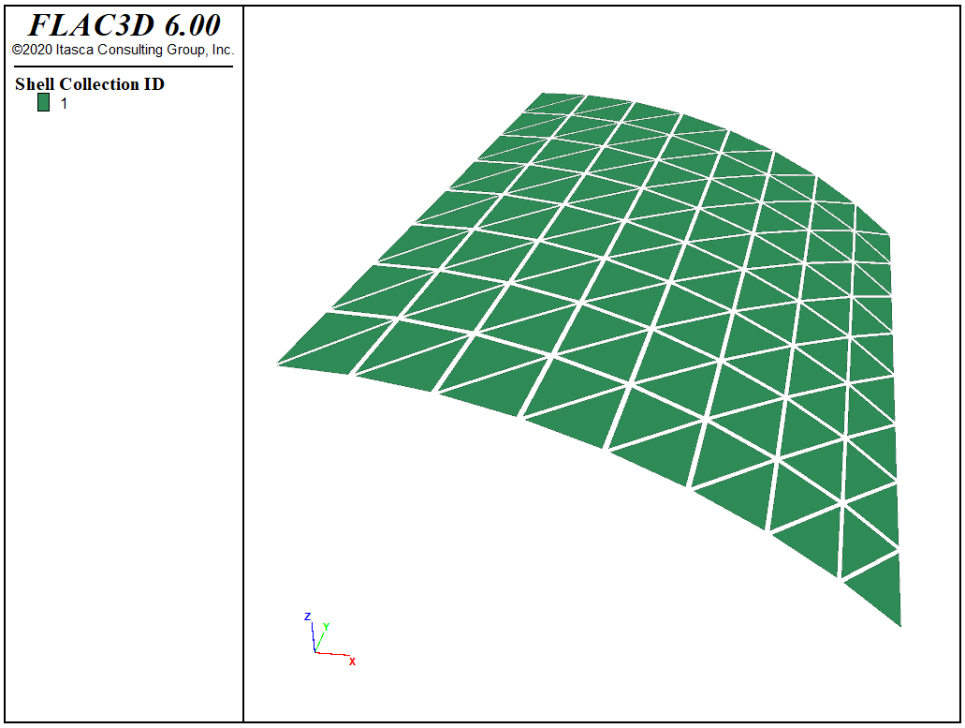


Şekil 2.7 Kazık yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26]

4. **Kabuk (Shell) yapısal destek elemanı:** Kabuk destek elemanı üç düğüm noktalı, düz ve sonlu elemanlardır (Şekil 2.8). Kabuk elemanları iki membran, bir eğilmeye çalışan levha elemanı ve iki kabuk elemanı olmak üzere beş farklı sonlu eleman tipini içermektedir. Modellenmek istenen düzlemsel veya kavisli destek elemanları için kullanılmaktadır (Şekil 2.9). Kabuk elemanları izotropik veya ortotropik, doğrusal olarak elastik bir malzeme gibi davranır ve herhangi bir göçme sınırı bulunmamaktadır. Kabuk elemanlarının bahsedilmesi gereken en önemli özelliklerinden biri de bu elemanların zemini temsil eden bölgelere sıkı sıkıya bağlanıyor olması ve herhangi bir şekilde bir ara yüzey etkileşiminin tanımlanmasına izin vermiyor olmasıdır. Böylelikle yükleme koşulları altında modelde oluşan gerilme ve moment etkileri bağlantı noktaları üzerinden kabuk elemanlarına aktarılabilmektedir. Gerçek koşullarda enine kesme deformasyonlarının neden olduğu deplasmanların ihmal edilebileceği herhangi bir ince kabuk yapısı, kabuk yapısal elemanıyla modellenebilir [26].



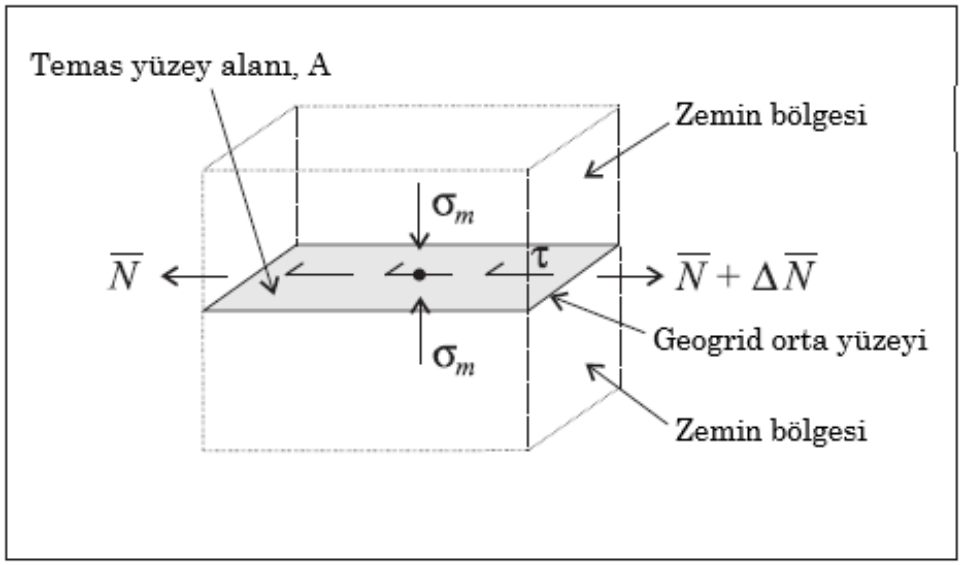
Şekil 2.8 Kabuk yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26]



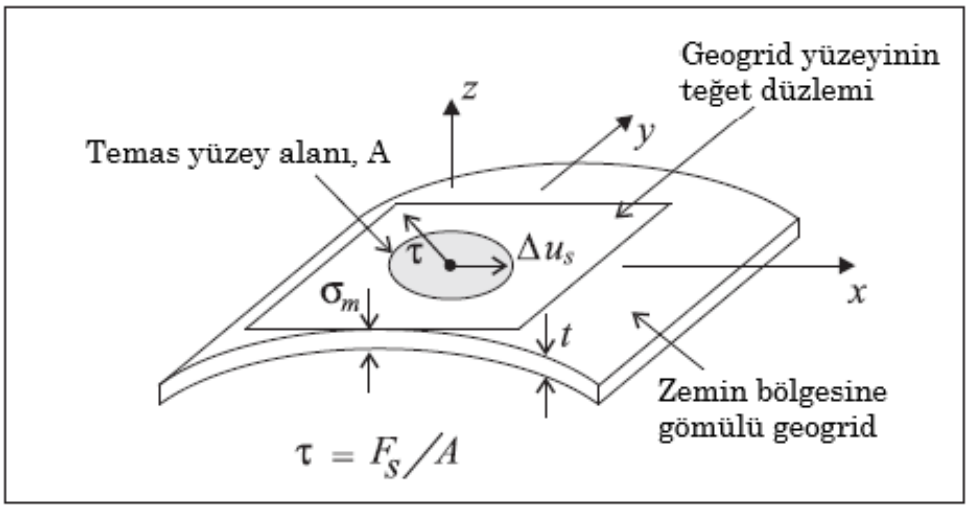
Şekil 2.9 Kavisli bir yüzey için üretilmiş örnek kabuk elemanı [26]

5. **Geogrid yapısal destek elemanı:** Geogrid destek elemanı üç düğüm noktalı, düz ve sonlu destek elemanı olmasının yanı sıra membran kuvvetlerine karşı direnç gösterebilen ancak eğilme etkilerine karşı direnç gösteremeyen

elemanlardır. Geogrid elemanları izotropik veya ortotropik, doğrusal elastik bir malzeme gibi davranırken herhangi bir göçme sınırı da mevcut değildir. Geogrid ve zemini temsil eden model arasında geogrid yüzeyine teğet doğrultuda bir sürtünme etkileşimi meydana gelmektedir (Şekil 2.10). Bir geogrid elemanı, model üzerinde belirli bir noktaya sabitlenir veya zemin modeli ile geogrid arasındaki görece hareket dolayısıyla ara yüzey gerilmeleri oluşacak şekilde bağlanır (Şekil 2.11). Geogrid elemanı basit bir ifadeyle birbirini dik kesen iki doğrultuda yerleştirilmiş kablo sistemi olarak da düşünülebilir. Geogrid elemanları, arazi uygulamalarında kullanılan geotekstil ve geogridler gibi zemin ile kesme etkileşimi önem arz eden esnek membranların modellenmesinde kullanılmaktadır [26].

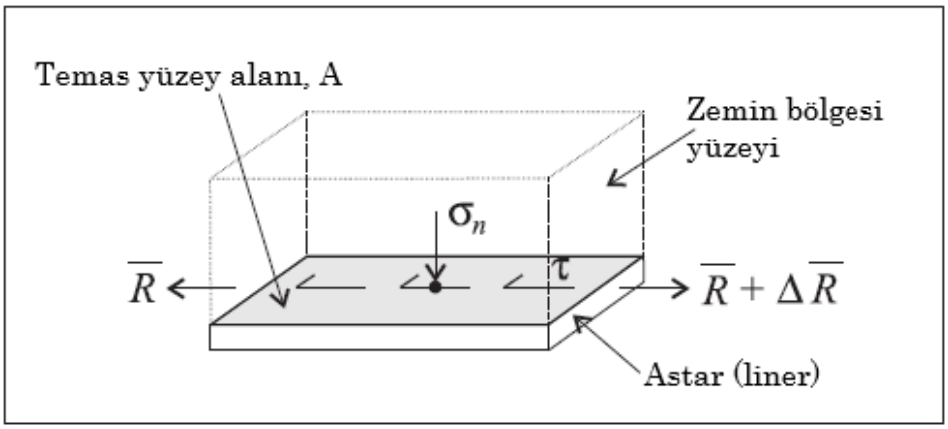


Şekil 2.10 Geogrid yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26]

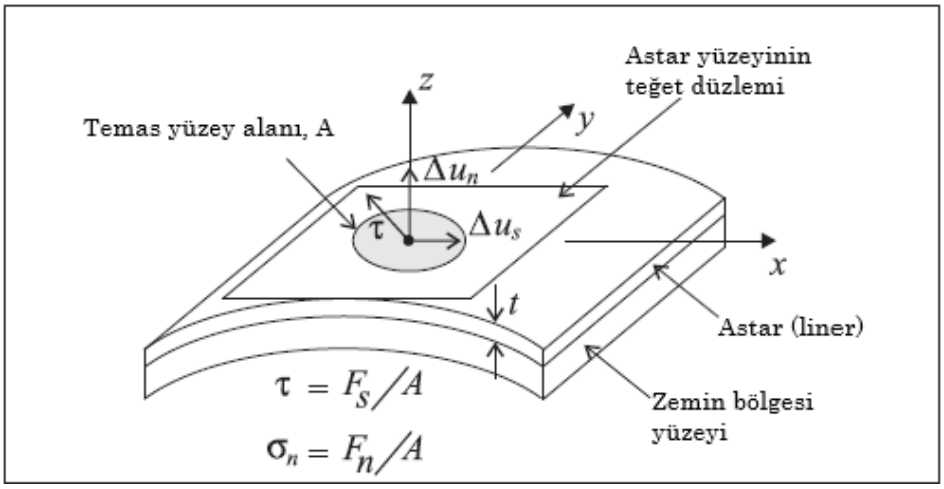


Şekil 2.11 Geogrid-zemin arayüzey etkileşiminin şematik gösterimi [26]

6. **Astar (Liner) yapısal destek elemanı:** Astar destek elemanları üç düğüm noktalı, düz ve sonlu destek elemanlarıdır. Kabuk elemanı için ifade edilen beş farklı sonlu eleman türü astar elemanları için de geçerlidir. Astar yapısal elemanı, kabuk elemanının sağladığı yapısal özellikleri sağlamanın yanı sıra zemin modeli ile arasında kayma etkileşiminin gerçekleşmesine izin vermektedir (Şekil 2.12). Ayrıca bu destek elemanları normal doğrultudaki basınç ve çekme kuvvetlerini taşıyabilir. Astar elemanını kabuk elemanından ayıran en önemli özellik ise etkileşim içerisinde bulunduğu zemin ortamı ile ara yüzey tanımlanmasına izin vermesidir (Şekil 2.13). Yükleme koşulları altında bir astar elemanı daha önce düğüm noktaları aracılığıyla bağlandığı zemin bölgesinden ayrılabilir ve meydana gelen kayma etkisine bağlı olarak düğüm noktaları zemin bölgesine ait farklı düğüm noktalarına tutunabilir özelliktedir. Astar elemanları, püskürtme betonla kaplı tünel yüzeyleri, gömülü boru yapıları veya istinat duvarları gibi ana zemin ortamı ile kayma etkileşiminin geliştiği ince duvarların modellenmesinde kullanılmaktadır [26].



Şekil 2.12 Astar yapısal birim elemanı şematik gösterimi [26]

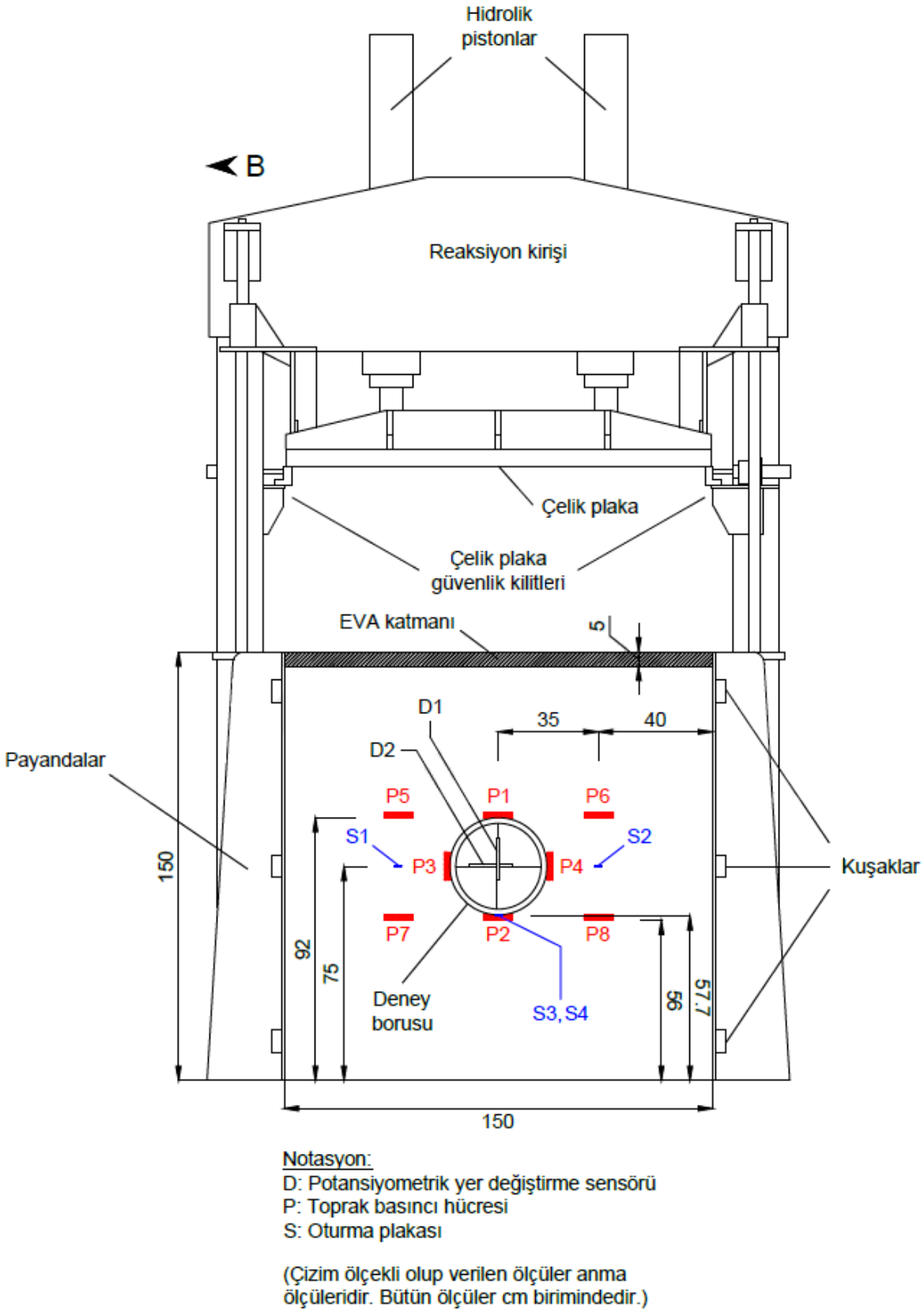


Şekil 2.13 Astar-zemin arayüzey etkileşiminin şematik gösterimi [26]

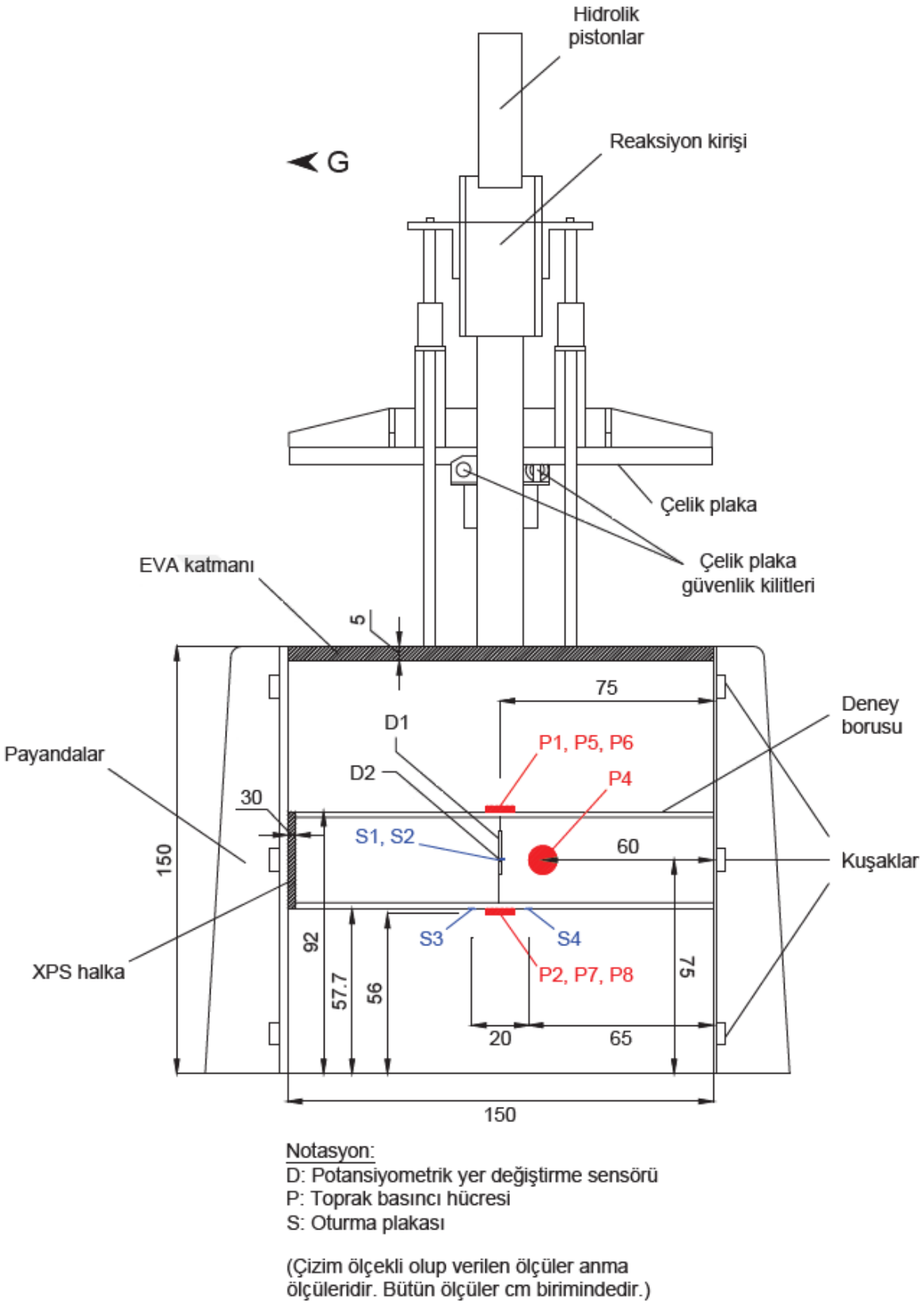
3
FLAC3D İLE BORU-ZEMİN İLİŞKİSİNİN MODELLENMESİ

3.1 GERÇEK ÖLÇEKLİ DENEY HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Göömülü termoplastik (HDPE) boruların düşey yükler altındaki davranışını ve boru etrafına farklı konfigürasyonlar şeklinde uygulanan EPS malzemenin yük altındaki boru davranışına etkilerini incelemek amacıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Prof.Dr.Kutay ÖZAYDIN Geoteknik Laboratuvarı'nda Akınay [1] tarafından bire bir ölçekli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen söz konusu deneyler "Borusuz Deney", "Referans Deney" ve "EPS'li Konfigürasyon Deneyleri" olmak üzere üç ana bölümden oluşmuştur. Bu kapsamda laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği 1,5m x 1,5m x 1,5m boyutlarındaki çelik tank, bu tank üzerinde yer alan ve 50 ton yükleme kapasitesine sahip iki adet hidrolik yükleyici ve bu sistemi stabil bir biçimde bir arada tutan destek elemanlarından oluşmuştur. Söz konusu deney sistemine ait ölçekli şematik gösterimler Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.

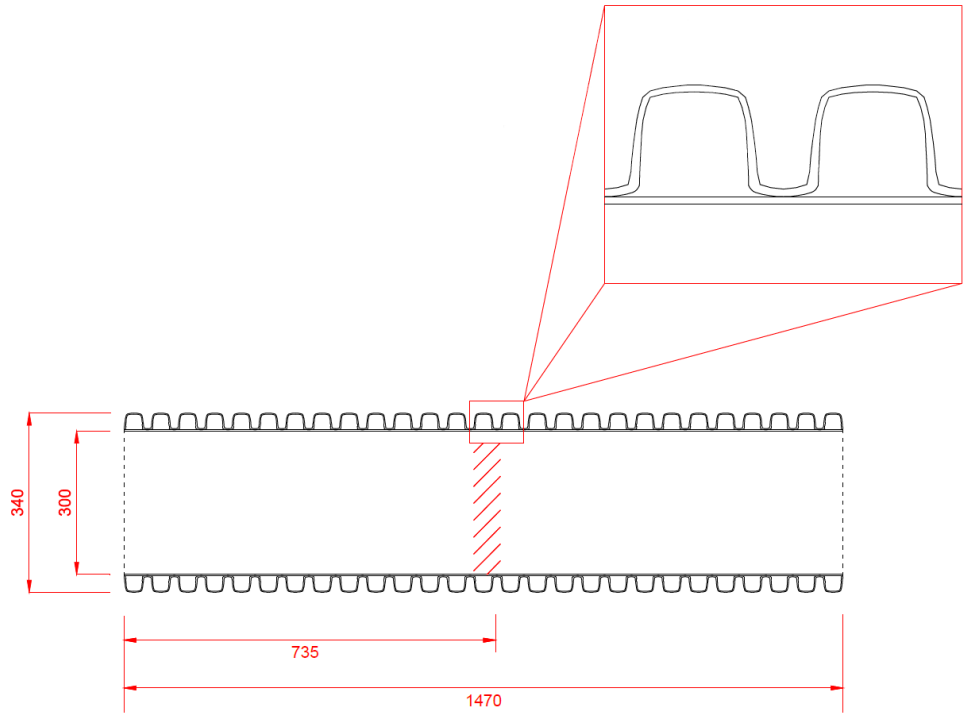


Şekil 3.1 Deney düzeneğinin doğu-batı doğrultusundaki şematik gösterimi ve borusuz ve referans deneyler için enstrümantasyon planı [1]

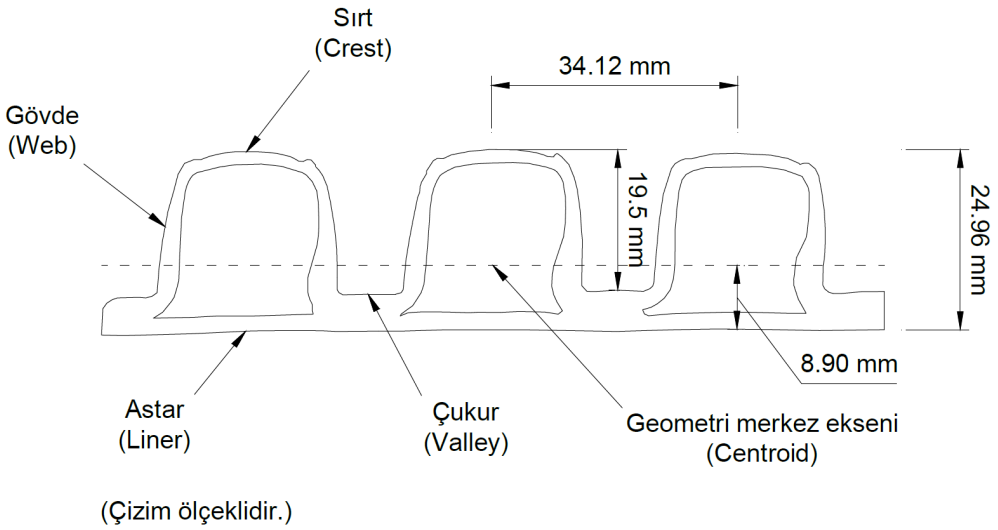


Şekil 3.2 Deney düzeneğinin güney-kuzey doğrultusundaki şematik gösterimi ve borusuz ve referans deneyler için enstrümantasyon planı [1]

Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen deneylerde kullanılan termoplastik koruge boru ise 300 mm iç, 340 mm dış çap ve 8 kPa halka rijitlik değerine sahip bir borudur. Söz konusu borunun temsili boykesit şeması ve boru duvarına ait ölçekli kesit sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

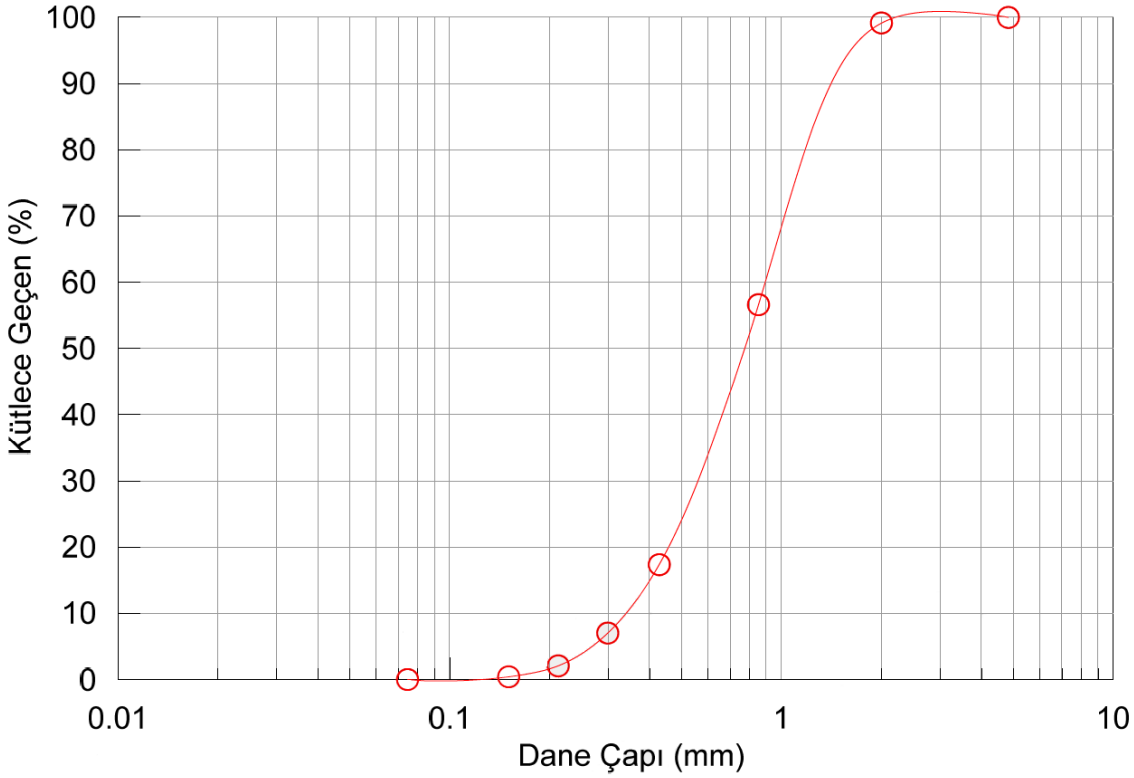


Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan HDPE boruyu ait temsili boykesit görünümü [1]



Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan HDPE boruya ait duvar kesiti [1]

Deneylerde geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kötü derecelenmiş temiz kum (SP) malzemesine ait dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.5'te, deney zemini indeks özellikleri ise Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Deney zeminine ait dane çapı dağılım eğrisi [1]

Tablo 3.1 Deney zemini indeks özellikleri [1]

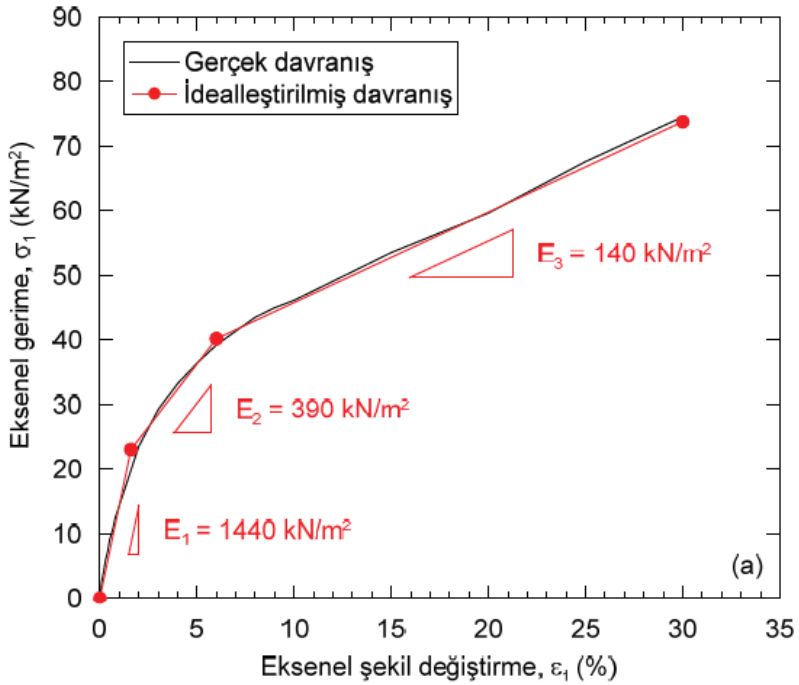
USCS Sembolü	**SP**
En büyük boşluk oranı (e_{max})	0.81
En küçük boşluk oranı (e_{min})	0.50
Özgül ağırlık (G_S)	2.65
Ortalama dane çapı (D_{50})(mm)	0.76
Efektif dane çapı (D_{10})(mm)	0.35
Uniformluk katsayısı (C_U)	2.57
Derecelenme katsayısı (C_C)	0.92

Gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinin ikinci aşamasında boru etrafına farklı konfigürasyonlarla uygulanan sıkışabilir katmanların düşey gerilmeler altında boru davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için deneylerde $10kg/m^3$ ve $15kg/m^3$ olmak üzere iki farklı yoğunluk değerinde EPS Geofoam malzeme kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan EPS bloklara ait malzeme parametrelerini belirlemek amacıyla, malzemeden alınan yüksekliği ve çapı 5 cm olan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir [1]. Serbest basınç deneylerinde kullanılan EPS numunelerine ait özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

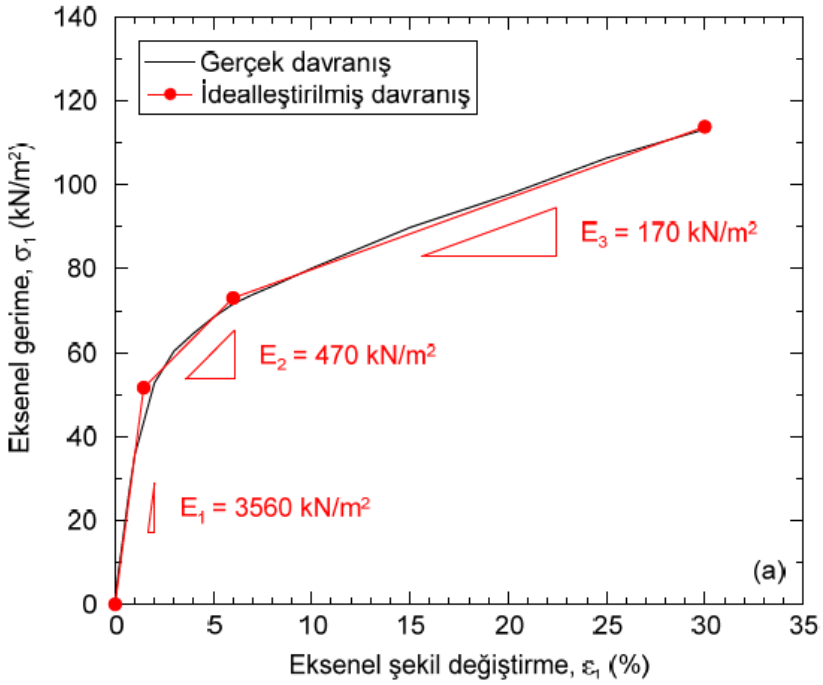
Tablo 3.2 Serbest basınç deneylerinde kullanılan EPS malzeme özellikleri [1]

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

EPS numuneleri üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonucunda EPS malzemelerine ait gerilme-şekil değiştirme davranışı belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan iki farklı yoğunluk değeri için de sonuçlar grafiklerle ifade edilmiştir. EPS10 ve EPS15 numuneleri için elde edilen gerçek ve idealleştirilmiş davranış biçimleri sırasıyla Şekil 3.6'da ve Şekil 3.7'de verilmiştir.

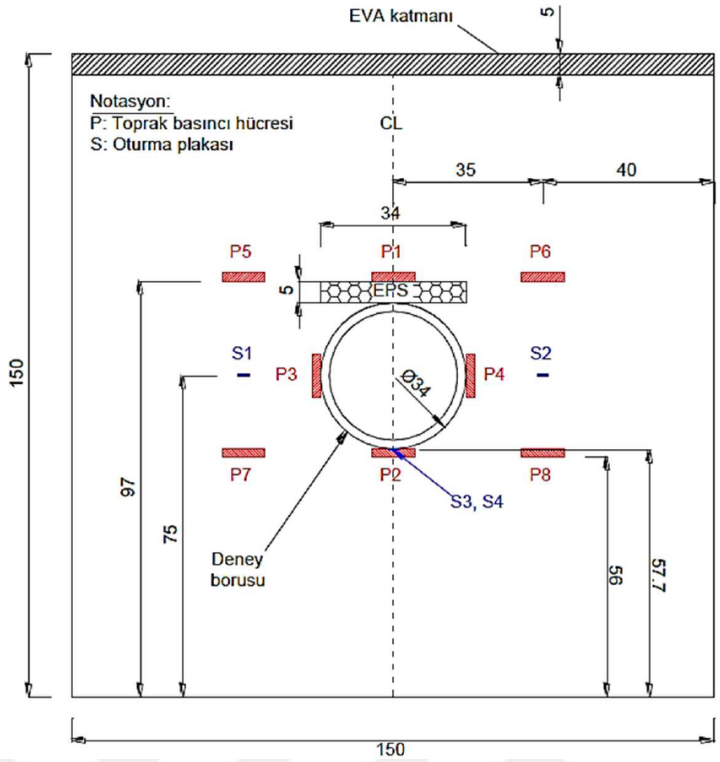


Şekil 3.6 EPS10 numunesi için eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [1]

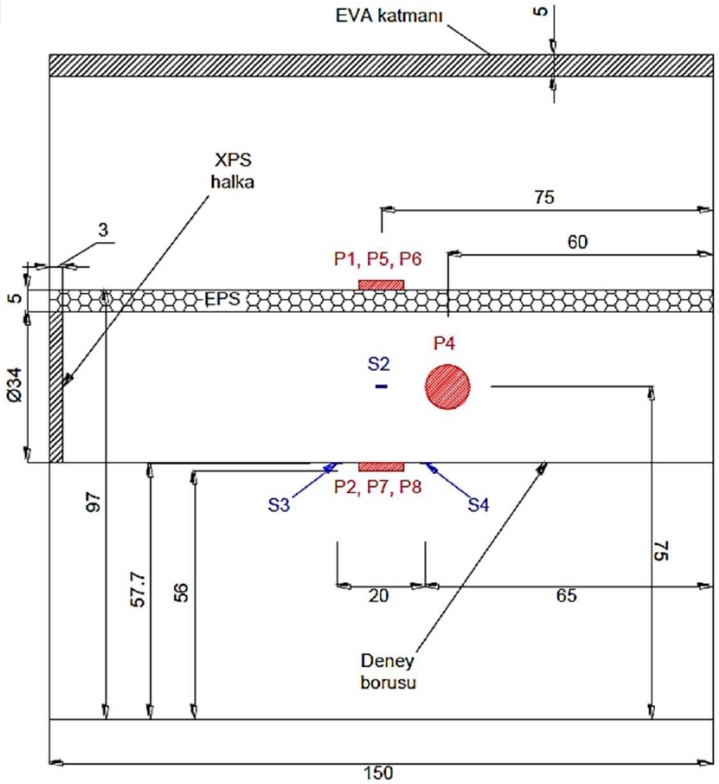


Şekil 3.7 EPS15 numunesi için eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [1]

Sıkışabilir malzeme olarak iki farklı yoğunluk değerinde EPS Geofoam kullanılarak gerçekleştirilen ikinci aşama deneylerde beş farklı EPS-boru yerleşim kombinasyonu uygulanarak farklı yerleşim biçimlerinin boru davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bununla beraber birinci aşama deneylerde uygulanan enstrümantasyona göre toprak basınç hücrelerinin ve oturma plakalarının konumlarında EPS dolayısıyla bazı değişliklerin yapılması zorunluluğu doğmuştur. İkinci aşama deneylerde EPS varlığı nedeniyle konumlarında değişliklik yapılan ölçüm aygıtlarına ait konumlar Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

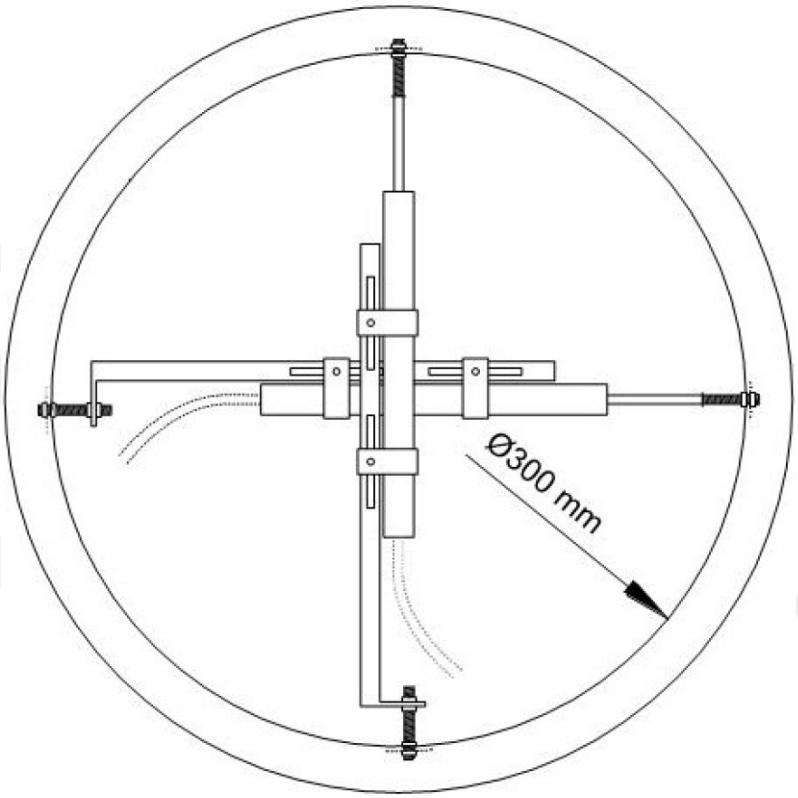


Şekil 3.8 İkinci aşama deneylerde uygulanan enstrümantasyon planı (doğu-batı doğrultusu) [1]



Şekil 3.9 İkinci aşama deneylerde uygulanan enstrümantasyon planı (güney-kuzey doğrultusu) [1]

Birinci ve ikinci aşama deneyler sırasında boru çevresindeki belirli noktalara yerleştirilen basınç ölçer ve oturma plakalarına ek olarak deneyler sırasında kullanılan HDPE borunun içerisine de sensörler yerleştirilmiştir. Boru içersine düşey ve yatay doğrultularda yerleştirilen potansiyometrik yer değiştirme transdüserleri ile de düşey (Δy) ve yatay (Δx) doğrultularda boruda meydana gelen esneme miktarları ölçülmüştür. Boru içerisine yerleştirilen potansiyometrik yer değiştirme sensörlerinin şematik gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir.



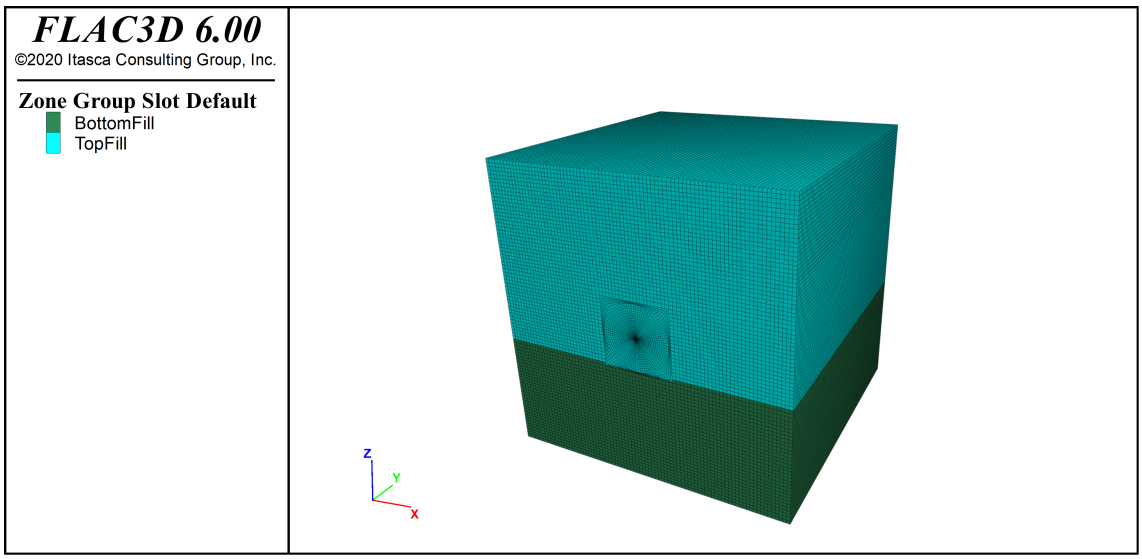
Şekil 3.10 Boru içerisine yerleştirilen potansiyometrik yer değiştirme sensörleri [1]

3.2 LABORATUVAR DENEYLERİNİN FLAC3D SONLU FARKLAR YAZILIMI İLE MODELLENMESİ VE MODEL PARAMETRELERİ İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN KALİBRASYON ÇALIŞMALARI

3.2.1 Borusuz Deney Modeli Kapsamında Gerçekleştirilen Çalışmalar

Laboratuvar deney analizleri kapsamında ilk aşama deney olarak gerçekleştirilen borusuz deney, deneyin gerçekleştirildiği çelik tank ve geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kum malzemeden oluşmaktadır. Borusuz deney analizlerinin gerçekleştirilmesindeki temel amaç kum malzemenin, borunun olmadığı durumdaki davranışını incelemek, gerçekleştirilecek sayısal analizlerde kullanmak üzere geri dolgu malzemesine ait malzeme parametrelerinin kalibrasyonunu gerçekleştirmek ve tank – kum ara yüzey davranışını incelemektir [1].

FLAC3D yazılımında modellenen ve kademeli olarak artan yükler altında analizleri gerçekleştirilen borusuz deney analizlerinde, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen gerçek ölçekli model deney [1] esas alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle deney sistemini oluşturan kum geri dolgu malzemesinin geometrik model oluşturulmuştur. Çelik tank yerine ise “zone face apply velocity-normal 0” komutu kullanılarak sınır koşullar tanımlanmıştır. Ayrıca gerçek deney modelinde olduğu gibi kum malzemenin z = 0.60 m yüksekliğe kadar nispeten daha sıkı yerleştirildiği kabul edildiğinden, söz konusu yüksekliğe kadar olan kısım “alt kum” bu yüksekliğin üzerindeki kısım “üst kum” olarak ayrılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Geometrik modelde yer alan alt kum ve üst kum katmanları

Farklı iki kum katmanında kullanılan parametrelerin bir kısmı deneyden elde edilen parametrelerin doğrudan kullanılmasıyla (γ_k, ϕ^o, ψ^o), diğer parametrelerin ise (E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}, m ve R_f) deneme yanılma yoluyla FLAC3D programında kalibrasyonunun yapılması suretiyle elde edilmiştir.

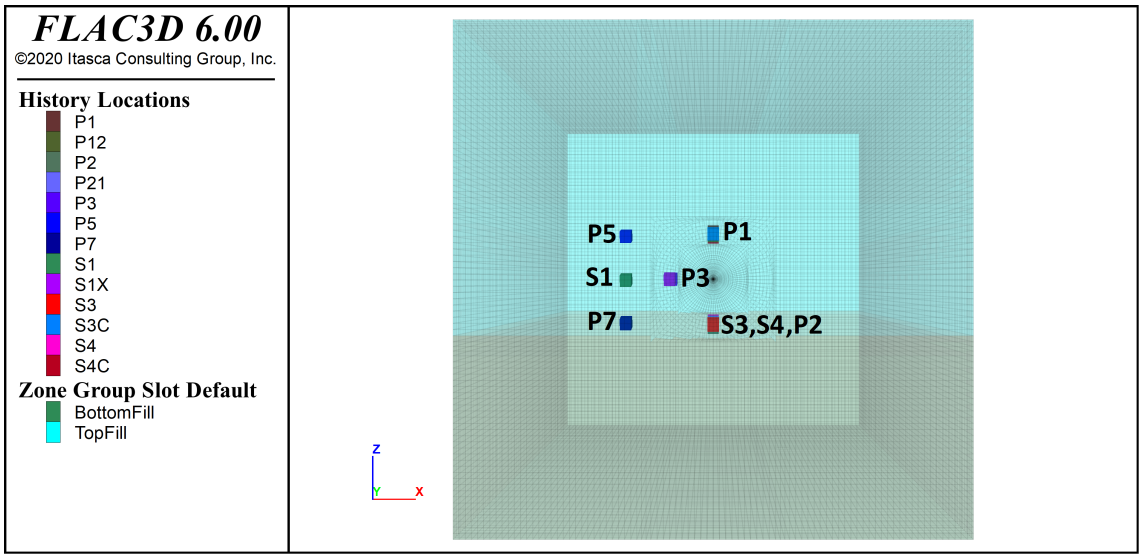
3.2.1.1 Borusuz Deney Sayısal Modelinin Oluşturulması

Borusuz deney aşamasında gerçekleştirilen deneylerin ardından Plaxis2D yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal analizlerde kum malzeme "Pekleşen Zemin Modeli" olarak tanımlanmıştır [1]. Bu nedenle FLAC3D yazılımı ile yapılan analizlerde bazı farklı malzeme modelleri denenmiş, kabul edilebilir sonuçlar elde edilememiş ve nihai olarak kum zemin modeli için "Plastic-Hardening (PH) Model" kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan PH modele ait parametreler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Kum zemine ait malzeme parametreleri

Model Parametresi	Üst Kum	Alt Kum
$\gamma_k(kN/m^3)$	15	15.5
$E_{50}^{ref}(MPa)$	11	70
$E_{oed}^{ref}(MPa)$	11	70
$E_{ur}^{ref}(MPa)$	44	280
$m(-)$	0.999	0.999
$\phi(^o)$	30	35
$\psi(^o)$	0.0	5.0
$c(kN/m^2)$	0.1	0.1
$failure-ratio,(R_f)$	0.9	0.9

Borusuz deney sistemine ait sayısal model oluşturulduktan sonra laboratuvar deneyinde sistemin belirli noktalarına yerleştirilen basınç ve deplasman ölçer cihazların denk geldikleri konumlardan ilgili hesap verilerinin alınabilmesi amacıyla FLAC3D yazılımı içerisindeki "zone history" komutu kullanılarak ölçüm noktaları tanımlanmış ve bu noktalarda elde edilen basınç ve gerilme değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca borusuz deney sisteminde boru yer almadığından borunun temsil ettiği hacim gerçek deneyde de olduğu gibi kum olarak tanımlanmış, bununla birlikte kesitlerde gösterilen S1, S3 ve S4 oturma plakaları ile P1, P2, P3, P5 ve P7 basınç ölçerlerine karşılık gelen ölçüm noktaları model geometrisinde belirtilen koordinat noktalarına yerleştirilmiştir. FLAC3D yazılımında oluşturulan borusuz analiz sayısal modeli üzerinde yer alan oturma plakaları ve toprak basınç hücrelerinin model üzerindeki konumları Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

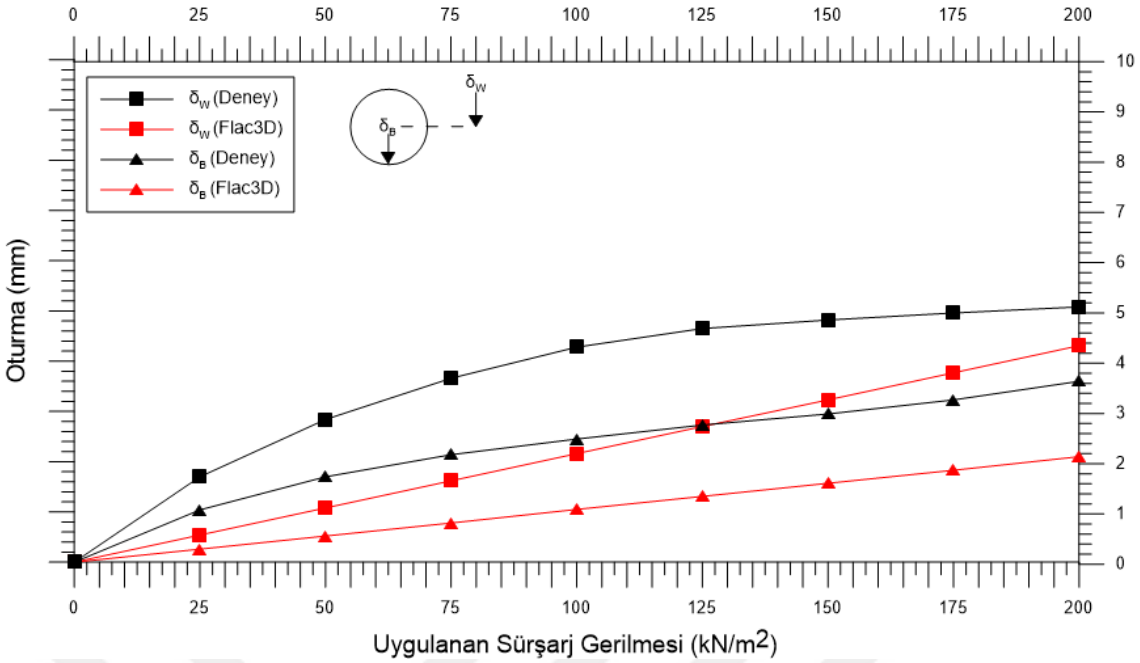


Şekil 3.12 FLAC3D borusuz modelinde yer alan oturma ve gerilme noktalarının konumları

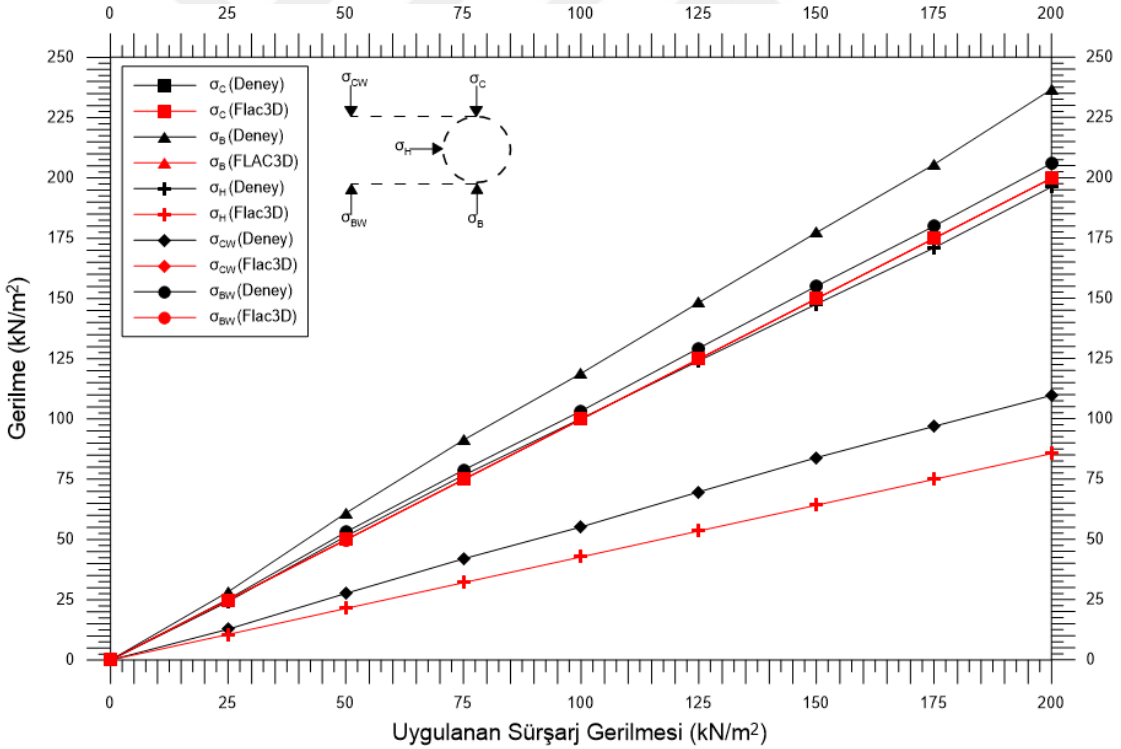
3.2.1.2 Borusuz Deney Sayısal Modeli Parametrelerinin Kalibrasyonu Amacıyla Gerçekleştirilen Çalışmalar

Akınay [1] tarafından laboratuvar ortamında gerçekleştirilen gerçek ölçekli laboratuvar deneyleri dizisinin ilk aşaması olan borusuz deneyde kum malzeme için parametrik kalibrasyonun gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Buna paralel olarak bu çalışma kapsamında üretilen FLAC3D sayısal modelinin tek bileşeni olan kum geometrisine ait malzeme parametrelerinin kalibrasyonu yapılmaya çalışılmış ve elde edilen sonuçlar gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılarak gerçek deneyde elde edilen sonuçlara yaklaşılmaya çalışılmıştır. Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen Plaxis2D sayısal analiz çalışmasında kum malzeme için Hardening-Soil (HS) model kullanılması nedeniyle bu çalışma kapsamında aynı modelin kullanılması uygun görülse de; öncelikle kullanılması durumunda vereceği sonuçların değerlendirilmesi amacıyla farklı modeller ile analizler gerçekleştirilmiş ve laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla ilk etapta kum zemin FLAC3D içerisinde tanımlı malzeme modellerinden olan "elastik model" olarak tanımlanmış ve ardından elastik modele ait gerekli makul parametreler tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Elastik kum modeli ile gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları ile borusuz laboratuvar deneyine ait oturma ve gerilme sonuçları sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te karşılaştırılmıştır.

Elastik malzeme olarak tanımlanan kum katmanlarının sayısal analiz sonuçlarının gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda, laboratuvar koşullarında artan sürşarj yükleri altında gözlemlenen davranışının elastik sayısal model ile elde edilemediği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlarda özellikle kum S1 (δ_W)



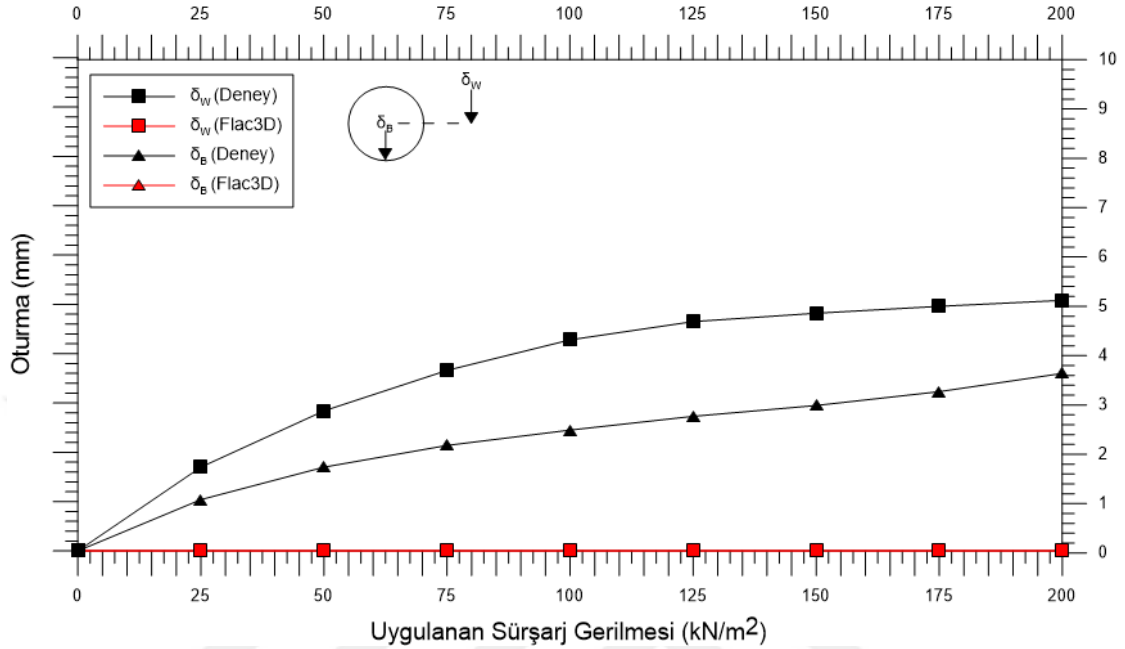
Şekil 3.13 Borusuz deney analizlerinde elastik kum modeli ile elde edilen oturma sonuçları



Şekil 3.14 Borusuz deney analizlerinde elastik kum modeli ile elde edilen gerilme sonuçları

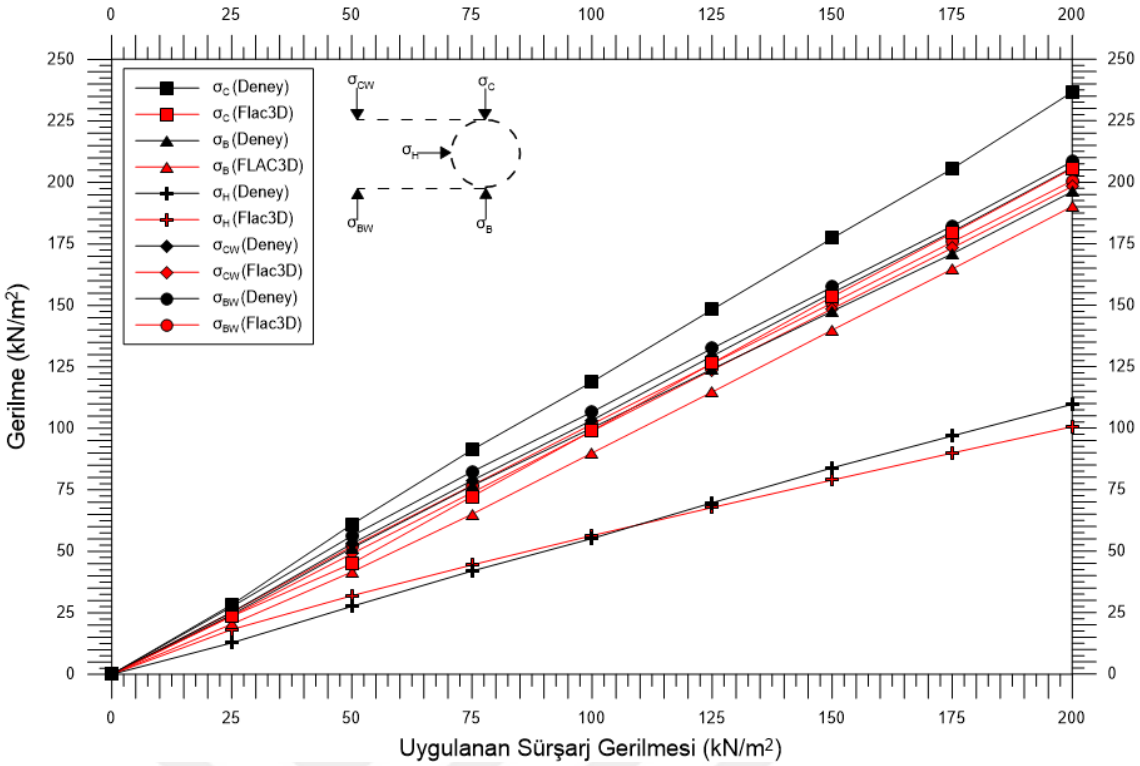
ve S3 (δ_B) oturma plakalarında elde edilen sonuçlara göre gerçek koşullarda yük altında pekleşme davranışı gösteren kum malzemenin elastik model ile tanımlanması durumunda bu davranışı gösteremediği ve oturma miktarları bakımından da gerçek deney sonuçlarına yaklaşamadığı saptanmıştır.

Bu kapsamda gerçekleştirilen sayısal analiz serilerinin devamında kum zemin için CapYield (CY) malzeme modeli denenmiştir. CY model ile elde edilen oturma ve gerilme sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırılması ise sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da sunulmuştur.



Şekil 3.15 Borusuz deney analizlerinde CY kum modeli ile elde edilen oturma sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması [1]

CapYield (CY) model ile tanımlanan kum zemin davranışının da gerçek deney sonuçları ile karşılaştırıldığında sağlıklı ve kabul edilebilir sonuçlar vermemesi sebebiyle, kullanılması muhtemel malzeme modelleri arasından CapYield model de çıkarılmış ve analizlere Plastic-Hardening model ile devam edilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla, PH modele ait kum zemin parametreleri olan ve Tablo 3.3'te verilen sayısal model parametreleri üzerinde yüzlerce saate varan onlarca farklı kombinasyonda oluşturulan değerler ile analizler gerçekleştirilmiş ve hem parametrelerin tekil değişimlerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri hem de parametreler arasındaki ilişki ve dolayısıyla malzeme modelinin çalışma prensiplerine ait veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Plastic-Hardening zemin modeli için gerçekleştirilen farklı parametrik kombinasyonların oldukça sınırlı bir kısmı Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.16 Borusuz deney analizlerinde CY kum modeli ile elde edilen gerilme sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması [1]

Tablo 3.4'te verilen sonuçlarda "Durum/Hata" sütununda, gerçekleştirilen analizlerden başarı ile sonuçlananlar "sonuçlandı" etiketi ile, analizde sistemin denge durumuna ulaşması aşamasında "over 50 iterations in jacobi" uyarısı vererek çözümün yarıda kesildiği analizler ise "hata:jacobi" etiketi ile ifade edilmiştir. Ancak bu aşamada Tablo 3.4'te verilen parametrelerle başarı ile sonuçlanmış olan 11 farklı analizden istenen sonuçlar elde edilememiştir. Bu aşamada birçok farklı parametre kombinasyonu denenmesine rağmen elde edilen sonuçların başarısız olması dolayısıyla çeşitli alternatif çözüm yöntemleri düşünülmüş ve sonuç olarak deney geometrisine sadık kalınmak koşuluyla FLAC3D yazılımı bünyesinde üretilen geometrinin mesh boyutlarında değişiklik yapıldığı takdirde daha sağlıklı sonuçların elde edilebileceği öngörülmüştür. Revize edilen yeni sayısal modelde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Plastic-Hardening model zemin parametrelerinin kalibrasyonunda gerçekleştirilen farklı parametre kombinasyonları

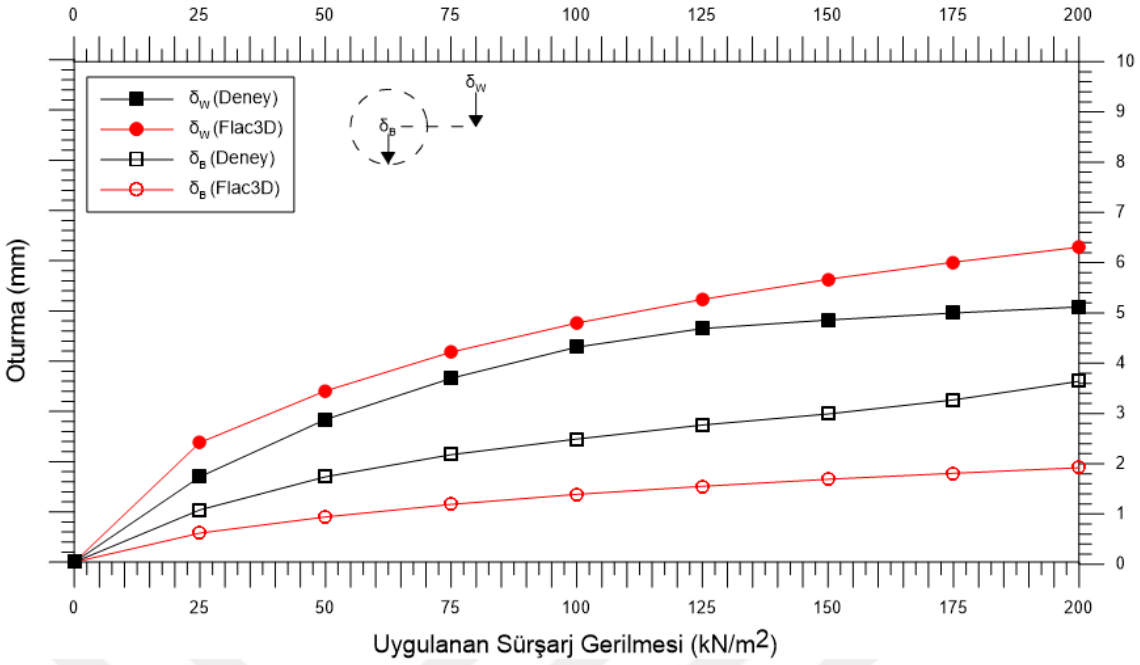
Analiz No	Üst Kum			Alt Kum			Durum/Hata
	Rf	m	E	Rf	m	E	
Analiz 1	0.6	0.3	30	0.6	0.3	45	sonuçlandı
Analiz 2	0.6	0.3	30	0.6	0.3	60	hata:jacobi
Analiz 3	0.51	0.3	30	0.51	0.3	60	sonuçlandı
Analiz 4	0.51	0.3	30	0.51	0.3	45	hata:jacobi
Analiz 5	0.51	0.3	30	0.51	0.3	30	sonuçlandı
Analiz 6	0.51	0.6	30	0.51	0.6	60	sonuçlandı
Analiz 7	0.51	0.6	30	0.51	0.6	45	hata:jacobi
Analiz 8	0.6	0.6	30	0.6	0.6	45	hata:jacobi
Analiz 9	1.0	0.3	30	1.0	0.3	45	sonuçlandı
Analiz 10	0.9	0.999	15	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 11	0.9	0.999	45	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 12	0.9	0.999	30	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 13	0.999	0.9	30	0.999	0.9	60	hata:jacobi
Analiz 14	0.9	0.9	30	0.9	0.9	60	hata:jacobi
Analiz 15	0.9	0.8	30	0.9	0.8	60	hata:jacobi
Analiz 16	0.9	0.95	30	0.9	0.95	60	hata:jacobi
Analiz 17	0.95	0.999	30	0.95	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 18	0.999	0.999	30	0.999	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 19	0.999	0.999	25	0.999	0.999	60	hata:jacobi
Analiz 20	0.999	0.999	26	0.999	0.999	60	sonuçlandı

Tablo 3.5 Revize edilen yeni sayısal modelde kullanılan PH modele ait kum parametreleri

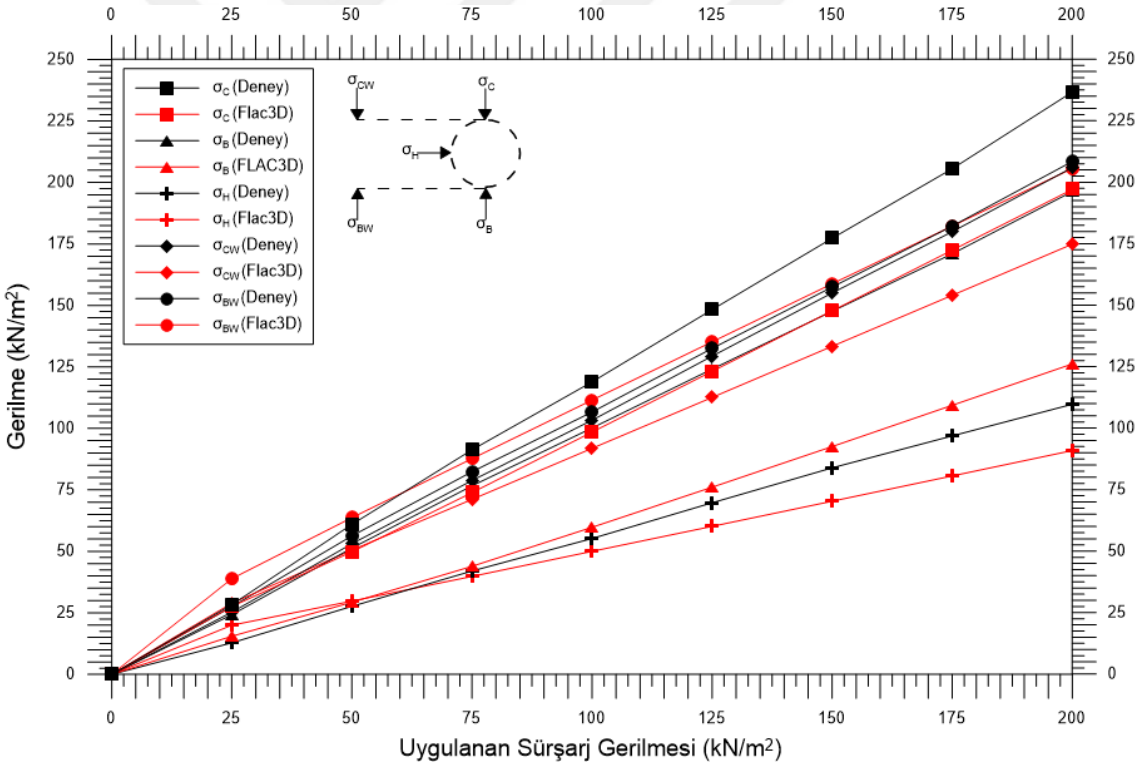
Analiz No	Üst Kum			Alt Kum			Durum/Hata
	Rf	m	E	Rf	m	E	
Analiz 1	0.9	0.999	11	0.9	0.999	70	sonuçlandı

Tablo 3.5'te verilen kum zemin parametreleri ile elde edilen analiz sonuçları ise Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilmiştir.

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'da elde edilen sonuçlardan hareketle üretilen son sayısal geometri ve Tablo 3.5'te verilen kum zemin parametrelerinin kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.17 Revize edilen mesh üzerinden elde edilen oturma sonuçları



Şekil 3.18 Revize edilen mesh üzerinden elde edilen gerilme sonuçları

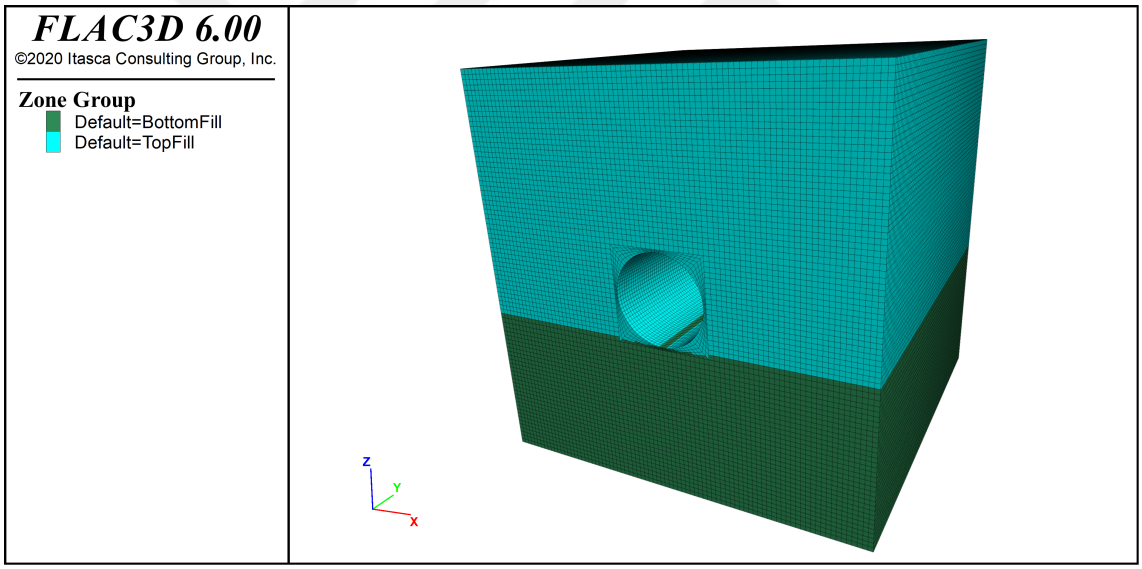
3.2.2 Referans Deney Modeli Kapsamında Gerçekleştirilen Çalışmalar

3.2.2.1 Referans Deney Sayısal Modelinin Oluşturulması

Laboratuvar deneyleri kapsamında ikinci aşama deney olarak gerçekleştirilen referans deney sistemi, deneyin gerçekleştirildiği çelik tank, HDPE boru ve geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kum malzemeden oluşmaktadır. Referans deney

analizlerinin gerçekleştirilmesindeki temel amaç düşey yükler altında boru davranışını gözlemlemek ve borunun da yer aldığı deney sisteminde boru – kum ara yüzeyi parametrelerinin FLAC3D programında kalibrasyonunu yapmaktır.

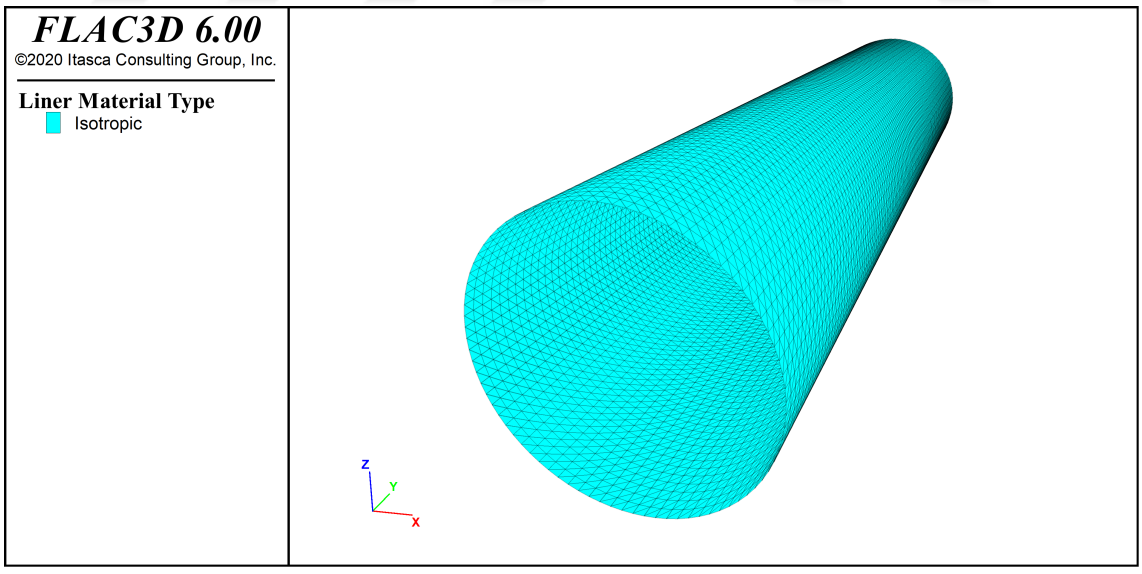
FLAC3D programında modellenen ve kademeli olarak artan sürşarj yükü altında analizleri gerçekleştirilen referans analizlerde, Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen model deney esas alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle deney sistemini oluşturan, HDPE boru ve geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kum malzemenin geometrik modeli oluşturulmuştur. Çelik tank yerine borusuz deneyde uygulandığı gibi "zone face apply velocity-normal 0" komutu kullanılarak sınır koşullar tanımlanmıştır. Aynı şekilde gerçek deney modelinde olduğu gibi kum malzemenin z = 0.60 m yüksekliğe kadar olan kısım "alt kum" bu yüksekliğin üzerindeki kısım üst kum olarak ayrılmış; HDPE boru da bu iki katman arasında yer almıştır (Şekil 3.19). Bununla beraber referans deneyin modellenmesinde geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kum malzemenin özellikleri tanımlanırken borusuz deneyde kalibrasyonu yapılan parametreler kullanılmıştır.



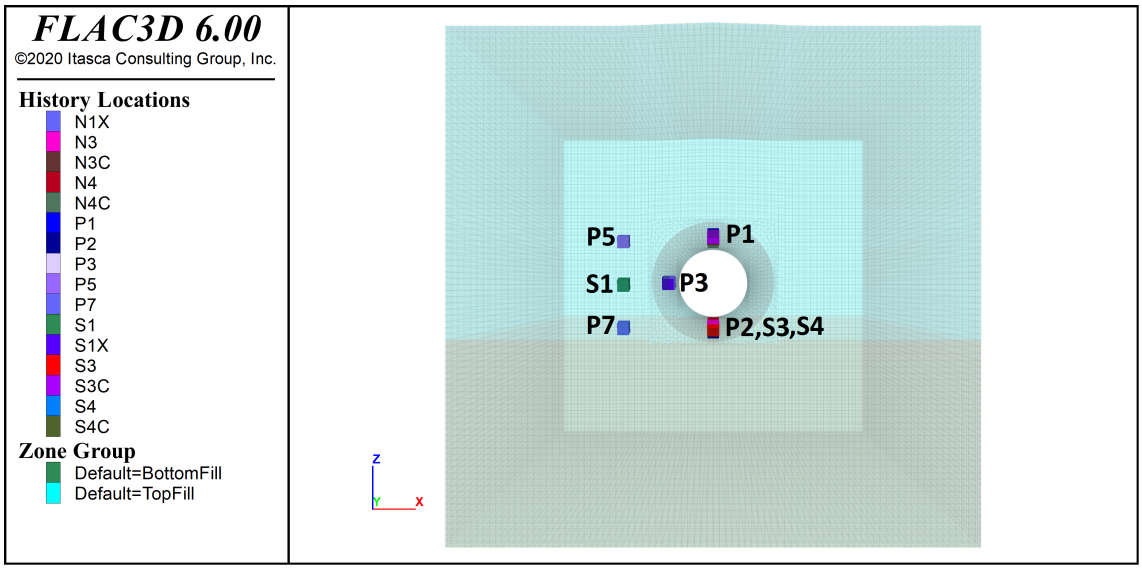
Şekil 3.19 FLAC3D yazılımında üretilen referans deneye ait kum zemin modeli

Öte yandan referans deney modeli için FLAC3D ile sayısal model oluşturulurken boru hacmini temsil eden yüzey üzerinde astar (liner) yapısal elemanı kullanılmıştır (Şekil 3.20). FLAC3D içerisinde yer alan yapısal elemanların kullanım amaçlarına uygun olarak boru geometrisinin modellenmesinde kullanılabilecek yapısal elemanlar kabuk tipindeki (Kabuk, Astar, Geogrid) üç düğüm noktalı birim elemanlardan oluşan yapısal destek elemanlarıdır (Bkz. Bölüm 2.2.3). Söz konusu bu yapısal destek elemanlarından kabuk elemanı boru geometrilerinin sayısal modellenmesinde literatürde sıkça kullanıldığı gözlenmiştir. Ancak FLAC3D yapısal destek elemanı

mantığı içerisinde kabuk destek elemanları çevrelediği bölgelerde ara yüzey etkileşimine izin vermemektedir. Başka bir ifadeyle kabuk yapısal destek elemanları üretildiği aralıkta etkileşime girdiği zemin ortamına ait düğüm noktalarıyla tam rijit bağlantı kurmakta, kum zemine ait düğüm noktalarına tam anlamıyla yapışarak boru modelinin zemin ile bir bütün gibi davranmasını sağlamaktadır. Ancak Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen deneylerde ve Plaxis2D sayısal analizlerinde HDPE boru ile kum zemin arasındaki ara yüzey etkileşimi dikkate alınmıştır. Bu durumda FLAC3D içerisindeki diğer bir yapısal destek elemanı olan astar (liner) elemanının kullanılması uygun görülmüştür. Kısaca tekrar etmek gerekirse astar yapısal elemanı üretildiği aralıkta çevrelediği zemin ortamına ait düğüm noktalarıyla bağlantılar yapmaya izin verirken aynı zamanda arayüzeyde kayma etkileşiminin gerçekleşmesine de izin vermektedir. Örneğin bir astar elemanı düğüm noktaları üzerinden bağlandığı zemin ortamında yükleme koşulları oluştuğunda arayüzeyde kayma davranışına izin vererek, zemin ile astar elemanının bağlı düğüm noktaları kopabilmekte, zemin ve astar elemanı birbiri üzerinde kayabilmekte ve bu etkileşim sırasında astar elemanına ait düğüm noktaları ortamda zemine ait boşta düğüm noktalarına denk geldiğinde tekrar bağlanabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında boru modeli için kullanılabilecek en uygun yapısal destek elemanının astar elemanı olduğu sonucuna varılmıştır. Referans deney sisteminde yerleştirilen basınç ölçer ve oturma plakalarının FLAC3D modelinde karşılık geldiği noktalar ise Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 FLAC3D yazılımında üretilen boru modeli



Şekil 3.21 FLAC3D yazılımında üretilen referans model üzerindeki basınç ve oturma ölçer cihazların konumları

FLAC3D yazılımında modellenen referans deney sisteminde yer alan boru geometrisi ise laboratuvar deneyinde kullanılan boru özelliklerine bağlı kalınarak "elastik(izotropik) model" olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan boru duvarı için kullanılan malzeme parametreleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Boru duvarına ait malzeme parametreleri

Model Parametresi	Değer
Elastisite Modülü, (Pa)	390e6
Poisson Oranı, (-)	0.46
Boru Et Kalınlığı, (m)	0.018
Yoğunluk (kg/m^3)	1.5e3
coupling-stiffness-normal (Pa)	60e8
coupling-stiffness-shear (Pa)	60e8
coupling-friction-shear (^{o})	20.1
coupling-cohesion-shear (Pa)	0.067

3.2.2.2 Referans Deney Sayısal Modeli Parametrelerinin Kalibrasyonu Amacıyla Gerçekleştirilen Çalışmalar

Referans deney analizleri kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, borusuz deney analizlerinden elde edilen kum zemin parametreleri kullanılmıştır. Ancak referans deney modelinde kum zemine ait parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla bir dizi parametrik analiz gerçekleştirilmiş ve kum zemin parametrelerindeki olası değişimlerin referans deney modeli üzerindeki etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 22 farklı parametrik kombinasyon ile analizler gerçekleştirilmiş ve bu parametre kombinasyonları Tablo 3.7'de gösterilmiştir. "Analiz 18" ve "Analiz 19" çalışmalarında üst kum için iki farklı elastisite modülü tanımlanması durumunun sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi amacıyla kademeli yükleme aşamasında 125 kPa'a kadar olan yüklemelerde tablo 3.7'de ilgili hücrede okunan ilk elastisite modülü değeri, 125 kPa'dan itibaren ise ikinci elastiste modülü değeri tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen 22 farklı analiz sonucunda gerçek deney sonuçlarına en yakın sonuçlar borusuz analiz çalışmasında elde edilen kum zemin parametrelerinin kullanıldığı "Analiz 16" olmuştur. Bununla birlikte, referans deney geometrisi üzerinde uygulanan parametre değişimleri sonucunda gözlemlemlenen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Alt kum malzemesine ait elastisite modülü değeri azaltıldığında boru yan seviyesinde (S1) hesaplanan oturma miktarı artarken, boru tabanındaki (S3) oturma miktarında azalma gözlenmiştir. Ayrıca alt kum malzemesine ait elastisite modülü değeri azaltıldığında boru taç seviyesinde (P1) hesaplanan gerilmeler sabit kalırken, boru tabanındaki (P2) gerilmelerde azalış, boru yan yüzeyindeki (P3) yatay gerilmeler ile boru taç (P5) ve taban (P7) seviyelerinin 35 cm açığındaki noktalarda gerilme artışları gözlenmiştir.

- Üst kum malzemesine ait elastisite modülü değeri azaltıldığında boru yan seviyesinde (S1) ve boru tabanında (S3) hesaplanan oturma miktarlarında artış gözlenmiştir. Ayrıca boru taç seviyesinde (P1), boru tabanında (P2) gerilme artışları; boru taç seyiyesinin (P5) ve boru taban seviyesinin (P7) 35 cm açığında hesaplanan düşey gerilmelerde azalış; boru yanındaki düşey gerilmede (P3) ise azalış gözlenmiştir.

- Hem alt hem de üst kum katmanlarında kullanılan üstel katsayı değeri 0.999 değerinden 0.5 değerine düşürüldüğünde S1 ve S3 noktalarında hesaplanan oturma değerlerinde azalmalar görülmüştür. Bu durumda hesaplanan gerilme değerlerinden P1 ve P7'de azalış; P2, P3 ve P5'te artışların gerçekleştiği kaydedilmiştir.

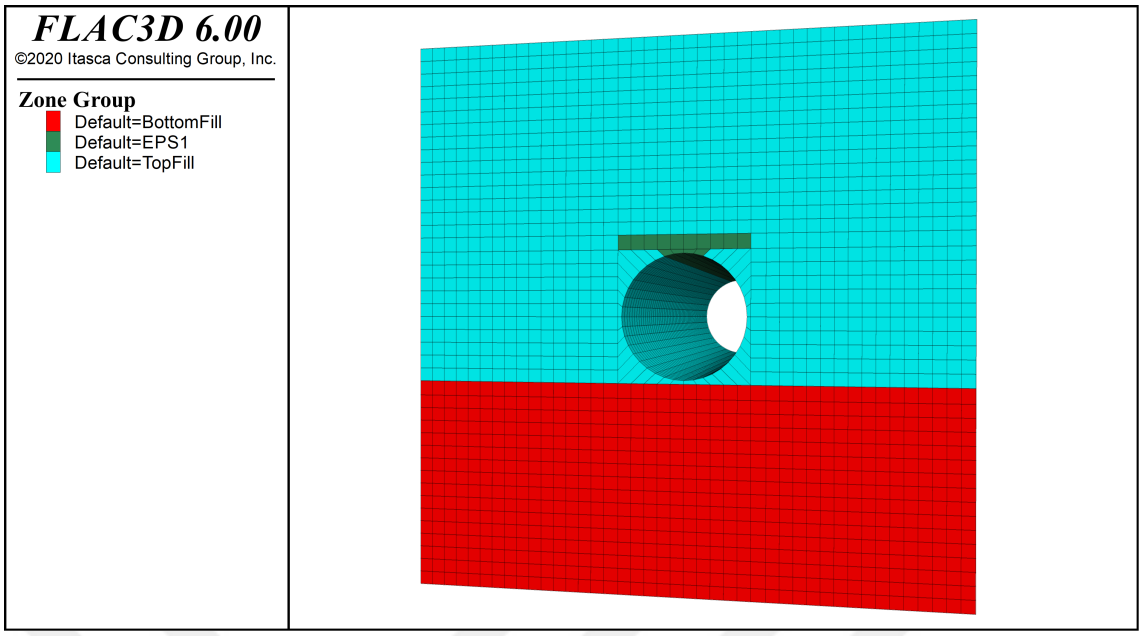
Tablo 3.7 Referans Deney analizleri kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara ait malzeme parametreleri

Analiz No	Üst Kum			Alt Kum			Durum/Hata
	Rf	m	E	Rf	m	E	
Analiz 1	0.999	0.999	25.1	0.999	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 2	0.999	0.999	23	0.999	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 3	0.999	0.999	21	0.999	0.999	50	sonuçlandı
Analiz 4	0.999	0.999	22	0.999	0.999	55	hata
Analiz 5	0.9	0.999	22	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 6	0.9	0.999	22	0.9	0.999	60	hata
Analiz 7	0.9	0.999	22	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 8	0.9	0.999	18	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 9	0.9	0.999	22	0.9	0.999	60	hata
Analiz 10	0.9	0.999	14	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 11	0.9	0.999	14	0.9	0.999	40	sonuçlandı
Analiz 12	0.9	0.999	10	0.9	0.999	40	hata
Analiz 13	0.9	0.999	11	0.9	0.999	60	sonuçlandı
Analiz 14	0.9	0.999	11	0.9	0.999	70	sonuçlandı
Analiz 15	0.9	0.999	11	0.9	0.999	70	hata
Analiz 16	0.9	0.999	11	0.9	0.999	70	sonuçlandı
Analiz 17	0.9	0.5	11	0.9	0.5	70	sonuçlandı
Analiz 18	0.9	0.999	7.5/11	0.9	0.5	70	sonuçlandı
Analiz 19	0.9	0.999	11/13	0.9	0.5	70	sonuçlandı
Analiz 20	0.9	0.999	18	0.9	0.999	40	hata
Analiz 21	0.9	0.999	18	0.9	0.999	30	hata
Analiz 22	0.9	0.999	18	0.9	0.999	18	sonuçlandı

3.2.3 EPS Konfigürasyonlu Deney Modeli Kapsamında Gerçekleştirilen Çalışmalar

EPS'li konfigürasyonları içeren analizler kapsamında Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen EPS'li konfigürasyon deneylerinin ilk modeli olan "Konfigürasyon-1" e ait sayısal model oluşturulmuştur. Söz konusu sayısal model, referans model geometrisi üzerindeki ilgili koordinat aralığının EPS malzeme olarak tanımlanması yoluyla üretilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm EPS'li analizlerde yoğunluğu $10 kg/m^3$ olan EPS10 sert köpük malzeme modellenmiştir. Üretilen ilk sayısal modele ait görsel Şekil 3.22'de verilmiştir.

Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen gerçek ölçekli laboratuvar deneylerinin EPS'li konfigürasyonları aşamasında EPS malzemenin davranışının net bir biçimde tanımlanabilmesi için mevcut deneylere ek olarak yüksekliği ve çapı 5 cm olan silindirik numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve EPS malzeme parametreleri belirlenmiştir. Söz konusu bu testler sonucunda EPS malzeme davranışı üç doğrusal parçalı elastik bir malzeme olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.6



Şekil 3.22 FLAC3D yazılımında oluşturulan EPS-1 konfigürasyonuna ait sayısal model

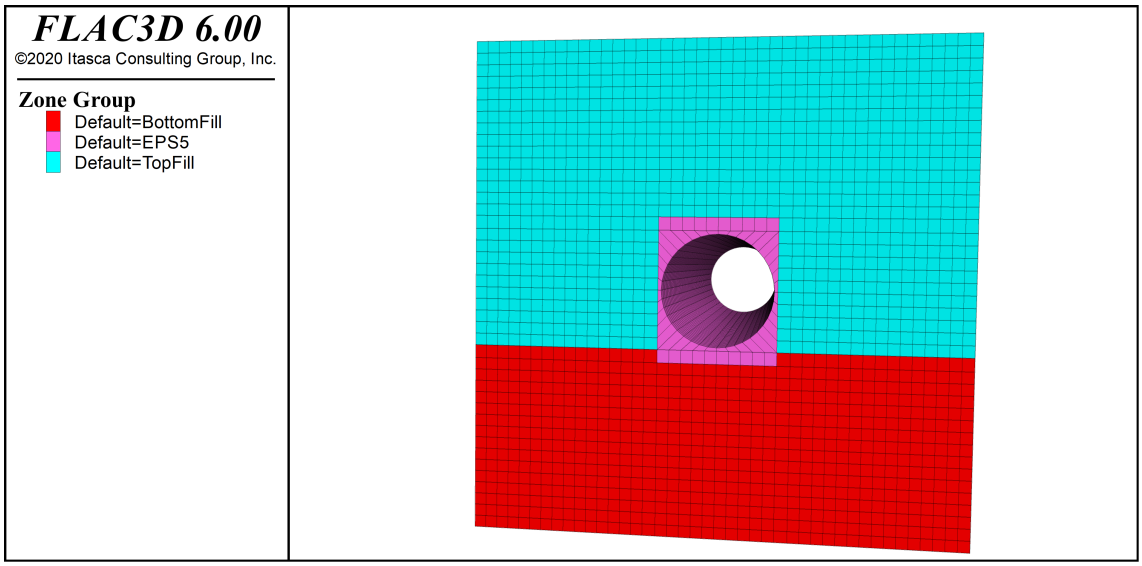
ve Şekil 3.7). Buradan hareketle FLAC3D yazılımında EPS malzeme modellenirken üç doğrusal parçalı elastik davranış gösteren bir malzeme olarak dikkate alınmıştır. Bu amaçla FLAC3D yazılımı bünyesinde mevcut analizlere ek olarak laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen serbest basınç deneyi de simüle edilmiş ve her doğrusal parça için gerçek deneyden elde edilen sonuçlardan hareketle idealleştirilen eğrinin her bir doğrusal parçasının eğiminden yola çıkılarak her parça için uygun kohezyon (c) değerleri elde edilmiştir. % 1.60, % 6 ve % 30 şekil değiştirmelere karşılık elde edilen kohezyon (c) değerleri Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8 EPS için üç doğrusal parçalı elastik malzeme özellikleri

ε (%)	Kohezyon (kPa)
1.60 %	30
6 %	44.5
30 %	59

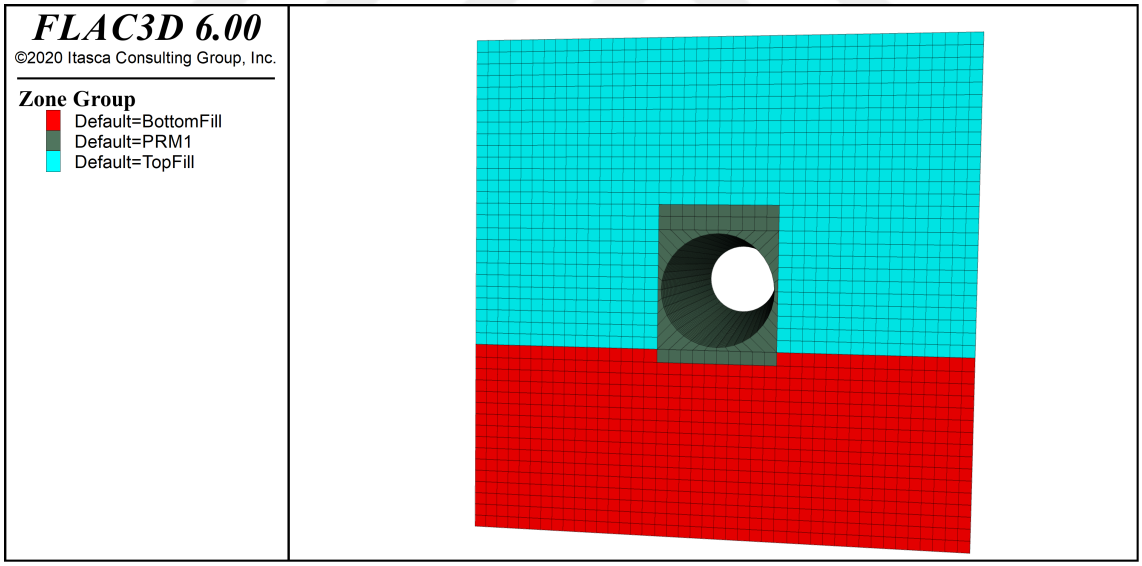
FLAC3D analizleri çerçevesinde gerçekleştirilen bir diğer konfigürasyon ise Akınay [1] tarafından "Konfigürasyon-5" olarak tanımlanan geometri üzerinde gerçekleştirilen analizler olmuştur. FLAC3D yazılımında üretilen "Konfigürasyon-5" modeli Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen sayısal analizlerin son aşamasında ise çeşitli kombinasyonların denendiği parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu bu parametrik analizlerden en belirgin farklı sonuç veren iki parametrik analiz de "Konfigürasyon-5" modeli üzerinde gerçekleştirilirken söz konusu analizlerin



Şekil 3.23 FLAC3D yazılımında oluşturulan EPS-5 konfigürasyonuna ait sayısal model

birincisinde mevcut EPS'ye ek olarak EPS üst kısmına 5 cm kalınlığında EPS levha eklenmiştir. "PRM-1" olarak adlandırılan bu modele ait görsel Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24 FLAC3D yazılımında oluşturulan PRM-1 parametrik analizine ait sayısal model

"PRM-7" olarak adlandırılan parametrik çalışmada ise kum zemin yerine düşük plastisiteli silt malzeme olan ML90 zemin malzemesi kullanılmıştır. PRM-7 parametrik analizinde kullanılan bu malzemenin temel karakteristik özellikleri ince daneli zemin olan kumlu silt zemin olması ve malzemenin likit limit değerlerinin % 50'den küçük olmasıdır ($LL < \%50$). PRM-7 parametrik analizinde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 3.9 'da verilmiştir.

Tablo 3.9 ML90 kumlu silt zeminine ait malzeme parametreleri [27]

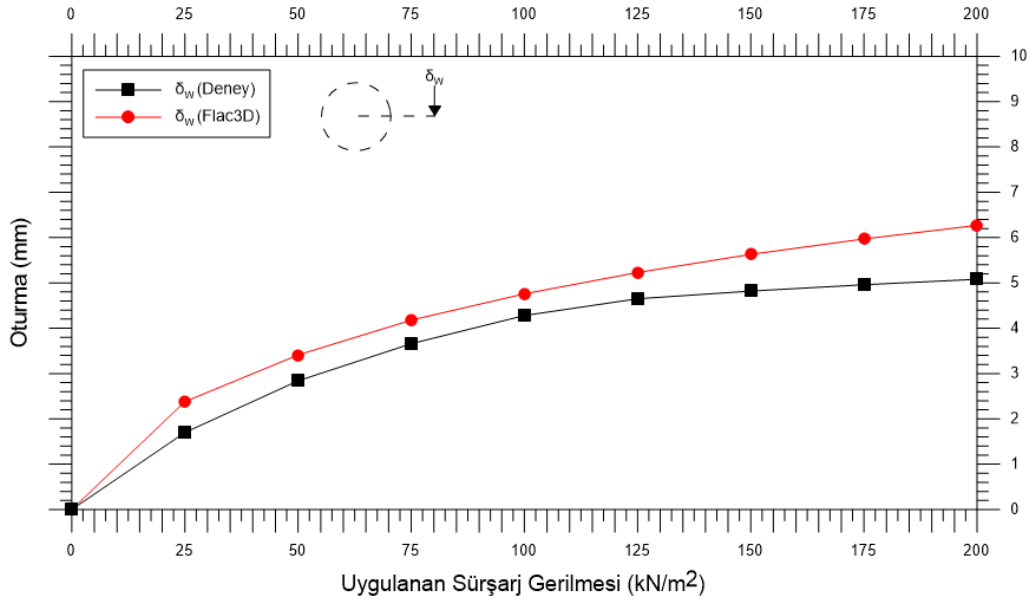
Model Parametresi	**ML90**
$\gamma_{unsat}(kN/m^3)$	19
$E_{50}^{ref}(MPa)$	12
$E_{oed}^{ref}(MPa)$	12
$E_{ur}^{ref}(MPa)$	48
$m(-)$	0.5
$\phi(^o)$	32
$\psi(^o)$	0.0
$c(kN/m^2)$	24
$failure-ratio,(R_f)$	0.89
$P_{ref})(kN/m^2)$	103.5

Gerçekleştirilen EPS'li konfigürasyonlar ve parametrik analizlere ait sonuçlar, diğer tüm analiz sonuçlarıyla birlikte Bölüm 4'te değerlendirilecektir.

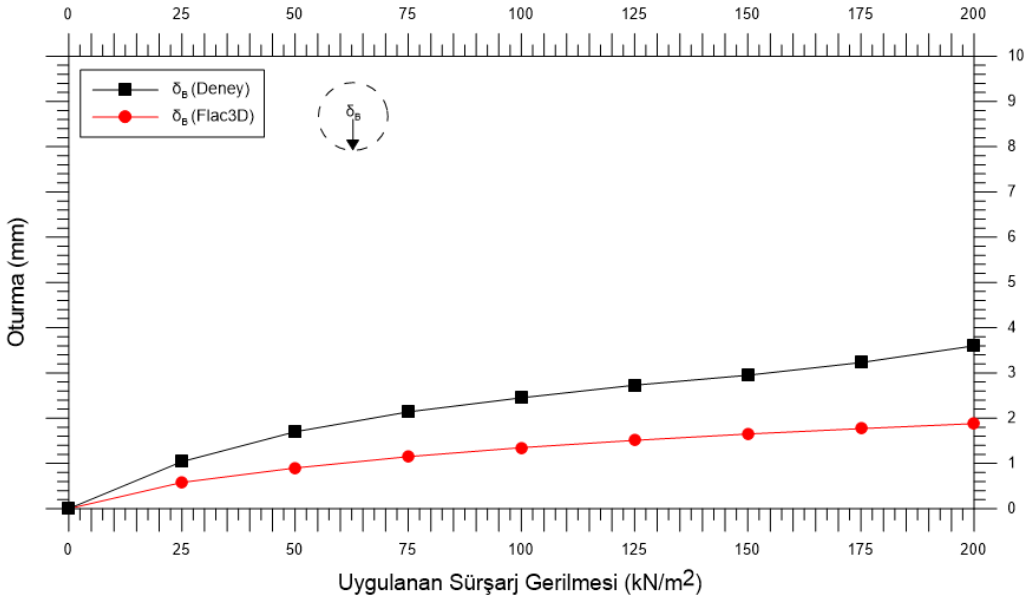
4
FLAC3D SAYISAL ANALİZ SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 BORUSUZ DENEY ANALİZLERİ KAPSAMINDA ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Borusuz deney analizlerinin değerlendirilebilmesi amacıyla FLAC3D programı ile sayısal modeli oluşturulan sistemin, gerçek ölçekli deneyde yerleştirilen oturma levhaları ve toprak basınç hücrelerinin bulunduğu konumlara karşılık gelen noktalardan oturma ve gerilme değerleri alınmış ve gerçek ölçekli deney sonuçları ile grafikler üzerinde karşılaştırılmıştır. FLAC3D analizleri sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda boru yatay simetri çizgisi üzerinde ve boru merkezinden 35 cm açıkta yerleştirilen S1 olarak adlandırılan oturma plakası ile boru tabanına karşılık gelen konuma yerleştirilen ve S3 olarak adlandırılan oturma plakası sonuçları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

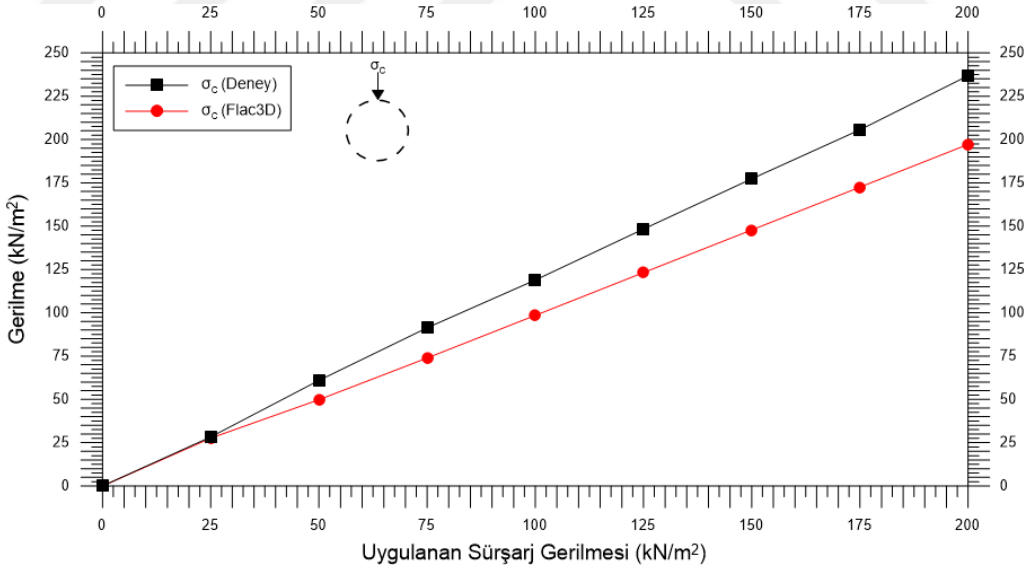


Şekil 4.1 S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması

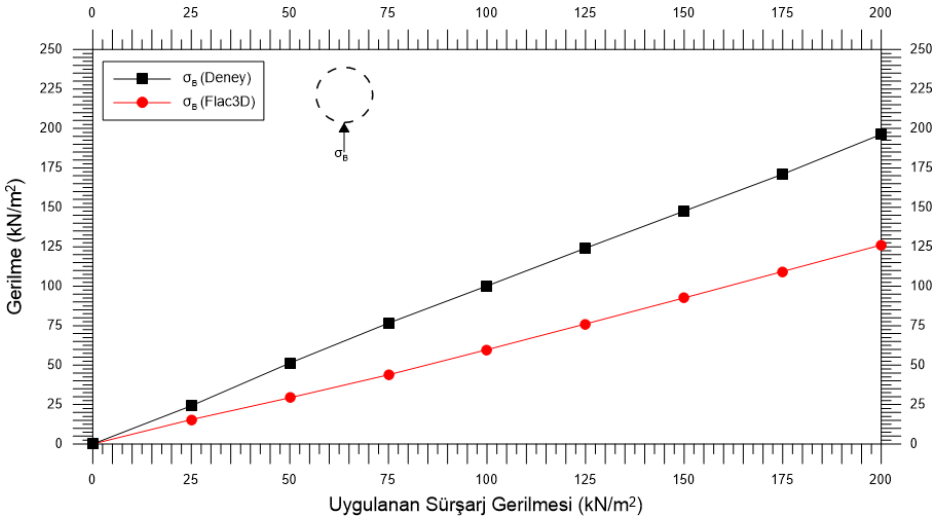


Şekil 4.2 S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması

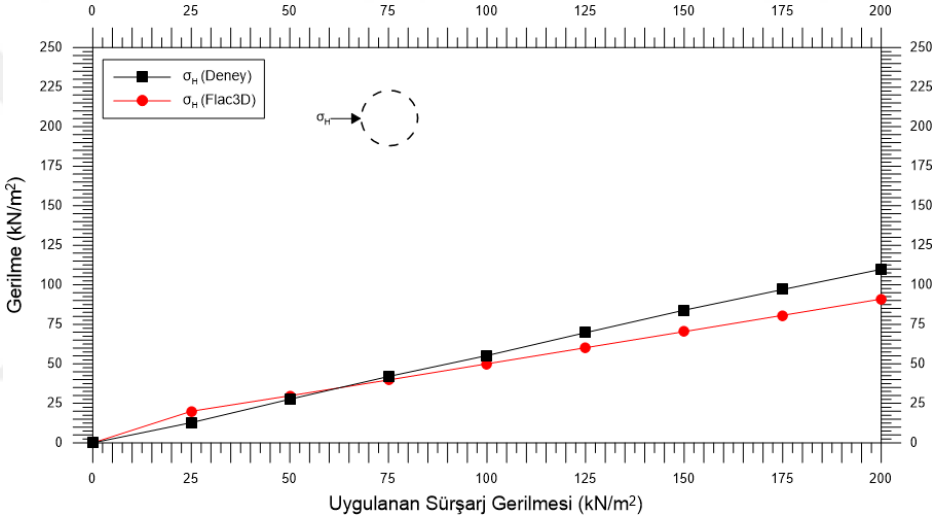
Uygulanan sürşarj gerilmesi sonucunda oluşan gerilme değerlerinin ölçüldüğü boru taç seviyesi (P1), boru yatay simetri çizgisi (P3), boru taç seviyesinde boru merkezinden 35 cm açığındaki zemin ortamı (P5) ve boru taban seviyesinin 35 cm açığındaki zemin ortamına (P7) karşılık gelen noktalarda elde edilen gerilme değerleri sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



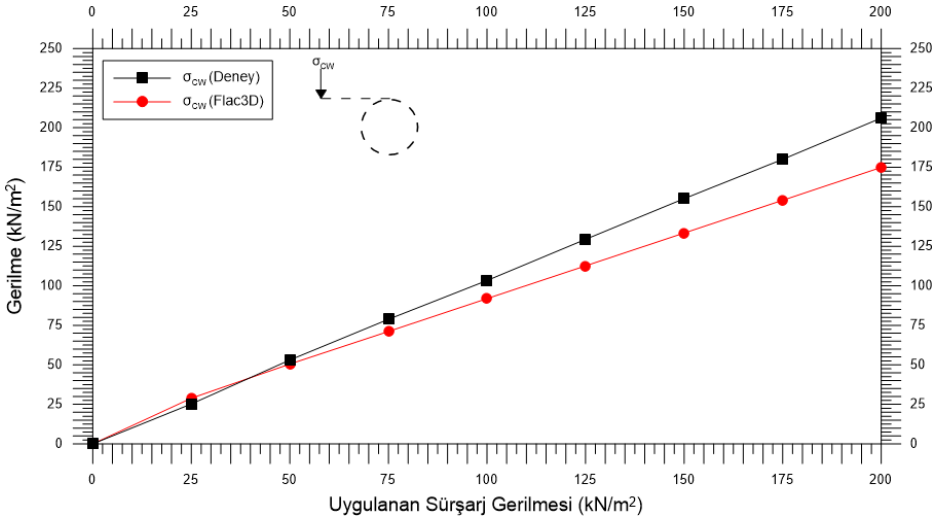
Şekil 4.3 P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması



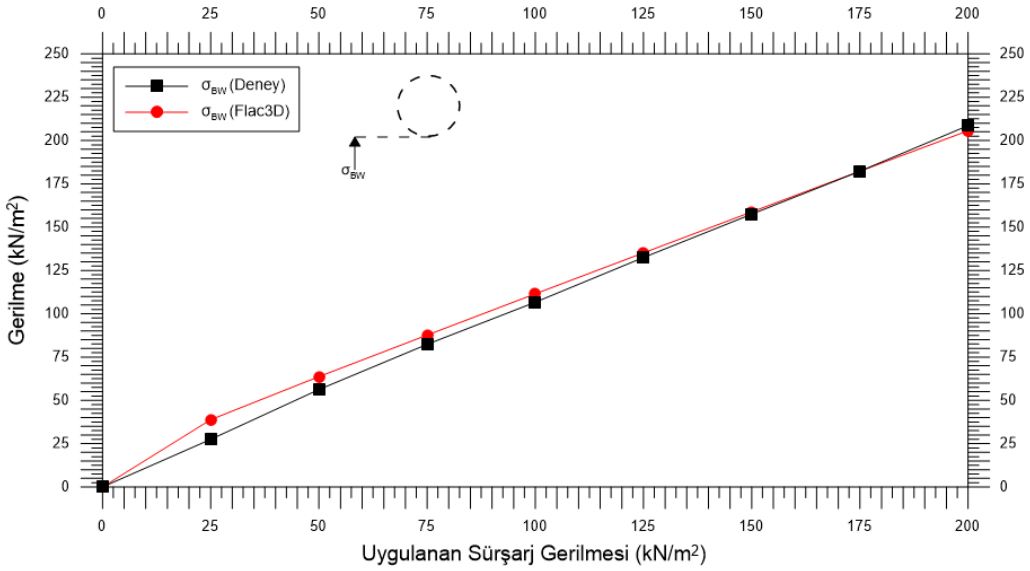
Şekil 4.4 P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.5 P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.6 P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması

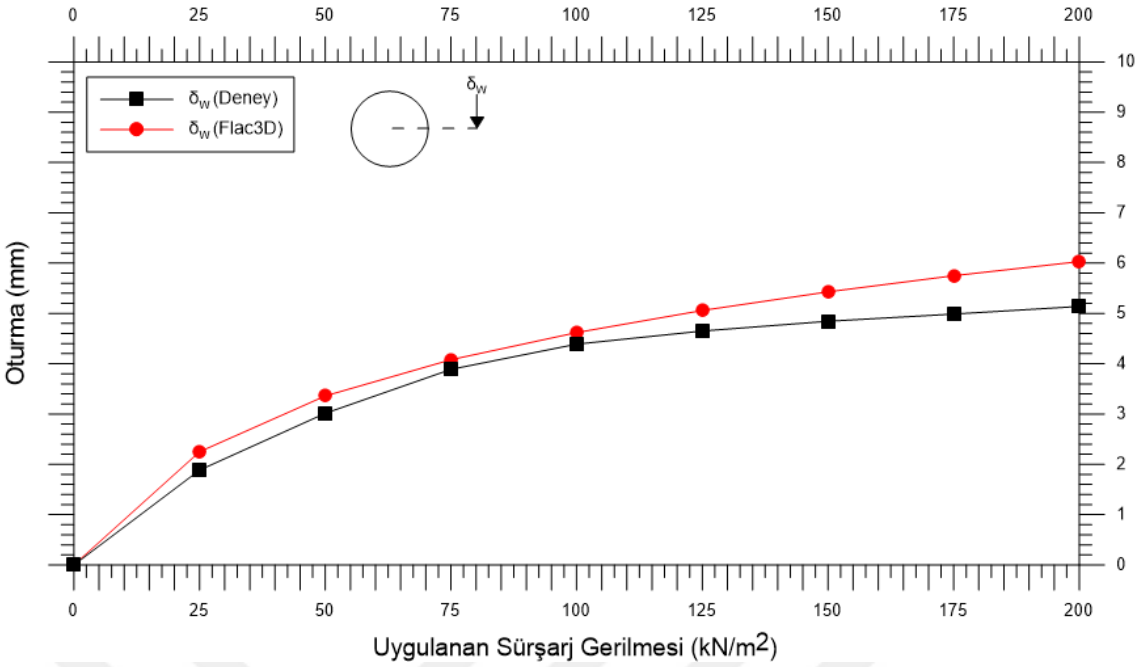


Şekil 4.7 P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırılması

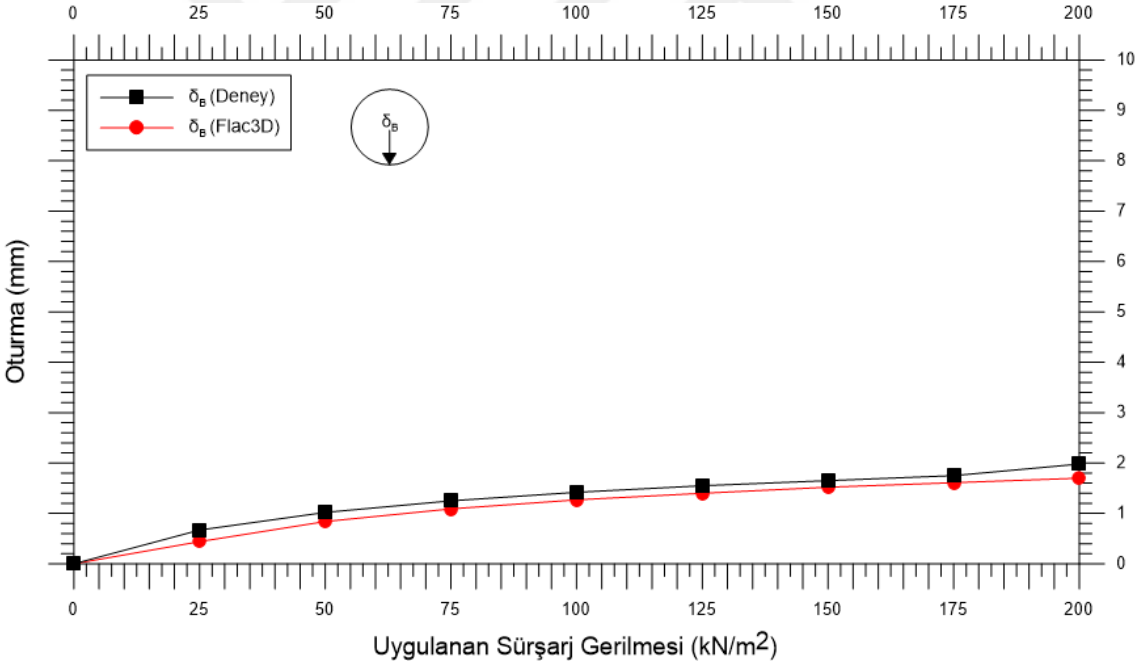
Borusuz deney için elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre S1 ve S3 oturma plakalarına karşılık gelen noktalarda ve P1, P2, P3, P5 ve P7 gerilme ölçerlerinin konumlarına karşılık gelen noktalarda gerçek deney verilerine kabul edilebilir düzeyde yakın sonuçların elde edildiği kabul edilmiştir.

4.2 REFERANS DENEY ANALİZLERİ KAPSAMINDA ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Refereans deney analizleri kapsamında, boru yatay simetri çizgisi üzerinde ve boru merkezinden 35 cm açıktaki zemin oturması miktarı ile boru tabanında elde edilen oturma miktarı deneyde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sunulmuştur.



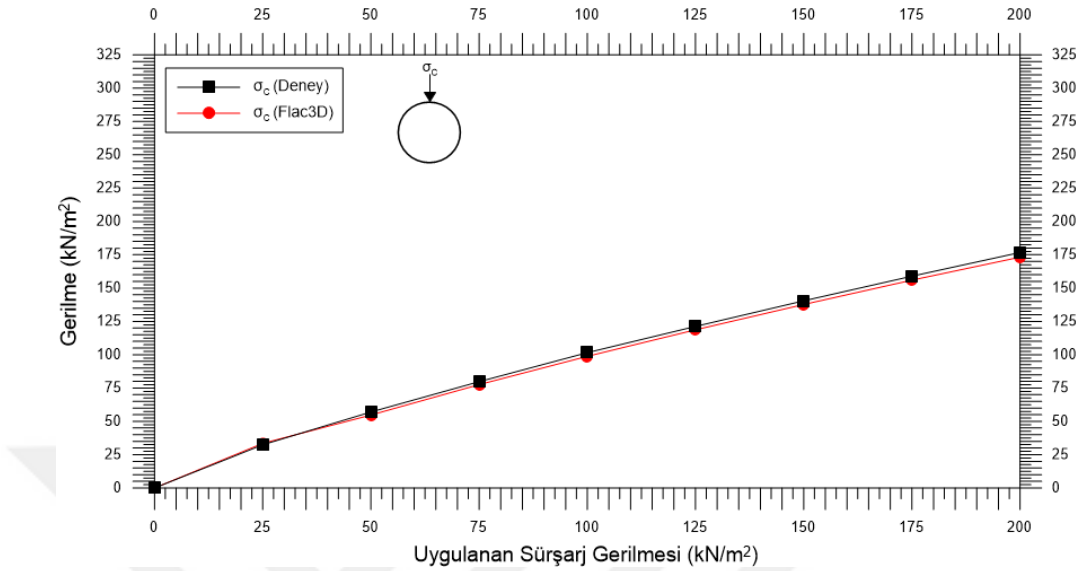
Şekil 4.8 Referans deney analizlerinde boru yan seviyesinde (S1) elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması



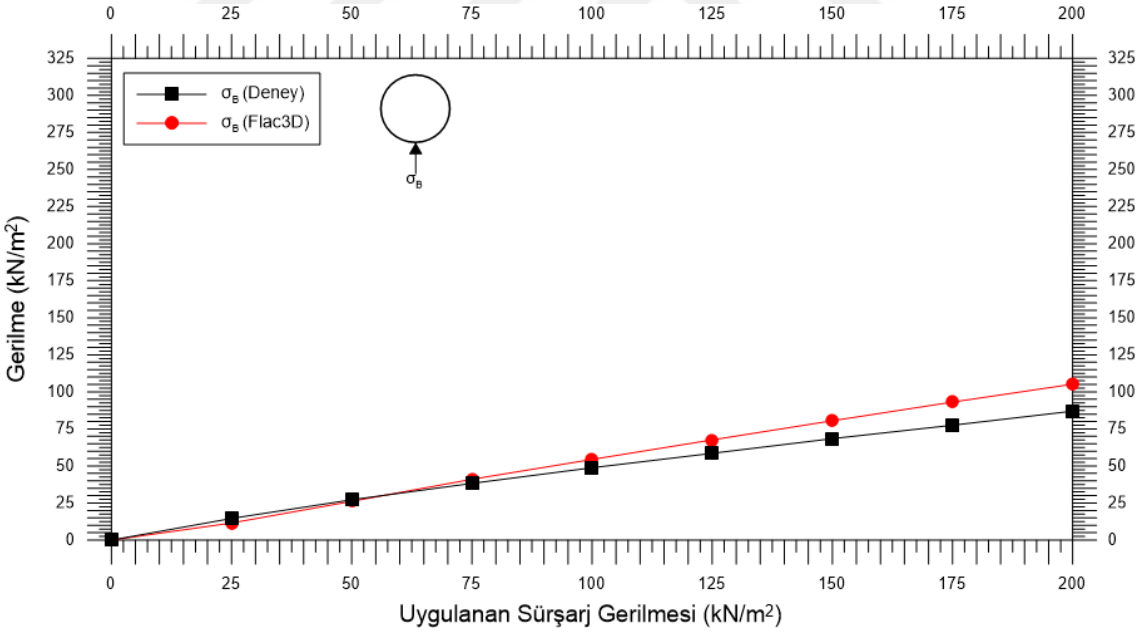
Şekil 4.9 Referans deney analizlerinde boru taban seviyesinde (S3) elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre boru yan seviyesindeki S1 noktasında oturma miktarı ile boru tabanında S3 noktasında ölçülen oturma miktarı gerçek ölçekli deneyde elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde tutarlılık göstermiştir.

Referans deney analizleri kapsamında boru taç ve taban düzeyinde elde edilen düşey gerilme değerleri, deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



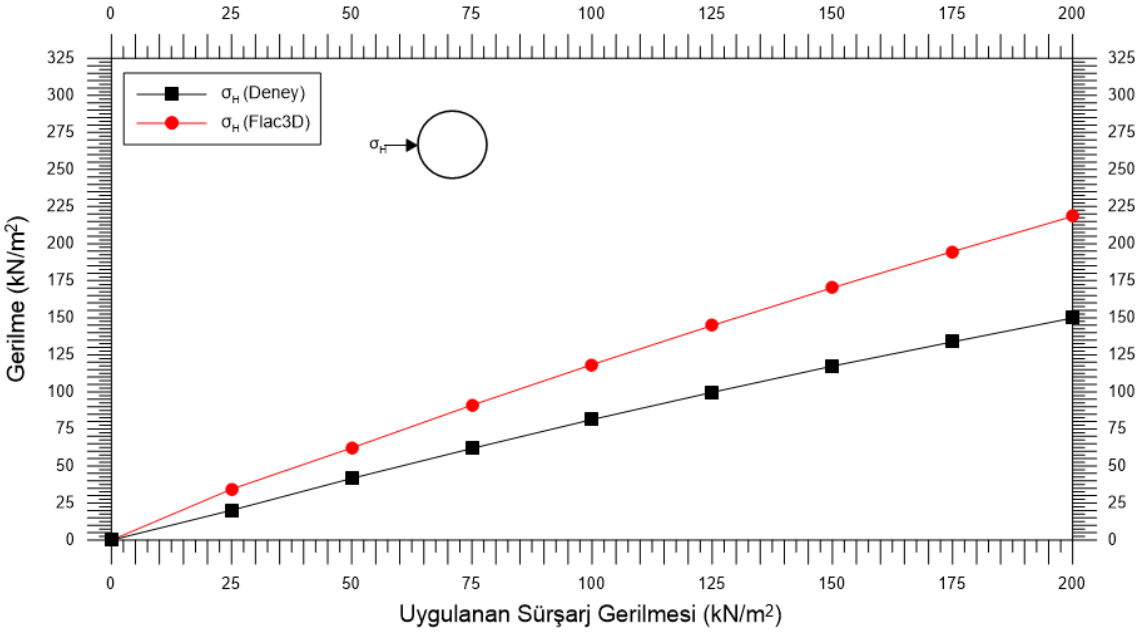
Şekil 4.10 Referans deney analizleri sonucunda boru taç seviyesinde (P1) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.11 Referans deney analizleri sonucunda boru taban seviyesinde (P2) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

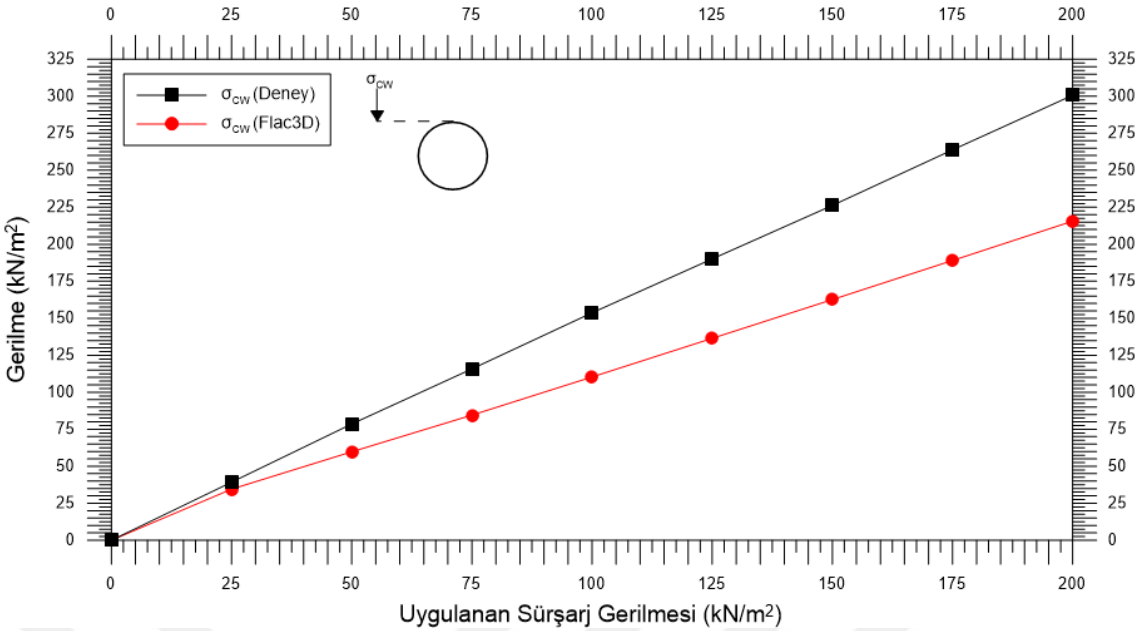
Elde edilen sonuçlara göre boru taç seviyesindeki P1 noktasında ve boru taban seviyesindeki P2 noktasında elde edilen gerilme değerleri deney sonuçları ile tutarlılık göstermektedir.

Boru yatay simetri çizgisi seviyesinde boru yan duvarındaki P3 noktasında oluşan yanal gerilme değerleri ise Şekil 4.12'de karşılaştırılmıştır. Boru yan duvarında elde edilen yanal gerilme miktarı 200 kPa sürşarj yükü altında 218,5 kPa olarak Hesaplanmıştır. Gerçek ölçekli deneyde ise bu değer 149,8 kPa olarak bulunmuştur.



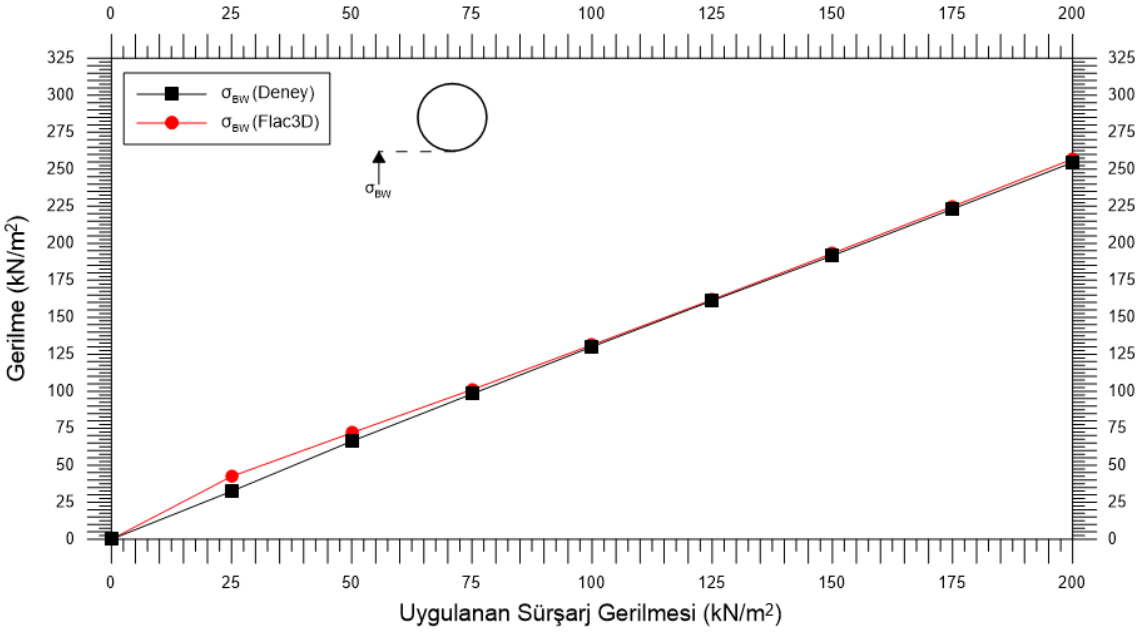
Şekil 4.12 Referans deney analizleri sonucunda boru yan duvarında (P3) elde edilen yanal gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru taç seviyesinde boru merkezinden 35 cm açıkta bulunan P5 noktasında elde edilen düşey gerilme sonuçlarına göre 200 kPa yük altında 215,6 kPa değerinde elde edilen gerilme miktarı deneyde elde edilen sonuçtan yaklaşık olarak 85 kPa daha düşük bulunmuştur (Şekil 4.13).



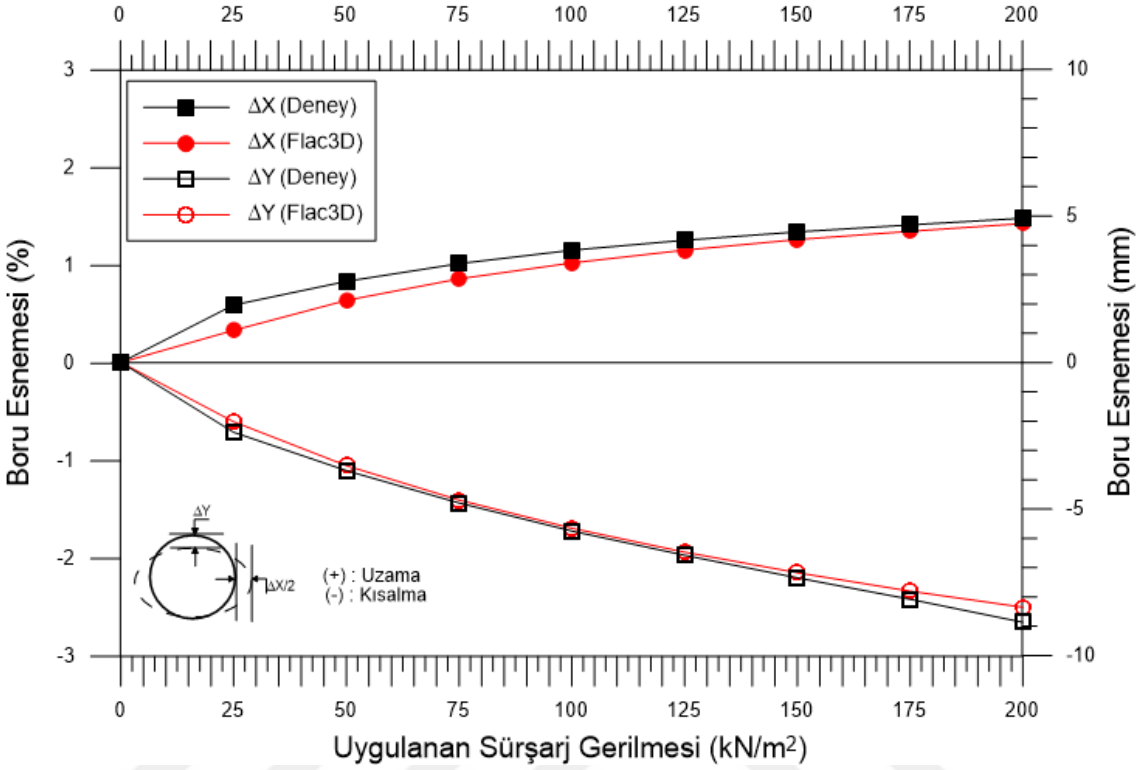
Şekil 4.13 Referans deney analizleri sonucunda boru taç seviyesinin 35 cm açığında (P5) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru taban seviyesinde boru merkezinden 35 cm açıkta bulunan P7 noktasında ise deneyde 200 kPa sürşarj yükü altında 254,6 kPa düşey zemin gerilmesi ölçülmüştür. Elde edilen FLAC3D sonuçlarında ise bu değer 257 kPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Referans deney analizleri sonucunda boru taban seviyesinin 35 cm açığında (P7) elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

Referans deney analizleri kapsamında kademeli olarak artırılan sürşarj yükleri altında elde edilen düşey ve yatay doğrultulardaki boru esneme değerleri, deney sonuçları ile Şekil 4.15'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15 Referans deney analizleri sonucunda düşey (Δ Y) ve yatay (Δ X) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması

FLAC3D analizleri sonucunda hem düşey hem de yatay doğrultularda elde edilen boru esneme değerleri ile gerçek ölçekli deneyde elde edilen boru esneme değerleri arasında büyük farklar gözlenmemiştir.

FLAC3D analizleri kapsamında birinci aşama borusuz deney ve ikinci aşama referans deney analizleri, deney sistemi ve kullanılan malzeme parametrelerinin kalibrasyonu amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada elde edilen sonuçların gerçek deney sonuçlarıyla tutarlılık göstermesi ile kalibrasyon aşamasının başarıyla tamamlandığı kabul edilmiştir.

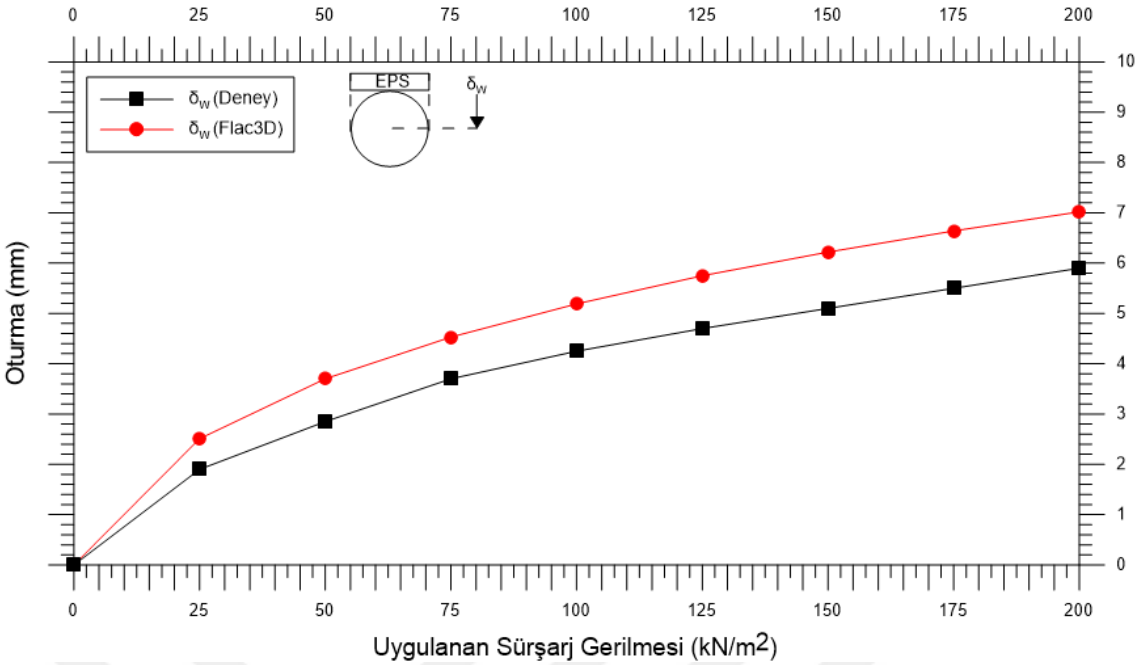
4.3 EPS'Lİ KONFİGÜRASYON VE PARAMETRİK ANALİZLER KAPSAMINDA ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Gerçek ölçekli deneylerde [1] EPS malzemenin, düşey gerilme etkisi altındaki HDPE koruge borunun davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı EPS geometrileri ile deneyler gerçekleştirilmiştir (Bkz. Bölüm 3.1).

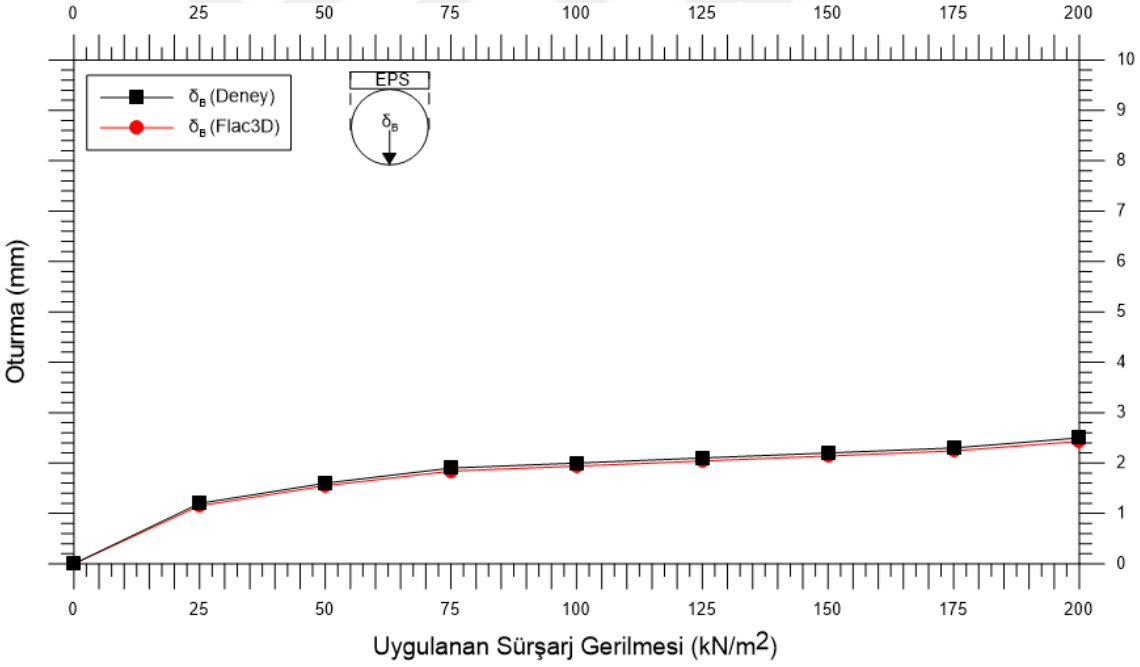
Bu tez çalışması kapsamında, gerçekleştirilen EPS'li konfigürasyon deneyleri arasından seçilen "Konfigürasyon-1" ve "Konfigürasyon-5" geometrileri FLAC3D yazılımı kullanılarak modellenmiş ve EPS malzemeye ait parametrelerin kalibrasyonu yapılmıştır. Ayrıca kalibre edilen "Konfigürasyon-5" modeli üzerinde parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak EPS malzemenin, gömülü termoplastik koruge boru davranışı üzerindeki etkileri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Bu kapsamda ilk olarak "Konfigürasyon-1 (EPS-1)" sayısal modelinin kalibrasyonu yapılmıştır. Sayısal modelde tanımlanan EPS geometrisine ait parametrelerin kalibrasyonu yapılmış ve ilgili noktalarda elde edilen oturma, gerilme ve esneme değerlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23'te verilmiştir.

Konfigürasyon-1 analizleri kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada S1 ve S3 noktaları için elde edilen grafikler ele alındığında aynı konfigürasyon ile gerçekleştirilen gerçek ölçekli deneyden elde edilen oturma eğrileri ile kabul edilebilir düzeyde tutarlılık gösterdiği sonucuna varılmıştır.

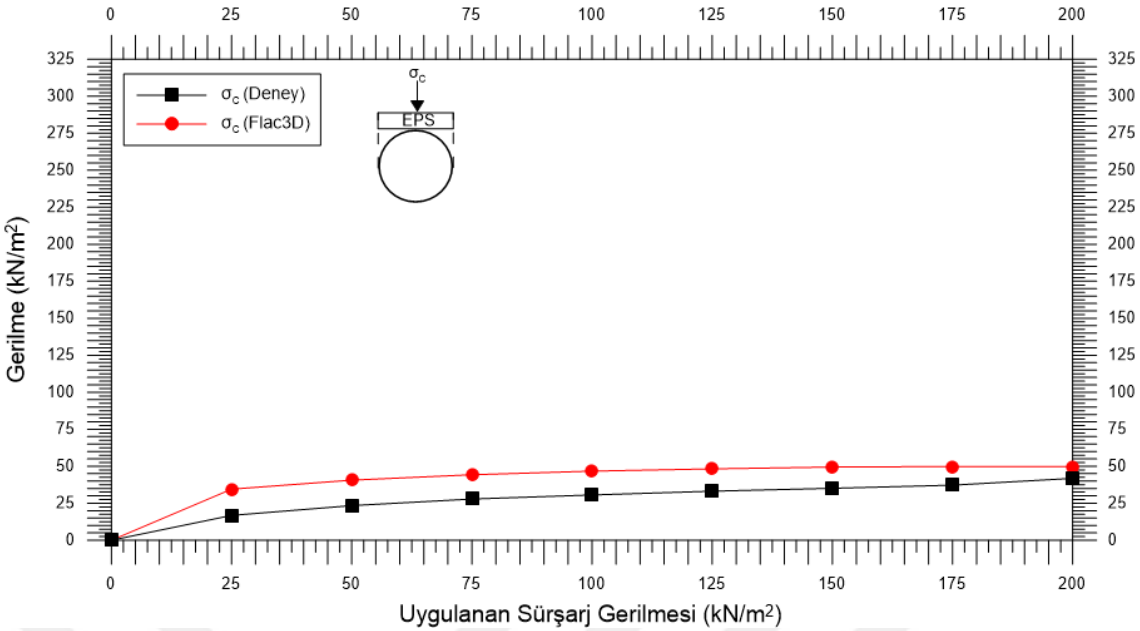


Şekil 4.16 EPS-1 deney analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

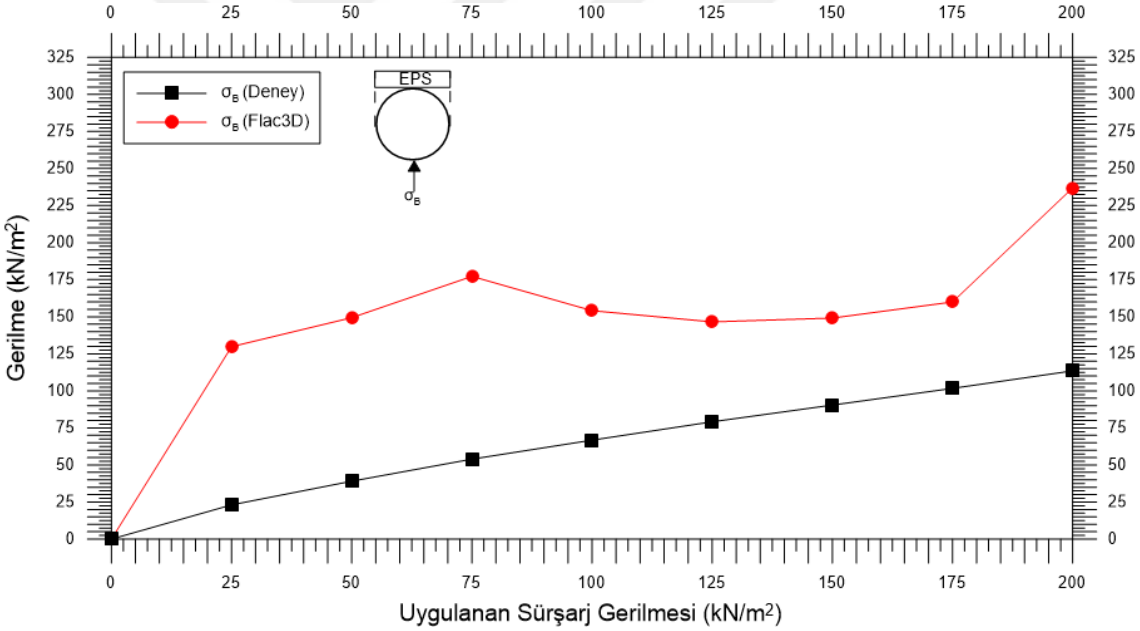


Şekil 4.17 EPS-1 deney analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

Analizler kapsamında elde edilen gerilme grafiklerinde boru taç seviyesinde bulunan P1 noktasında sürşarj yükü etkisi altında meydana gelen düşey gerilme eğrileri incelendiğinde sayısal analizlerde elde edilen gerilme değerleri ile gerçek ölçekli deney sonuçları arasında tutarlı bir ilişki görülmüştür.

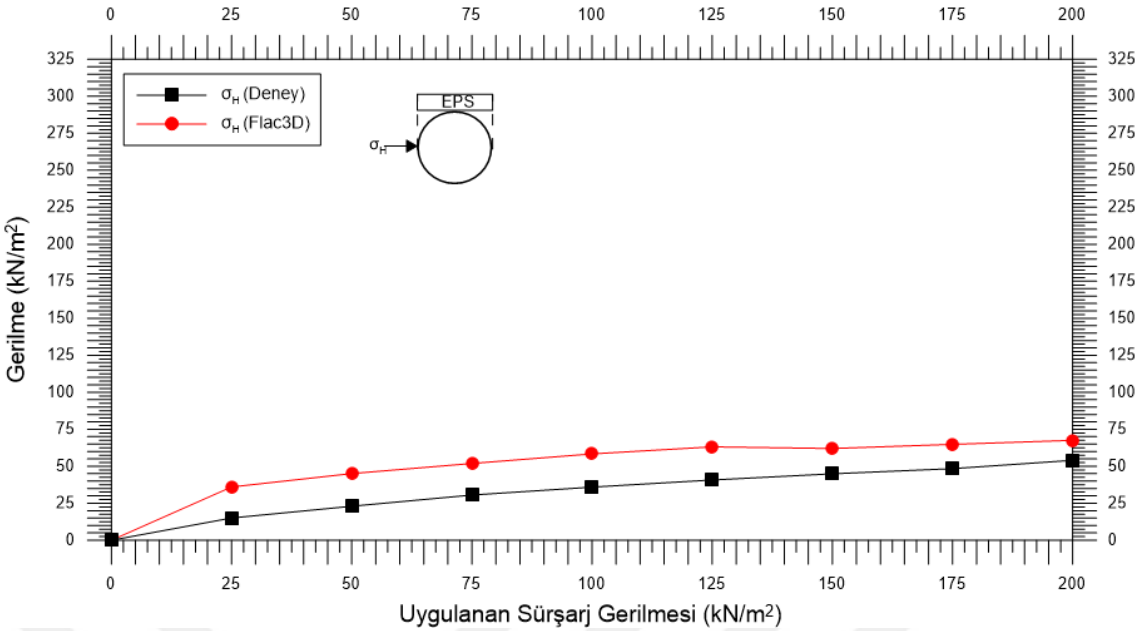


Şekil 4.18 EPS-1 deney analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması



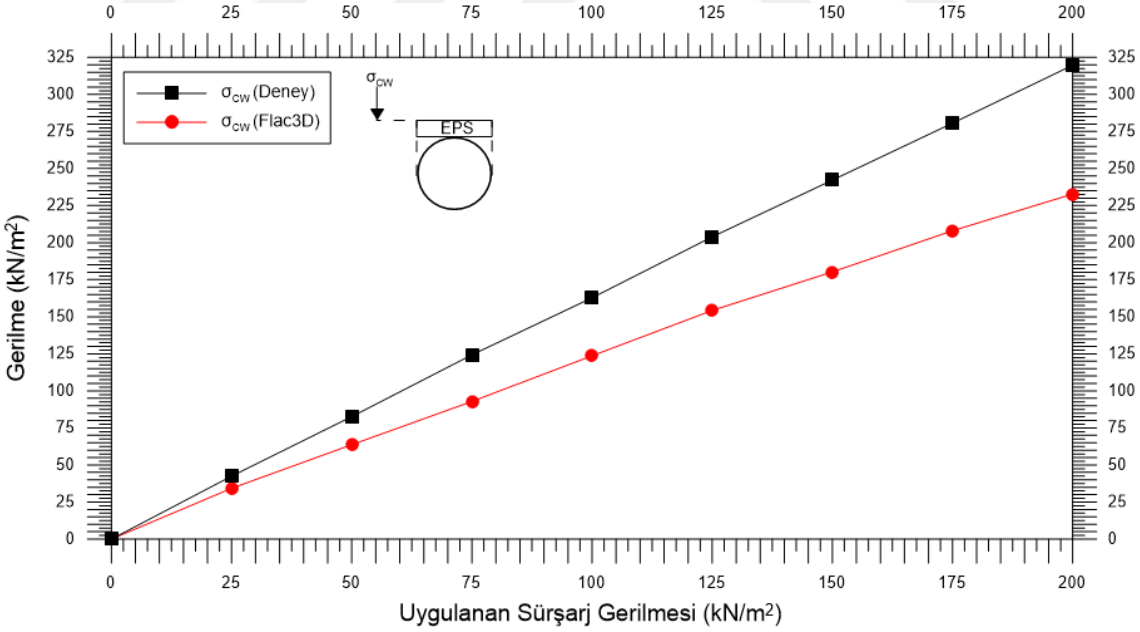
Şekil 4.19 EPS-1 deney analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

Mevcut analizler kapsamında boru taban seviyesinde bulunan P2 noktasındaki düşey gerilme eğrisi gerçek ölçekli deneyler sonucunda elde edilen eğri ile anlamlı bir yakınlık göstermemiştir. Boru tabanı ile dolgu malzemesi olarak kullanılan kum malzeme arasındaki yük aktarım ilişkisinin doğrusal bir eğri üzerinde hareket etmesini engelleyen ve Şekil 4.19'da sayısal analiz sonuçlarına ait gerilme değerlerindeki dalgalanmaya neden olan faktör eldeki mevcut veriler ile tam olarak açıklanamamıştır.



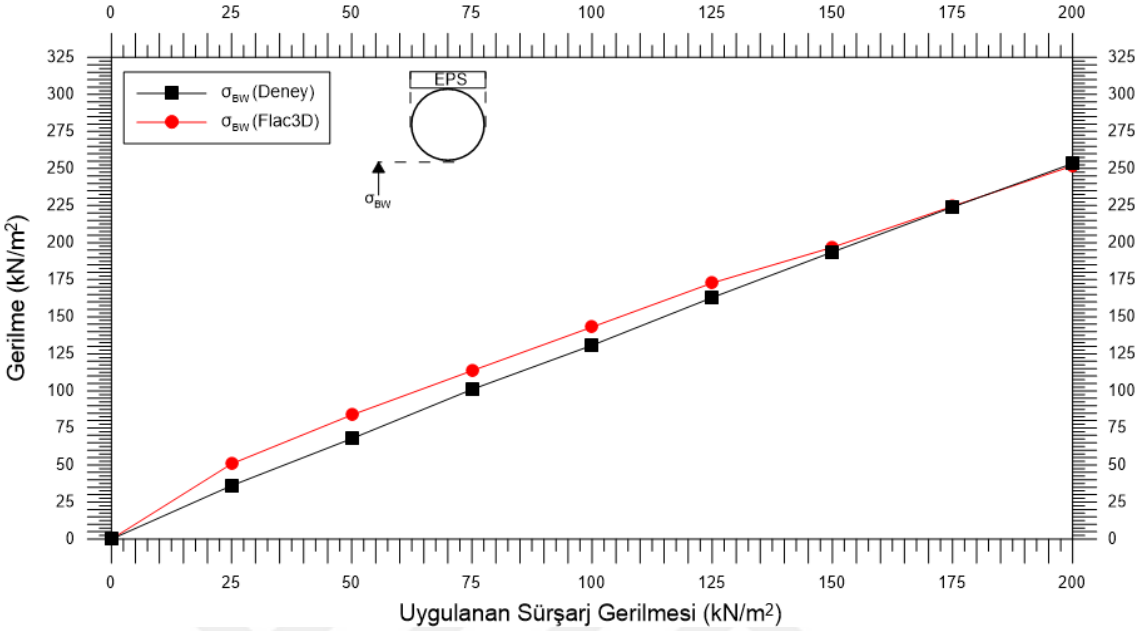
Şekil 4.20 EPS-1 deney analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru yatay simetri ekseni üzerindeki P3 noktasında elde edilen yatay gerilme eğrileri dikkate alındığında sayısal analiz sonuçlarının gerçek ölçekli deney sonucunda elde edilen eğri ile büyük oranda benzerlik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.21 EPS-1 deney analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

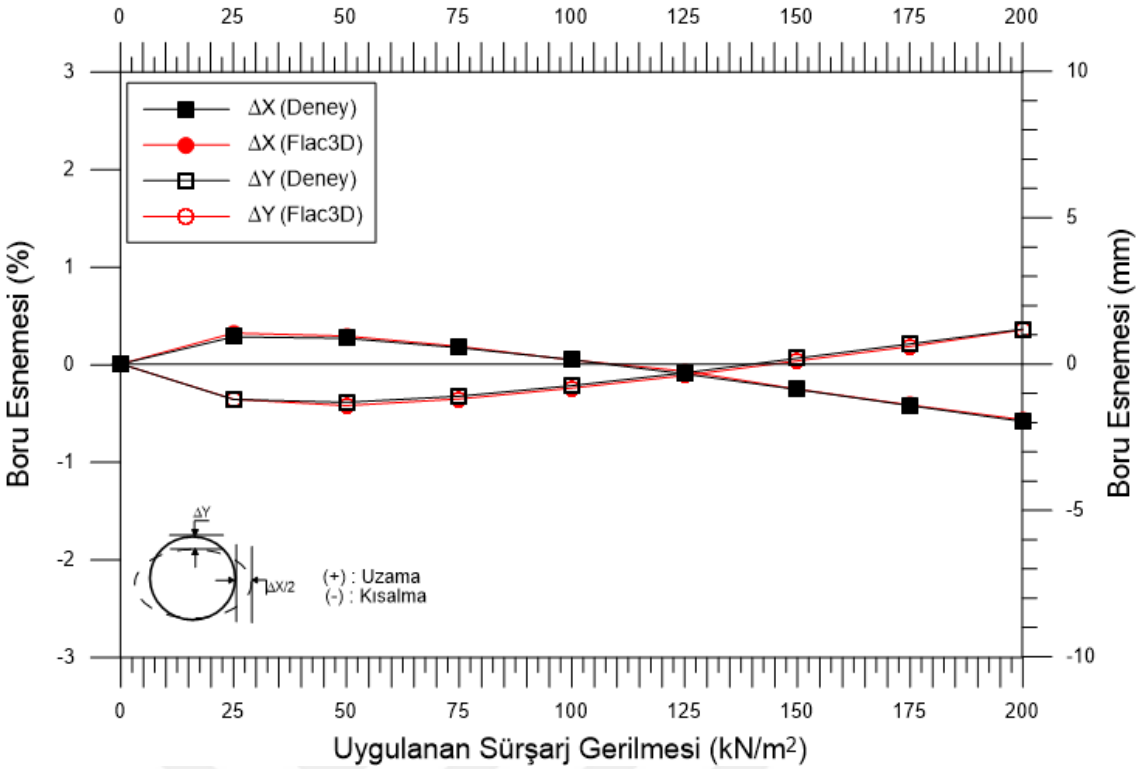
Konfigürasyon-1 modeli üzerinde boru taç seviyesinde boru merkezinden 35 cm uzakta bulunan P5 noktasında meydana gelen gerilme değerleri ele alındığında (Şekil 4.21) sonuçların deney sonuçlarından daha küçük çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.22 EPS-1 deney analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen düşey gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru taban seviyesinde boru merkezinde 35 cm açıkta bulunan P7 noktasında oluşan gerilme değerleri (Şekil 4.22) ele alındığında ise FLAC3D analiz sonuçlarının deney sonuçları ile büyük oranda benzerlik gösterdiği görülmüştür.

EPS-1 konfigürasyonlu model üzerinden elde edilen düşey ve yatay doğrultulardaki boru esneme davranışlarına bakıldığında, sayısal analizlerle elde edilen sonuçların deney sonuçları ile büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür.

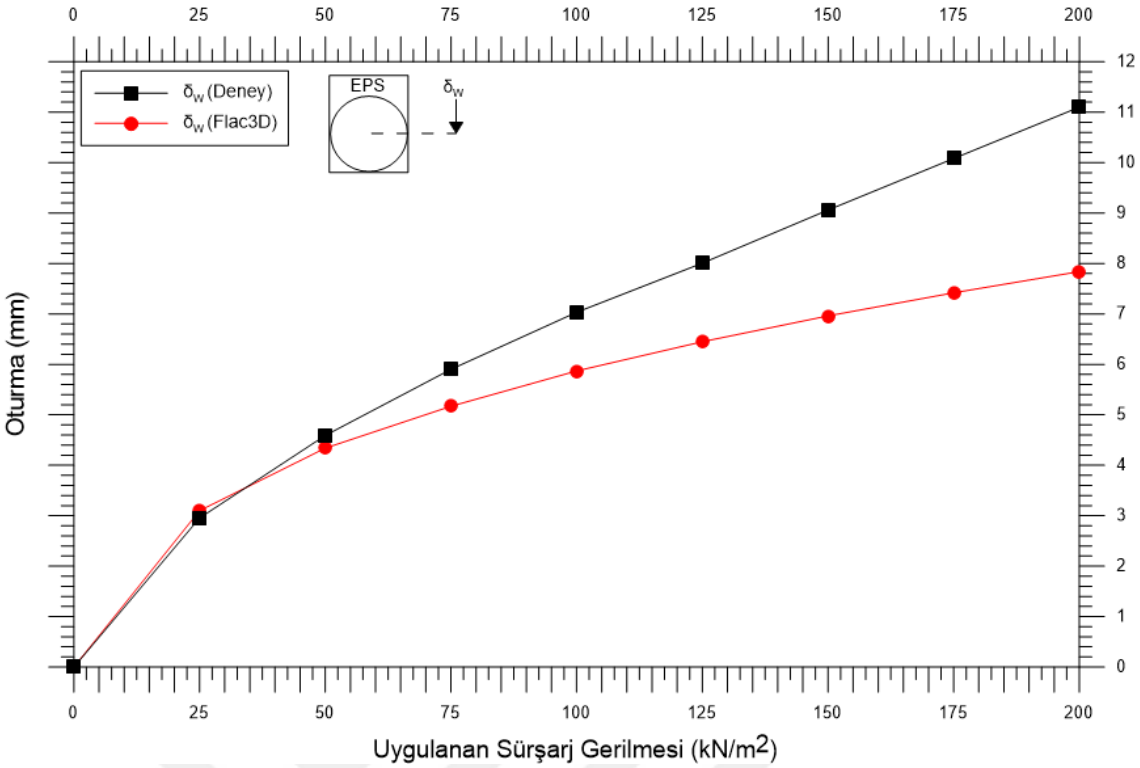


Şekil 4.23 EPS-1 deney analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve düşey (ΔY) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması

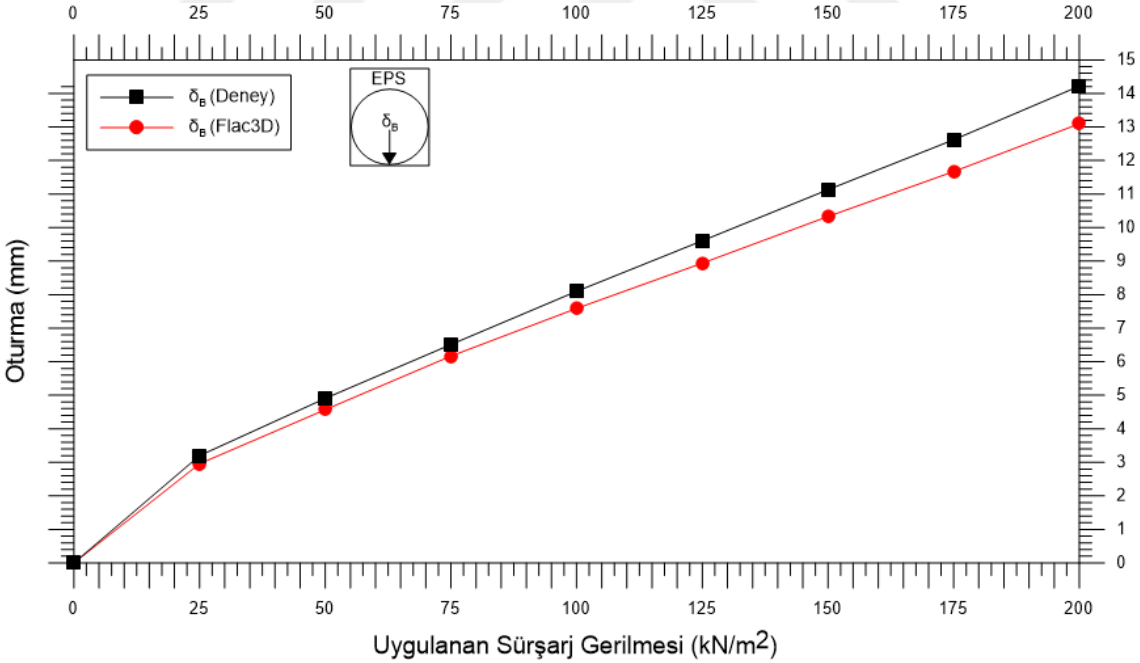
Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen farklı konfigürasyon deneylerinden biri olan "Konfigürasyon-5" deneyine ait sayısal model (Şekil 3.23) üzerinde gerçekleştirilen analizler de parametrik analiz çalışmasının ikinci aşamasını oluşturmuştur. Model üzerinde gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda elde edilen oturma eğrileri Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de verilmiştir.

Boru yatay simetri çizgisi üzerinde yer alan S1 noktası için elde edilen oturma eğrisinde artan sürşarj yükleri altında eğri boyunca gerçek deney sonuçlarına kıyasla azalan eğime sahip bir ilerleme gözlenmiştir.

Bununla beraber boru taban seviyesinde bulunan S3 noktasında elde edilen oturma miktarlarına bakıldığında gerçek deney sonuçları ile uyumlu sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür.



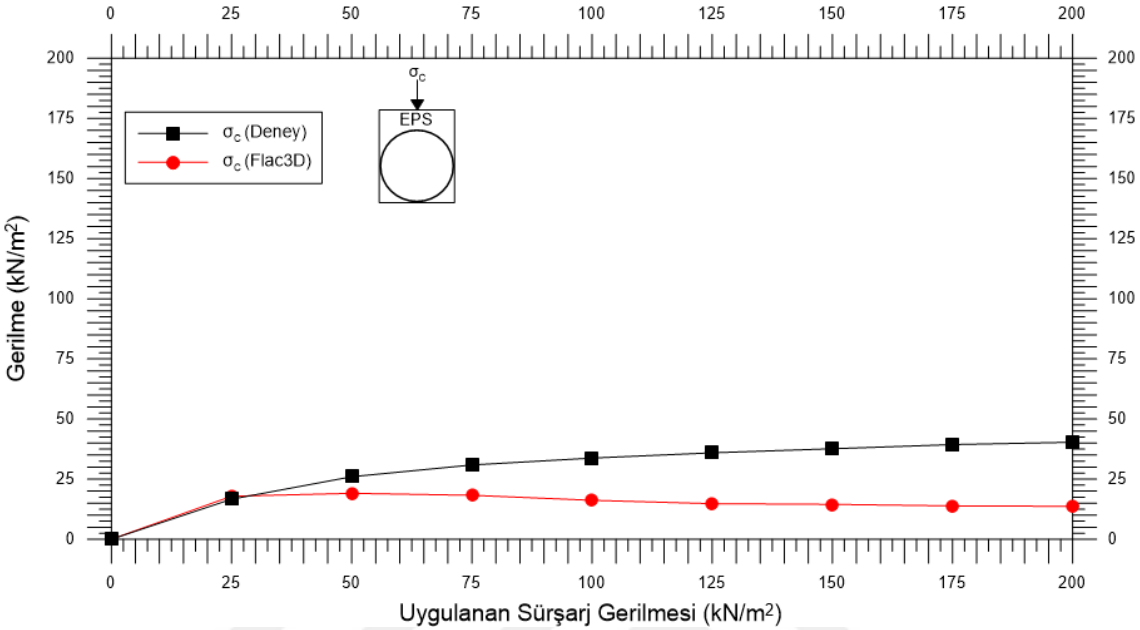
Şekil 4.24 EPS-5 deney analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.25 EPS-5 deney analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

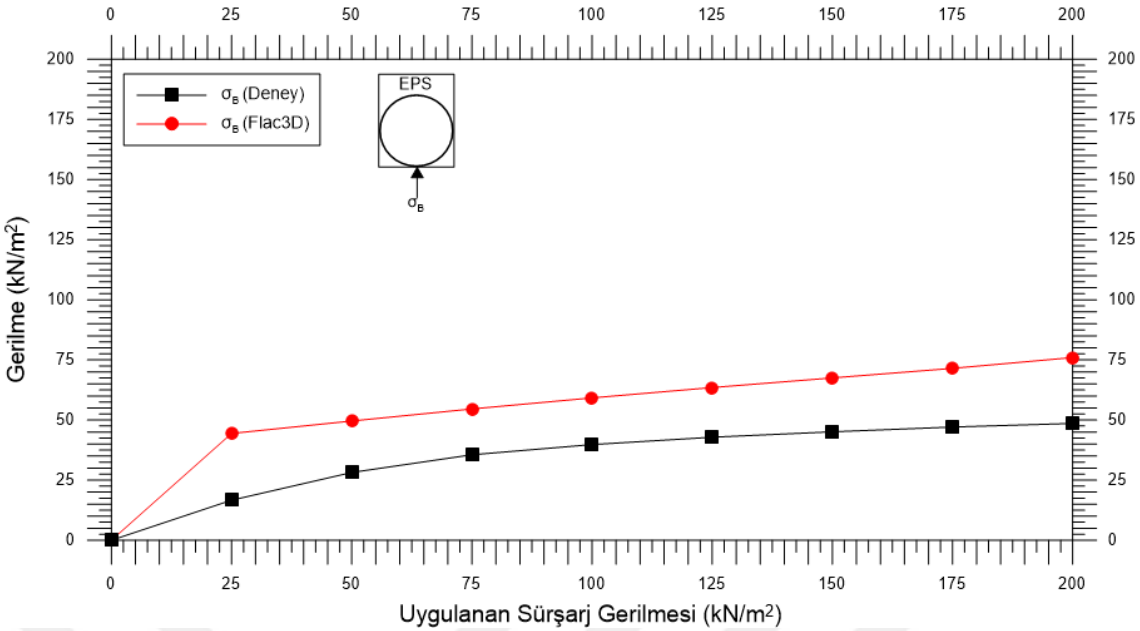
Konfigürasyon-5 (EPS-5) modeli üzerinde boru taç seviyesinde bulunan P1 noktasından elde edilen düşey gerilme sonuçları Şekil 4.26'da, boru taban seviyesinde bulunan P2 noktasından elde edilen düşey gerilme sonuçlar Şekil 4.27'de, boru yatay

simetri ekseninde yer alan P3 noktasındaki yatay gerilmeler Şekil 4.28'de, boru taç seviyesinin 35 cm doğusunda bulunan P5 noktasındaki düşey gerilmeler Şekil 4.29'da ve boru taban seviyesinin 35 cm doğusunda yer alan P7 noktasında elde edilen gerilmeler ise Şekil 4.30'da sunulmuştur.

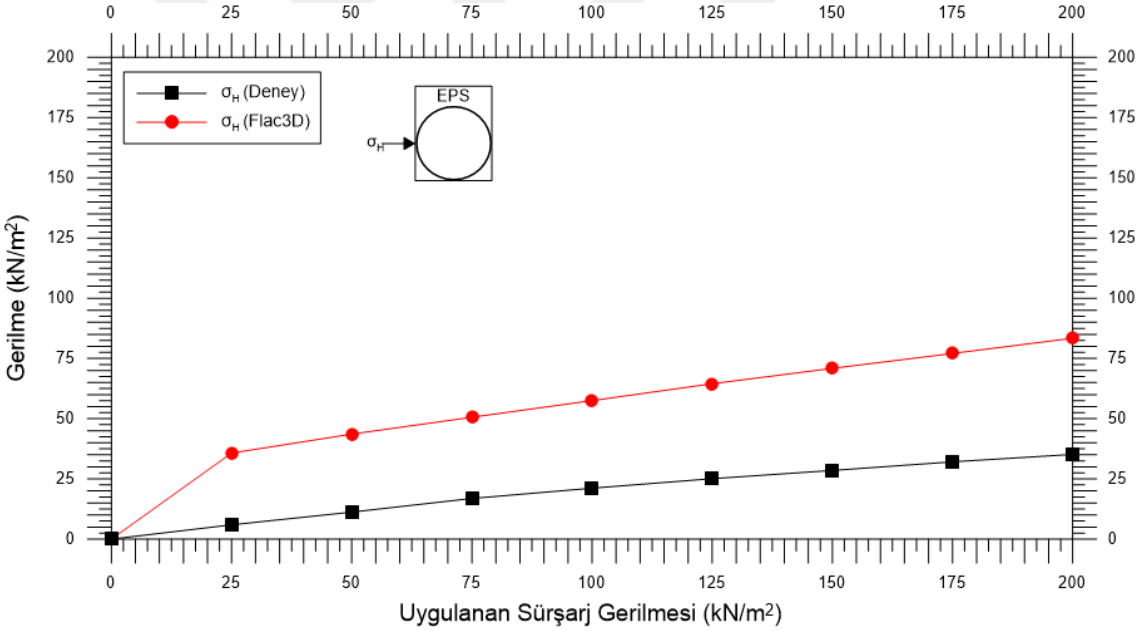


Şekil 4.26 EPS-5 deney analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru taç seviyesinde bulunan P1 noktasındaki gerilme eğrileri incelendiğinde deney sonuçları ile FLAC3D analiz sonuçları arasında kaydadeğer miktarda farklılıklar saptanmıştır. Bununla beraber boru taban seviyesinde bulunan P2 noktasına ait gerilme grafiklerinde de farklı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

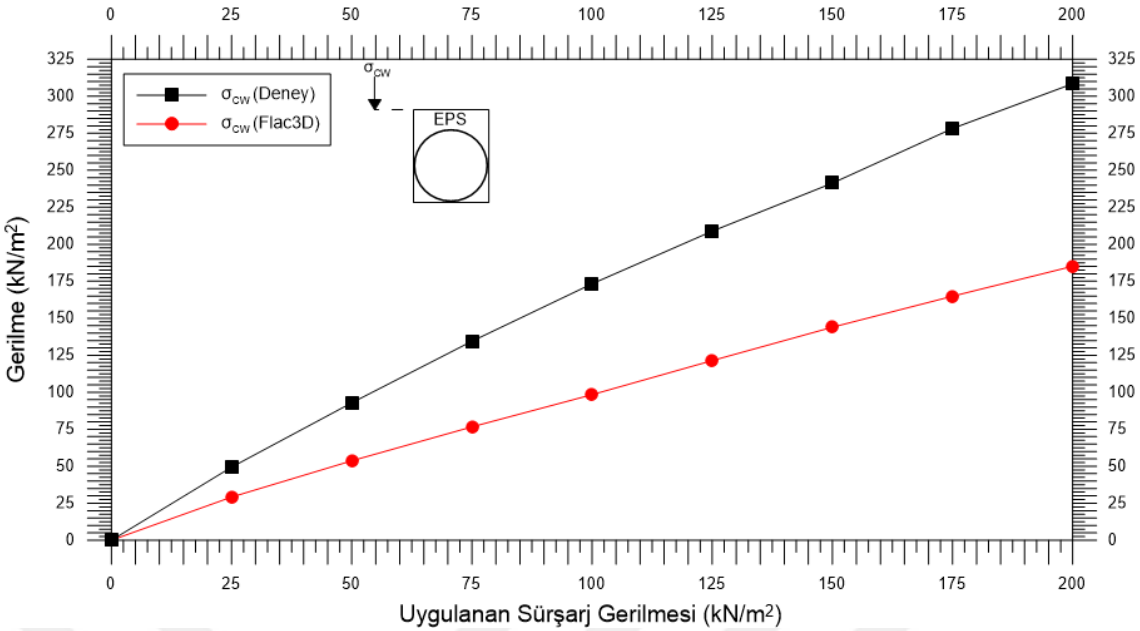


Şekil 4.27 EPS-5 deney analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

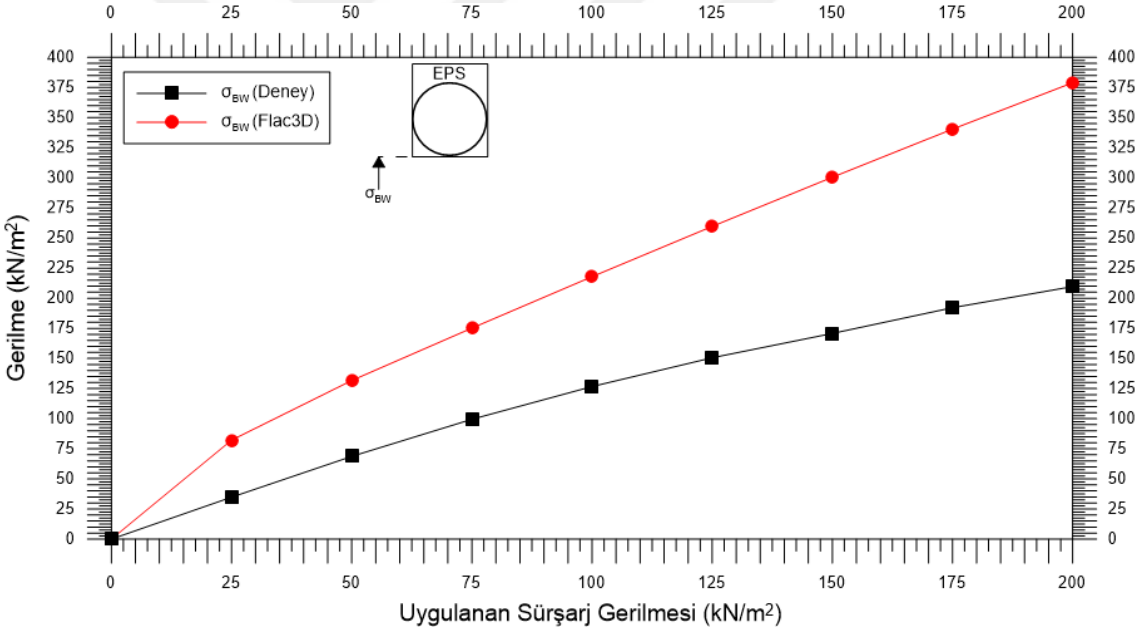


Şekil 4.28 EPS-5 deney analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru yatay simetri ekseni üzerindeki P3 noktasında elde edilen yatay gerilme eğrisi (Şekil 4.28) ile boru taç ve taban seviyelerinin 35 cm doğusunda konumlandırılan P5 (Şekil 4.29) ve P7 (Şekil 4.30) noktalarındaki düşey gerilme değerlerini gösteren eğrilere bakıldığında da benzer şekilde gerçek deney eğrilerinden gözle görülür derecede farklılıkların olduğu sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 4.29 EPS-5 deney analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

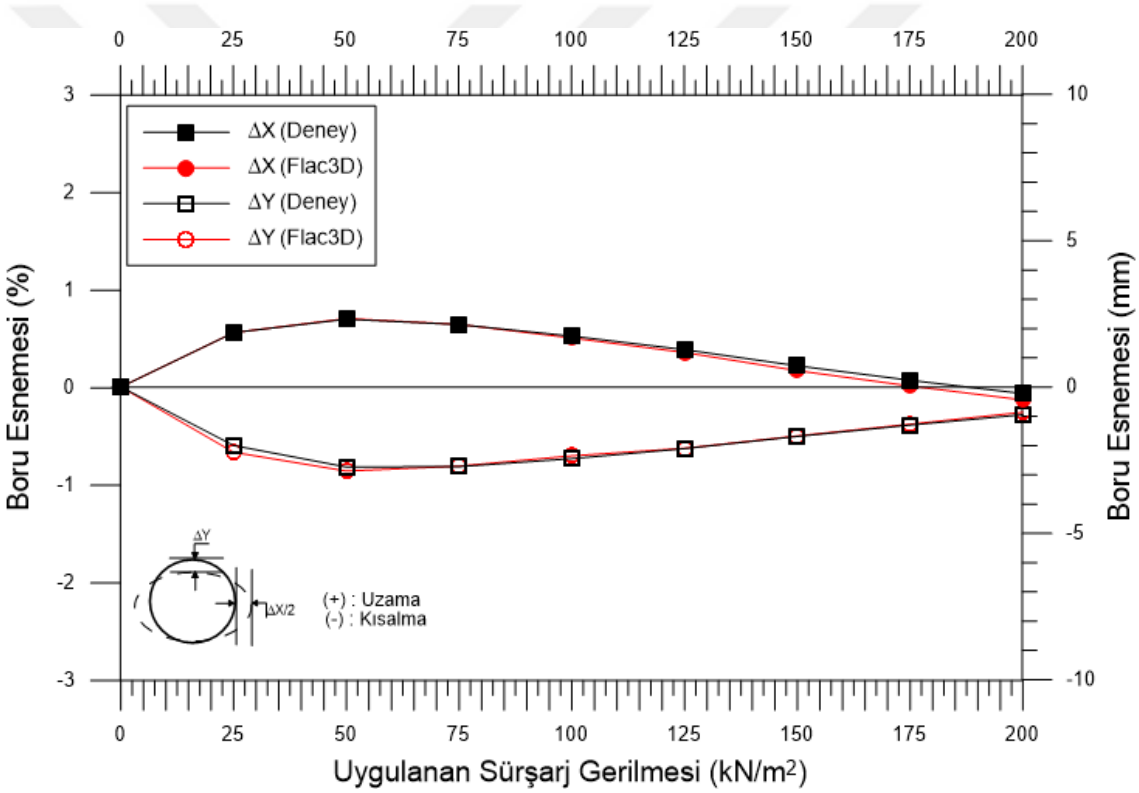


Şekil 4.30 EPS-5 deney analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

Deney sisteminde kullanılan termoplastik borunun düşük yoğunluklu EPS10 ile çepeçevre kuşatıldığı Konfigürasyon-5 modeli için gerçekleştirilen sayısal analizlerde, gerçek deney sisteminde konumlandırılan toprak basınç hücrelerinin konumları FLAC3D modeli üzerinde herhangi bir yer değişikliği yapılmadan doğrudan yerleştirilmiştir. Ancak söz konusu bu noktalar sayısal model üzerinde bir malzeme bölgesi içerisinde yer almamış bunun yerine farklı malzemelerin etkileşim içerisinde olduğu ara yüzeyler üzerinde konumlandırılmıştır. Bir başka ifadeyle ölçüm noktaları

genel itibariyle örneğin alt kum katmanı veya "EPS zone"u içerisine denk gelmemiş, bunun yerine kum-EPS veya boru yüzeyi-EPS arasındaki arayüzeylere denk gelmiştir. Söz konusu bu ara yüzey bölgeleri ise FLAC3D yazılımında her iki tarafta bulunan malzemenin ortak olarak kullandığı düğüm noktalarından oluşmakta ve bu düğüm noktaları iki farklı malzeme bölgesi arasında yük iletimi amacıyla bir köprü görevi görmektedir. Bu nedenle analizler kapsamında elde edilen gerilme sonuçlarının, ölçüm noktası-ara yüzey çakışması dolayısıyla oluşması muhtemel kuvvet dalgalanmalarından etkilenmiş olabileceği tahmin edilmektedir. Ancak bu konuda net bir çıkarımda bulunmak mevcut veriler ışığında bir spekülasyondan daha fazlası olamayacağından bu yaklaşım yalnızca bir tahmin olarak değerlendirilmelidir.

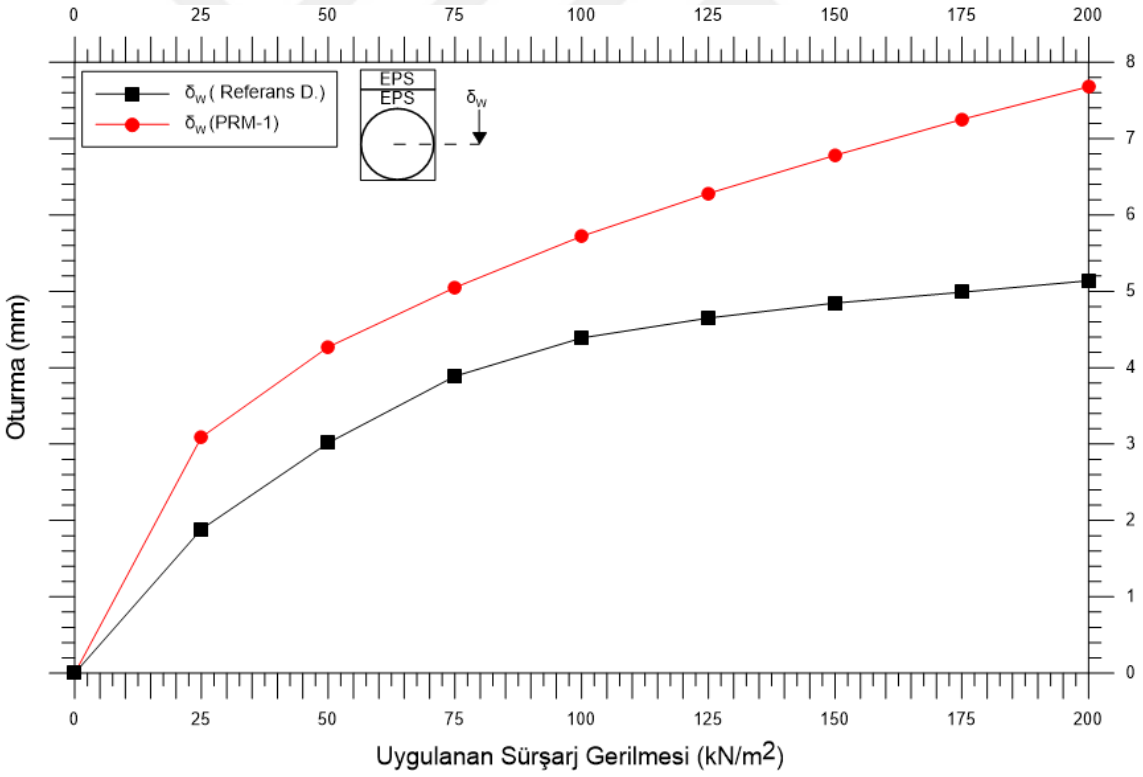
EPS-5 sayısal analizleri kapsamında elde edilen yatay ve düşey boru esneme davranışını gösteren eğriler ise Şekil 4.31'de sunulmuştur.



Şekil 4.31 EPS-5 deney analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve düşey (ΔY) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması

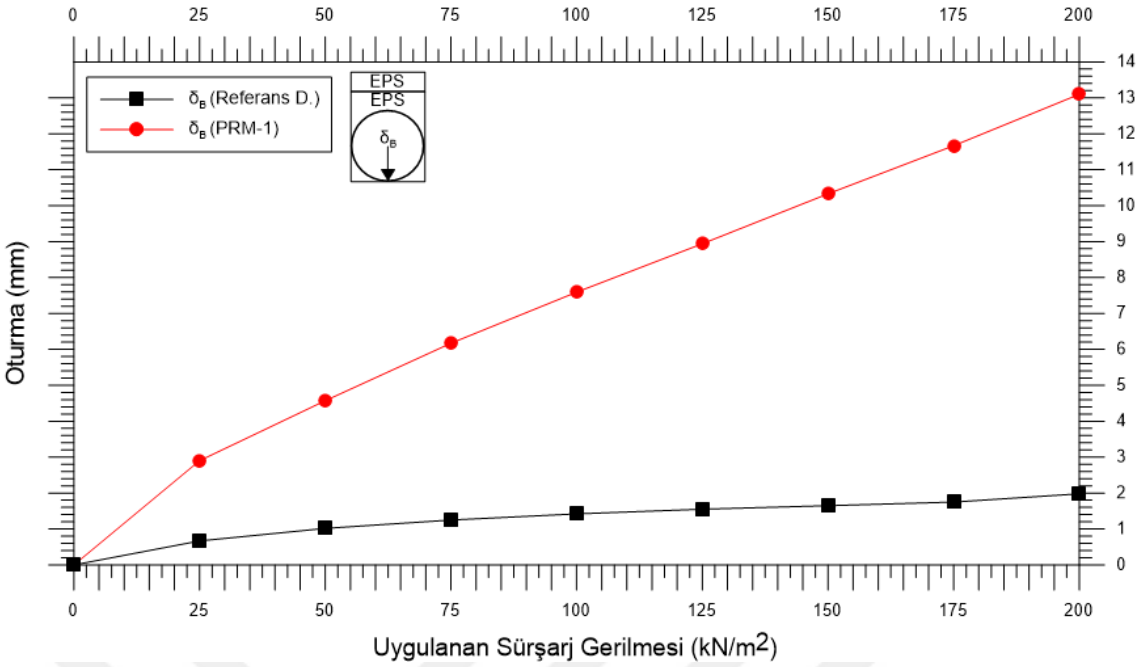
EPS'li farklı konfigürasyonlar için laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen gerçek ölçekli deneylerden Konfigürasyon-1 ve Konfigürasyon-5 için üretilen sayısal modeller üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda EPS sert köpük malzeme için parametreler belirlendikten sonra Konfigürasyon-5 modeli üzerinde farklı parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen analizlerden PRM-1 ve PRM-7 analizlerine ait sonuçlar bu tez çalışması kapsamında değerlendirilecektir.

Deney sisteminde yer alan termoplastik koruge borunun EPS malzeme ile tamamen çevrelendiği Konfigürasyon-5 modeli üzerine FLAC3D ortamında 5 cm kalınlığında bir EPS levha eklenerek oluşturulan yeni model PRM-1 olarak isimlendirilmiştir. Gelinen son aşamaya kadar kalibrasyonu yapılan tüm malzeme parametreleri, diğer tüm parametrik analizlerde olduğu gibi bu analizde de aynen kullanılmış ve elde edilen sonuçlar grafikler üzerinde Akınay [1] tarafından gerçekleştirilen gerçek ölçekli "Referans Deney" sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen parametrik çalışma sonucunda S1 ve S3 noktalarında elde edilen oturma eğrileri sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.32 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

PRM-1 parametrik analizi sonucunda boru yatay simetri çizgisi üzerinde yer alan S1 ve boru taban noktasında yer alan S3 noktalarında elde edilen sonuçlar incelendiğinde gerçekleşen oturmaların Referans deneyde gerçekleşen oturma miktarlarından daha büyük olduğu görülmüştür.

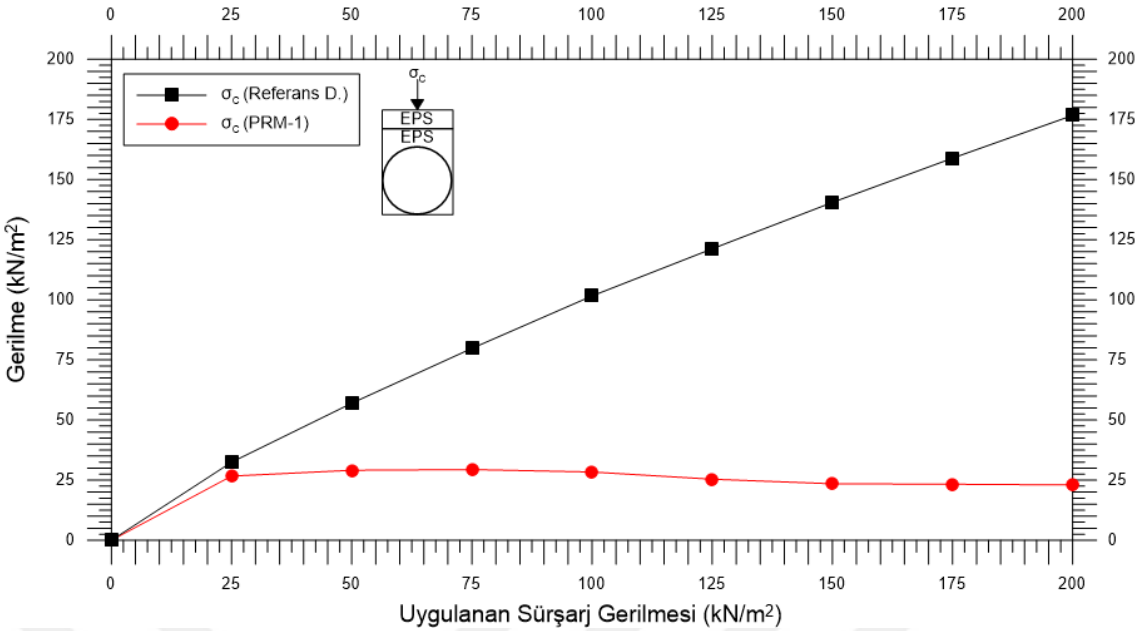


Şekil 4.33 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

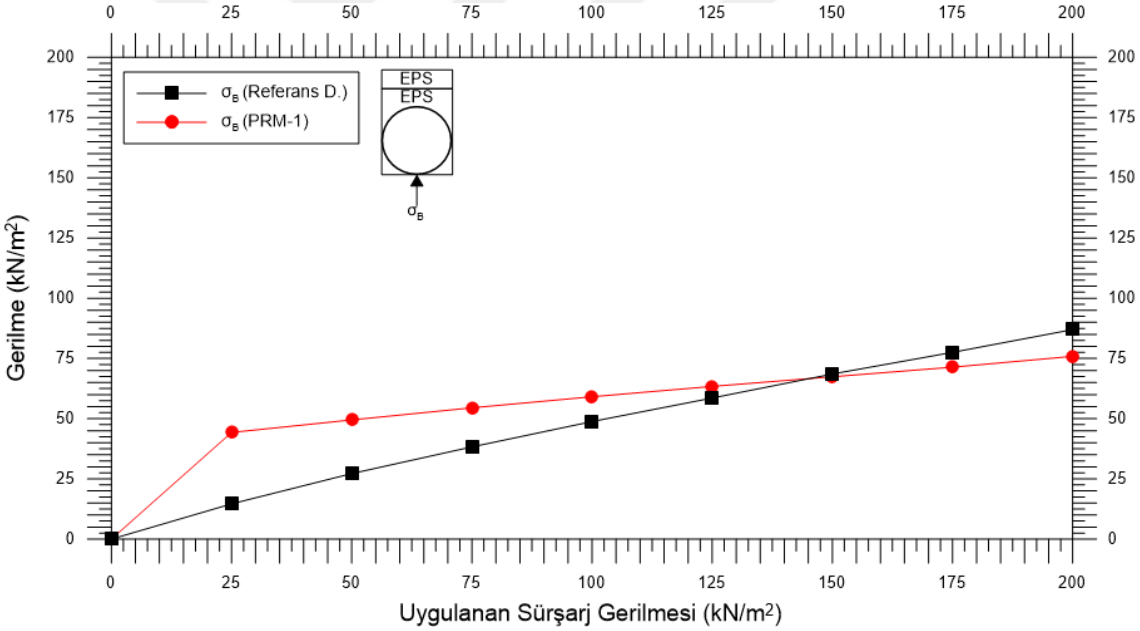
Ayrıca parametrik analiz sonuçları Konfigürasyon-5'e ait FLAC3D sonuçları ile karşılaştırıldığında (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25) S1 ve S3 noktalarında meydana gelen oturmalar arasındaki farkın oldukça sınırlı kaldığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuç neticesinde sürşarj yüklerine maruz kalan ve çevresi tamamen EPS ile kaplanmış esnek termoplastik bir boru sisteminin üzerine ayrıca eklenecek EPS levhanın boru yan ve taban seviyelerindeki oturma miktarı üzerinde çok büyük etkisi olmadığı kanaatine varılmıştır. Bu durumun temel nedeni olarak da EPS malzemenin düşey yük etkisi altında sıkışabilir bir malzeme olması dolayısıyla Konfigürasyon-5 modeli üzerine eklenecek fazladan EPS levhaların bir miktar sıkışarak boru ve kum zeminde oluşması muhtemel oturmaları kompanse ettiği düşünülmektedir.

PRM-1 parametrik analizleri sonucunda elde edilen boru taç seviyesindeki (P1) ve boru taban seviyesindeki (P2) gerilme eğrileri sırasıyla Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te verilmiştir. Ancak gerçek ölçekli deney sisteminde Konfigürasyon-5 modeli için P1 noktasındaki basınç hücresi EPS levhanın üst yüzeyine yerleştirilmişken, bu parametrik modele eklenen 5 cm kalınlığındaki levha nedeniyle söz konusunu basınç hücresine karşılık gelen ölçüm noktası 5 cm yukarı taşınmış ve ölçüm sonuçları bu noktadan alınmıştır.

Analizlerden elde edilen sonuçlar Referans deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, sisteme eklenen 5 cm kalınlığındaki EPS levha dolayısıyla boru tacında (P1) büyük miktarda gerilme azalışı gözlenmiştir. Boru tabanında elde edilen gerilmelerde ise Referans deney sonuçlarına kıyasla büyük farklılıklar gözlenmemiştir.



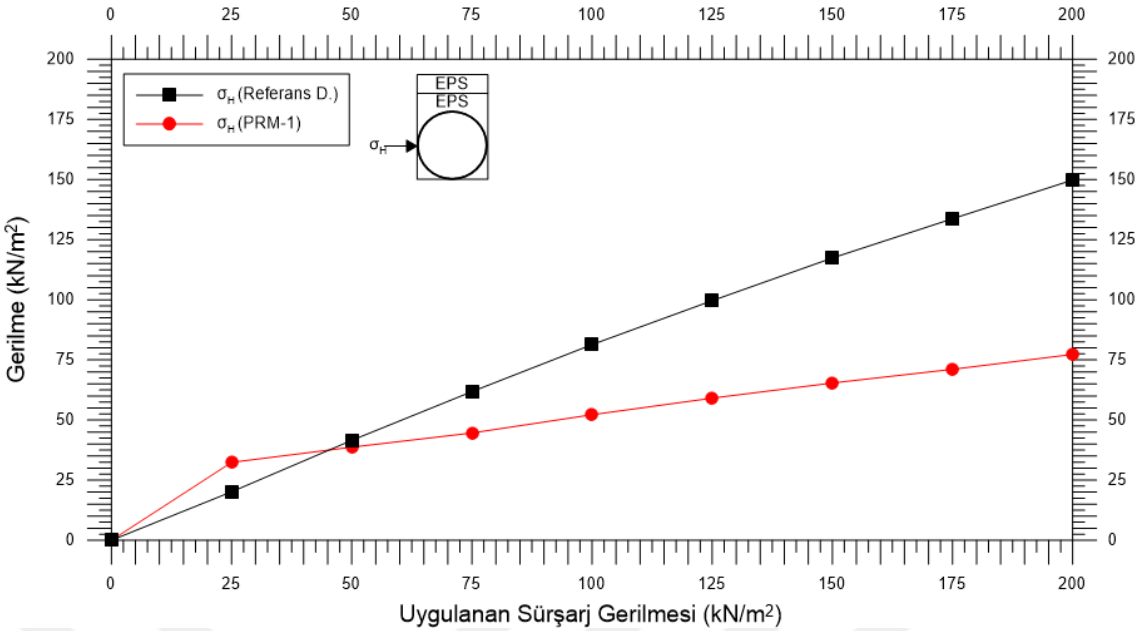
Şekil 4.34 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.35 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

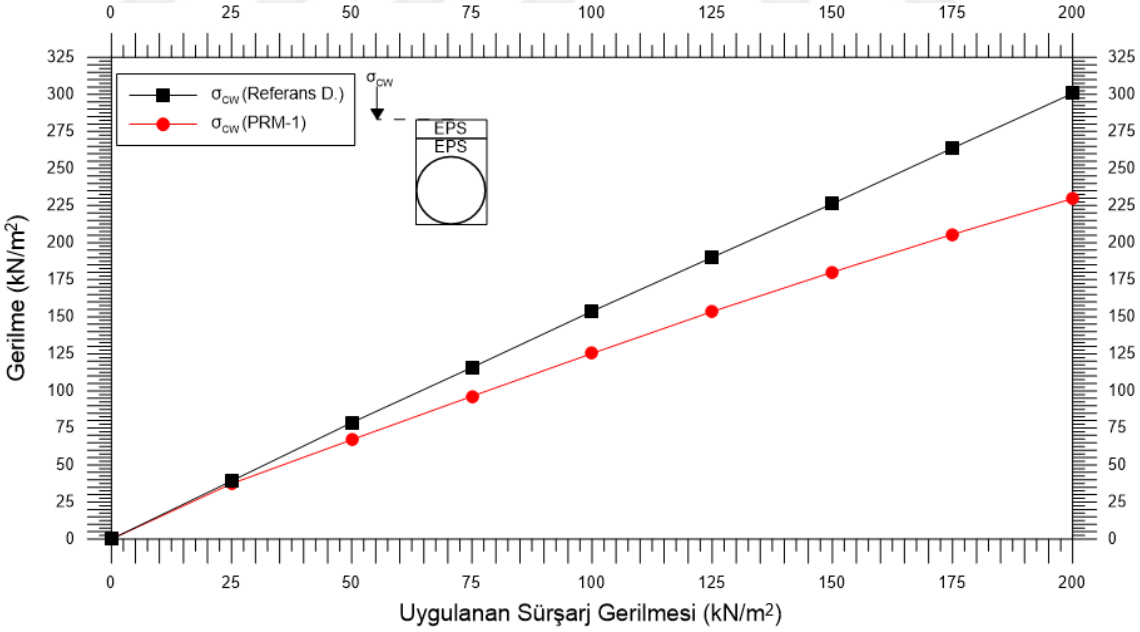
Analiz sonuçlarında boru yatay simetri çizgisi üzerinde boru yan yüzeyindeki P3 yatay gerilme değerlerine ait grafik Şekil 4.36'da verilmiştir.

P3 noktasında elde edilen gerilme grafiği Referans deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında elde edilen yatay gerilmelerin artan sürşarj yükü ile birlikte daha küçük değerler verdiği görülmüştür.

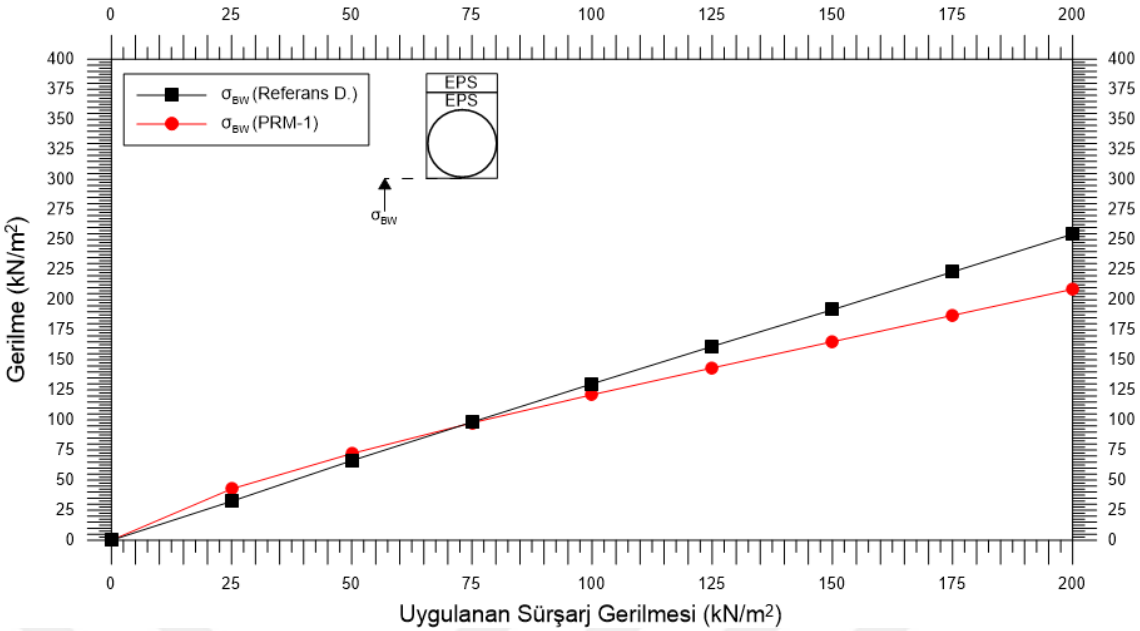


Şekil 4.36 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

Aynı parametrik analiz çalışması kapsamında boru taç ve taban noktaları seviyesinde boru merkezinin 35 cm doğusunda konumlandırılan P5 ve P7 gerilme noktalarında alınan sonuçlar ise sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de verilmiştir.



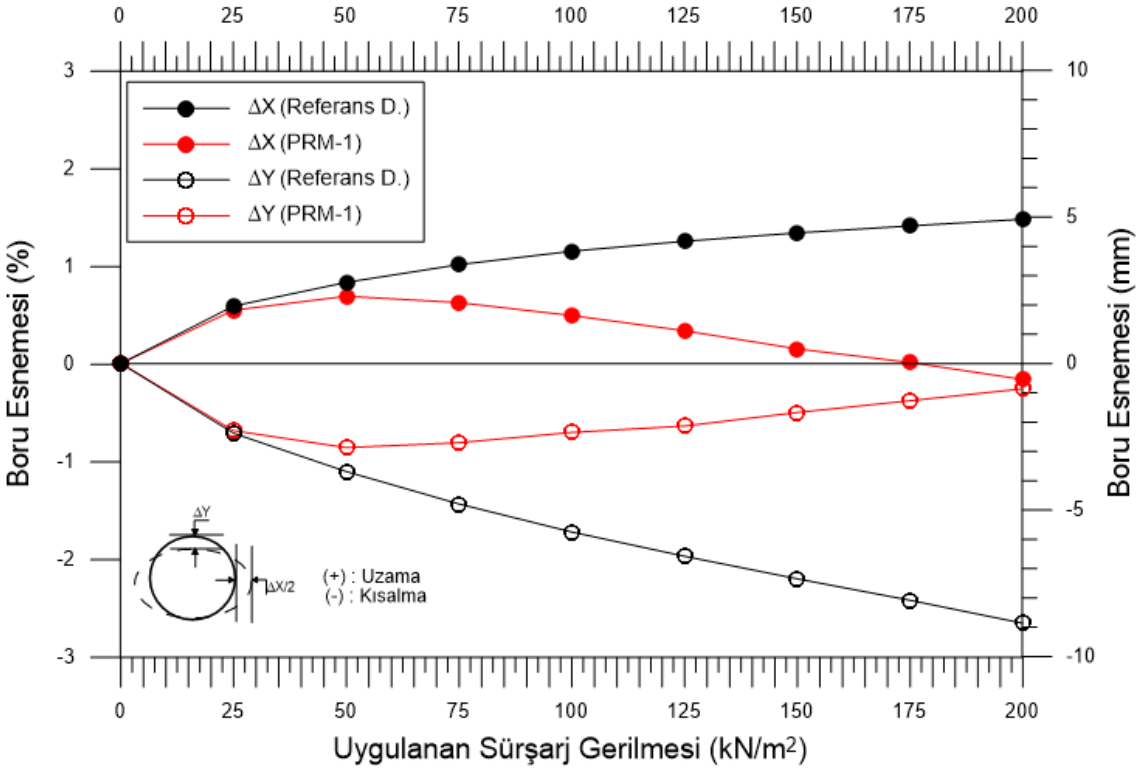
Şekil 4.37 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.38 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

P5 noktasında elde edilen gerilme eğrileri incelendiğinde parametrik analiz sonuçlarının eğri boyunca Referans deney sonuçlarının altında kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte Konfigürasyon-5 FLAC3D sonuçları (Şekil 4.29) ile karşılaştırıldığında P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinde bir miktar artış olduğu görülmektedir. P7 noktasında elde edilen gerilme değerleri ise Konfigürasyon-5 FLAC3D sonuçlarına (Şekil 4.30) göre önemli ölçüde azalmış ve Referans deney sonuçları ile de benzer bir eğri oluşturmuştur.

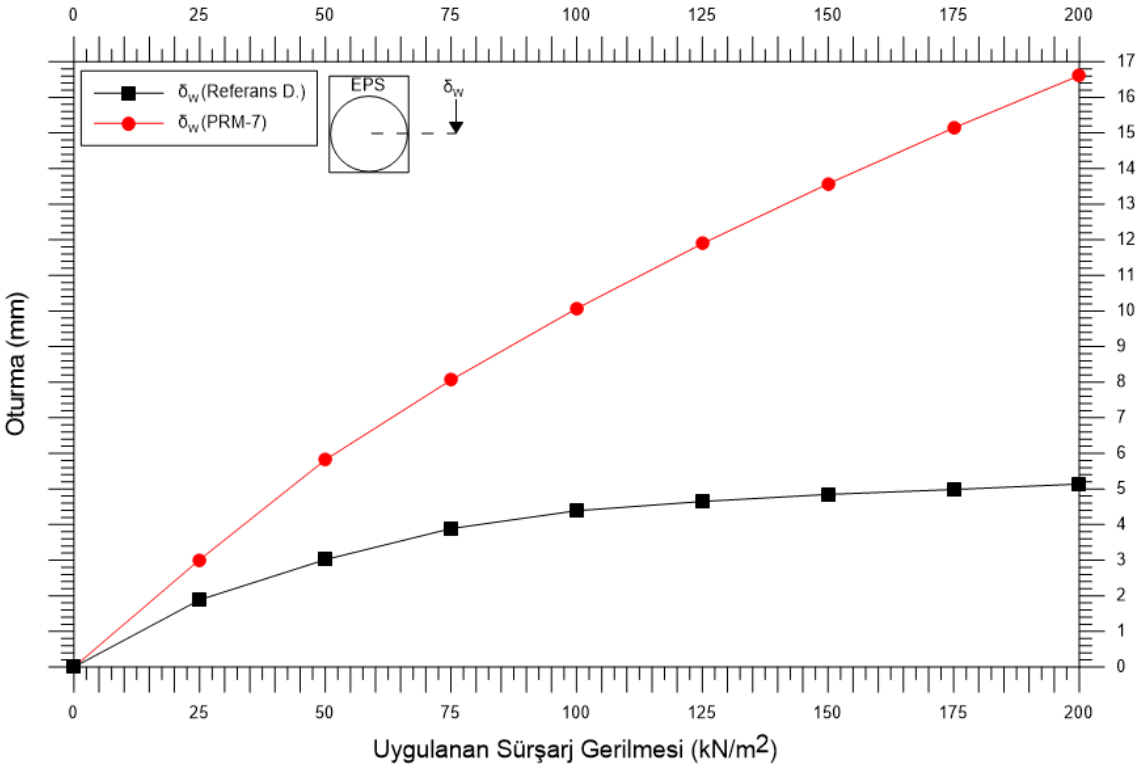
Analizler sonucunda elde edilen boru esneme grafikleri ise yatay ve düşey doğrultular için Şekil 4.39'da verilmiştir. Parametrik çalışma sonucunda elde edilen boru esnemeleri gerçek ölçekli Referans deney sonuçları ile karşılaştırıldığında boru davranışında büyük ölçekli değişimler gözlenmiştir. PRM-1 sayısal modelinde tanımlanan EPS geometrisinin, düşey yük etkisi altındaki HDPE borunun esneme miktarını Referans deney sonuçlarına göre önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.



Şekil 4.39 PRM-1 parametrik analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve düşey (ΔY) doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması

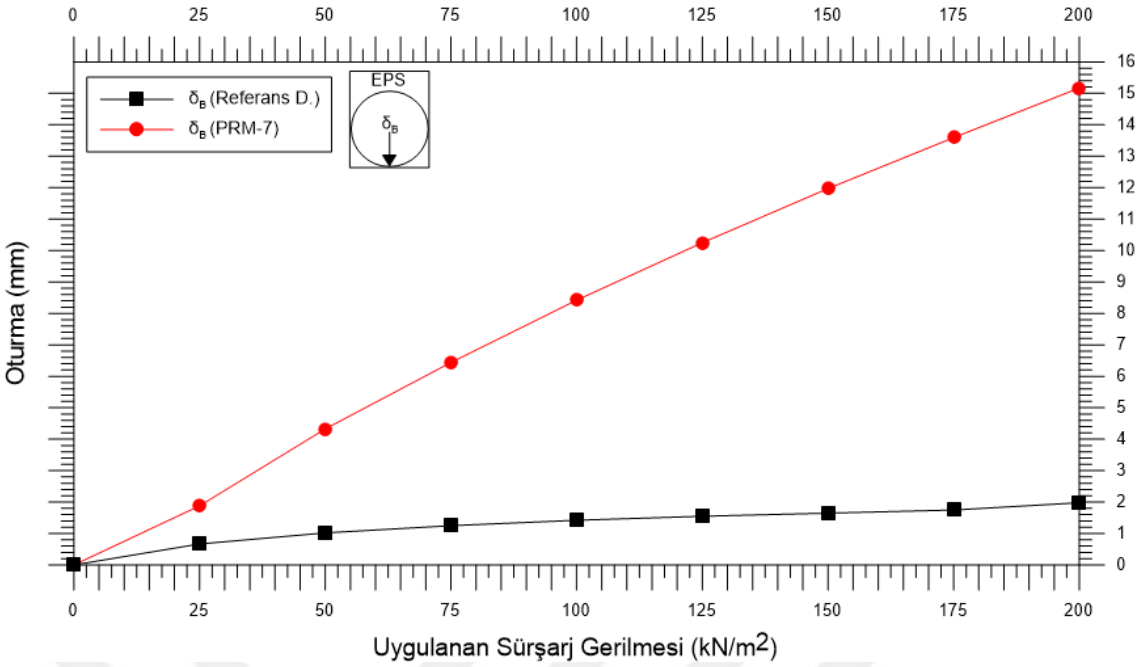
EPS'li konfigürasyon analizleri kapsamında gerçekleştirilen parametrik çalışmalardan "PRM-7" sayısal analiz çalışması bu kapsamda ele alınan ikinci çalışma olmuştur. Gerçek ölçekli deneylerden Konfigürasyon-5 modeli esas alınarak gerçekleştirilen bu çalışmada, deneylerde kullanılan ve borusuz deney analizleri aşamasında FLAC3D yazılımı için parametre kalibrasyonu yapılan kum zemin olarak modellenmemiş, bunun yerine düşük plastisiteli bir kumlu silt zemin malzemesi olan ML90 geri dolgu malzemesi olarak modellenmiştir. Bu analiz aşamasında kullanılan kumlu silt malzemesine ait Plastic-Hardening malzeme parametreleri Tablo 3.9'da verilmiştir (Bkz. Bölüm 3.2.3).

PRM-7 parametrik analiz çalışması sonucunda elde edilen S1 ve S3 oturma eğrileri Referans deney sonuçları ile sırasıyla Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.40 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

Elde edilen oturma eğrileri incelendiğinde, geri dolgu malzemesi olarak kum yerine düşük plastisiteli kumlu silt malzeme kullanılması durumunda boru yatay simetri ekseni üzerindeki S1 noktasında elde edilen oturma değerlerinin deney sonuçlarına göre oldukça büyük miktarlarda gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.40'ta görüldüğü üzere artan sürşarj yükleri ile beraber S1 noktasında meydana gelen zemin oturmaları arasındaki fark da artmış; 200 kPa sürşarj yükü altında 11,5 mm kadar daha fazla oturma, kum yerine kumlu silt zemin kullanılması durumu için gerçekleşmiştir.

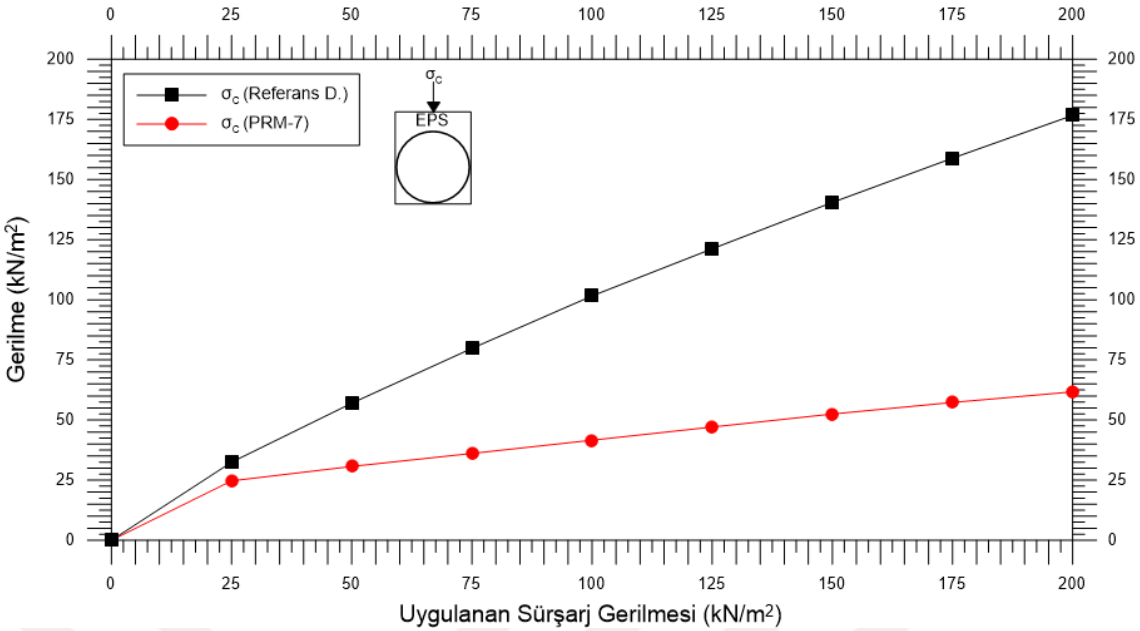


Şekil 4.41 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda S3 noktasında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

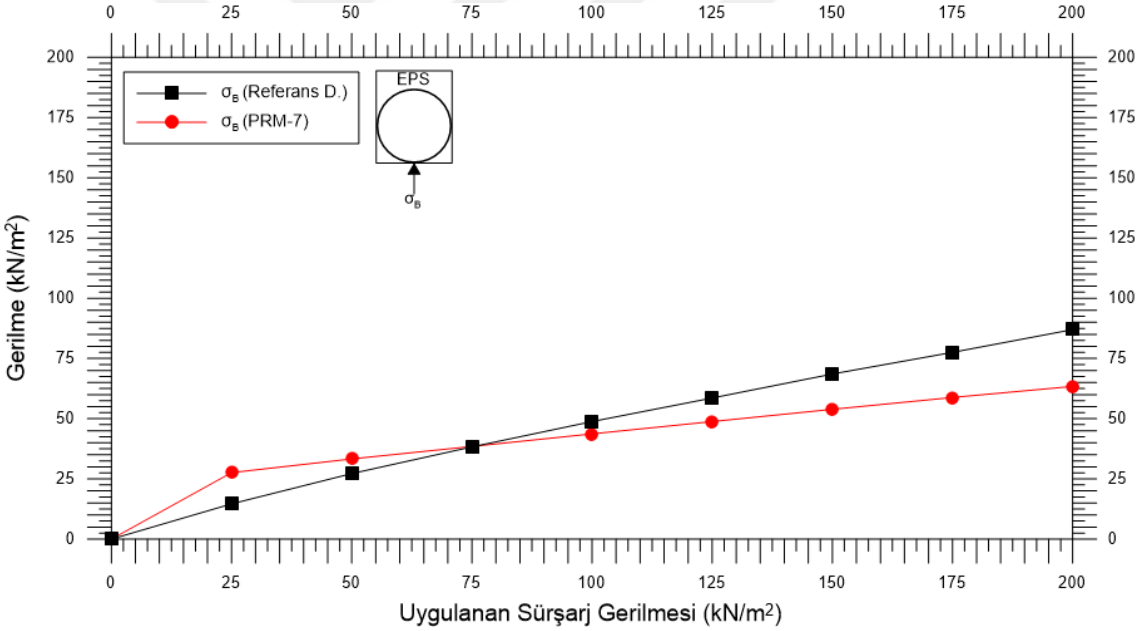
Şekil 4.41'de görülen S3 boru tabanına ait oturma grafiğinde de benzer bir davranış görülmektedir. Eğriler incelendiğinde kumlu silt zeminde elde edilen oturma değerlerinin çok daha büyük sonuçlar verdiği görülmektedir.

PRM-7 analizleri sonucunda elde edilen oturma grafiklerine ait eğriler incelendiğinde, geri dolgu malzemesi olarak düşük plastisiteli kohezyonlu geri dolgu malzemesi kullanımının boru çevresindeki oturma miktarlarını büyük oranlarda artırdığı sonucuna varılabilir.

PRM-7 parametrik analiz çalışması kapsamında boru taç ve taban seviyelerinde elde edilen düşey gerilme değerleri Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.42 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P1 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

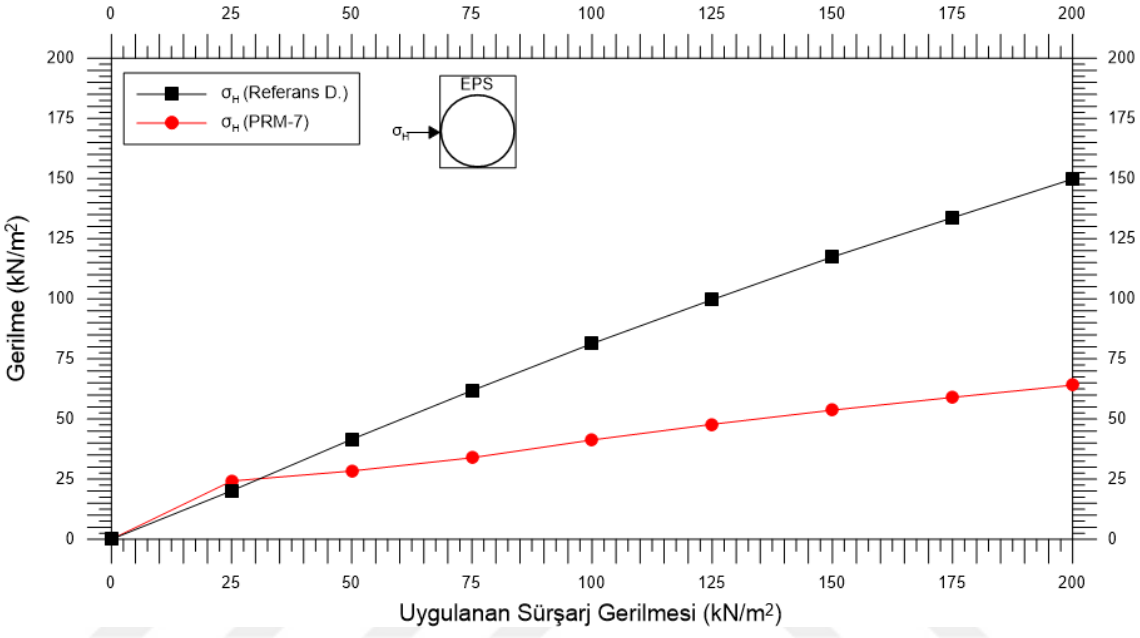


Şekil 4.43 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P2 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

Boru taç seviyesinde bulunan P1 noktasında elde edilen düşey gerilme değerleri Referans deney sonuçları ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların deney sonuçlarına kıyasla daha küçük değerler verdiği görülmektedir. Boru tabanında bulunan P2 noktasına ait sonuçlara bakıldığında ise Referans deney sonuçlarına yakın sonuçlarla karşılaşılmıştır.

P1 ve P2 grafiklerindeki sonuçlardan hareketle bir gömülü boru sisteminde geri dolgu malzemesi olarak kohezyonsuz granüler dolgu malzemesi yerine kohezyonlu geri dolgu malzemesi kullanılması durumunda boru taç ve taban noktaslarında meydana gelecek gerilmelerin daha küçük değerlerde olacağı sonucuna varılmıştır.

Boru yatay simetri ekseni üzerindeki yatay doğrultulu P3 gerilme eğrilerini gösteren grafik Şekil 4.44'te verilmiştir.

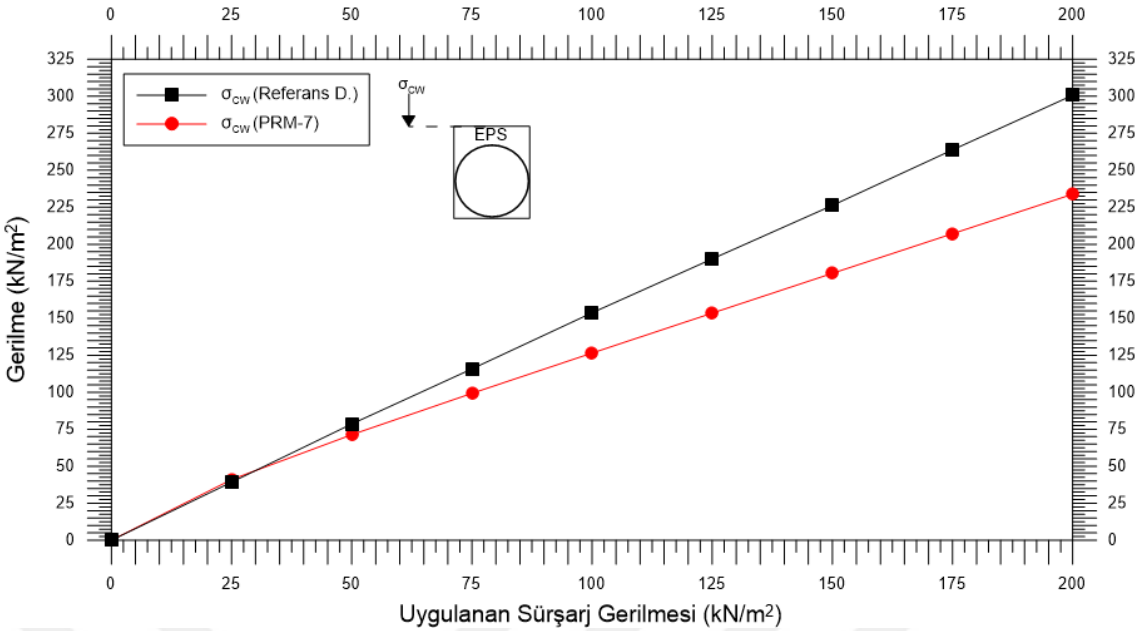


Şekil 4.44 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P3 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

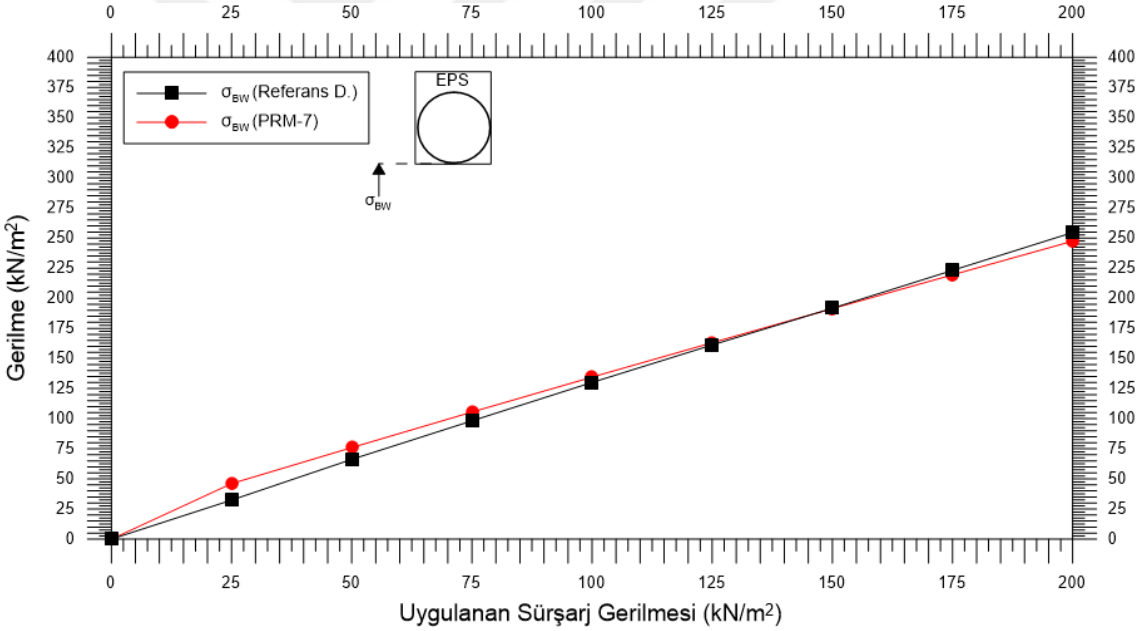
P3 noktasında elde edilen yatay gerilme eğrilerinde de boru taç ve taban noktalarındaki gerilme davranışına benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. PRM-7 analizlerinde kullanılan ML90 kumlu silt geri dolgu malzemesinin etkisiyle, kum geri dolgu malzemesinin kullanıldığı gerçek ölçekli referans deneyde elde edilen yatay doğrultulu gerilme değerlerinin daha büyük sonuçlar verdiği görülmüştür.

PRM-7 analizi sonucunda boru taç ve taban seviyelerinde ve boru merkezinin 35 cm doğusunda konumlandırılan sırasıyla P5 ve P7 noktalarında elde edilen düşey gerilme sonuçları ise Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da gösterilmiştir.

Elde edilen P5 eğrisi referans deney sonuçları ile karşılaştırıldığında diğer gerilme grafiklerine benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Analizlerde kohezyonlu geri dolgu malzemesi kullanılması durumunda boru taç seviyesinde boru merkezinin 35 cm uzağında, kum geri dolgu malzemesi kullanılması durumuna göre daha küçük gerilme değerlerinin hesaplandığı görülmüştür.



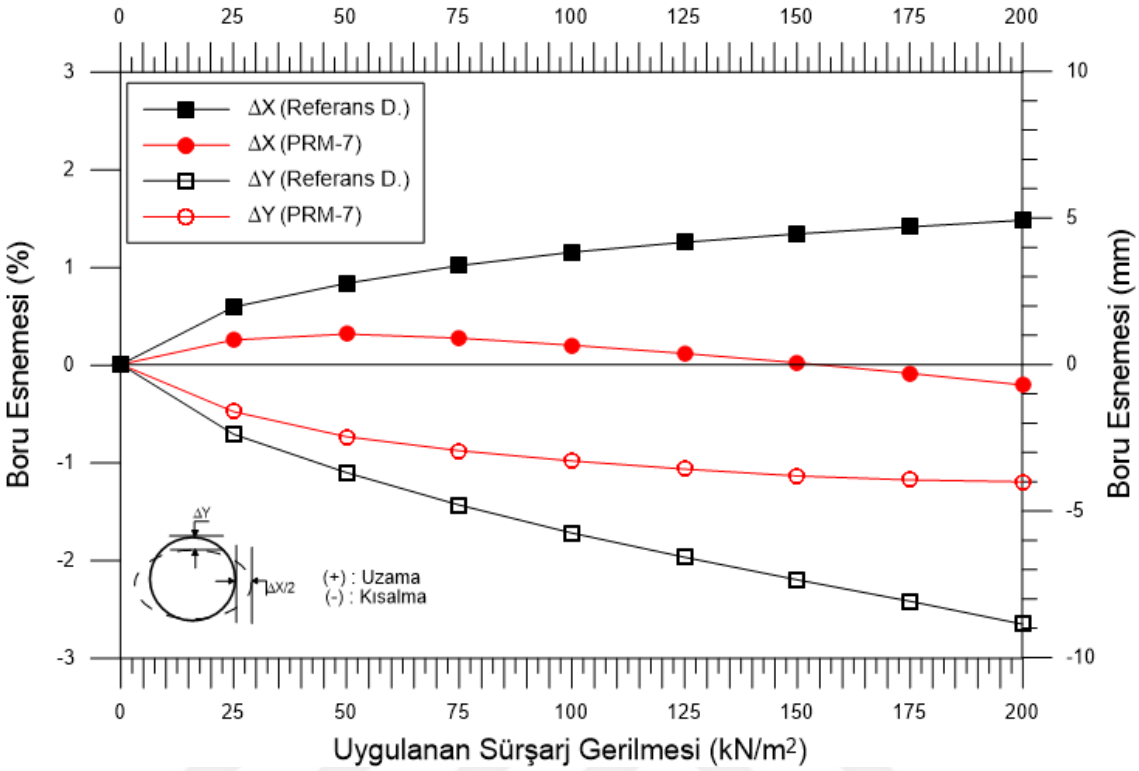
Şekil 4.45 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P5 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması



Şekil 4.46 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda P7 noktasında elde edilen gerilme değerlerinin karşılaştırması

Bununla birlikte boru taban seviyesinde boru merkezinin 35 cm uzağında geri dolgu malzemesi içerisinde yer alan P7 noktasında ise Referans deneyde elde edilen gerilme davranışına benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür.

PRM-7 analizleri kapsamında yatay ve düşey doğrultularda elde edilen boru esneme değerleri Şekil 4.47'de sunulmuştur.



Şekil 4.47 PRM-7 parametrik analizleri sonucunda yatay (ΔX) ve (ΔY) düşey doğrultularda ölçülen boru esneme değerlerinin karşılaştırması

Sayısal analiz sonucunda elde edilen boru esneme eğrileri gerçek ölçekli Referans deney sonuçları ile karşılaştırıldığında yatay ve düşey doğrultulardaki esneme sonuçlarının deney sonuçlarına göre oldukça düşük değerler verdiği görülmüştür.

4.3.1 Düşey ve Yatay Kemerlenme Faktörlerinin Belirlenmesi

Sürşarj yükleri altındaki gömülü bir boru sistemine etkiyen zemin gerilmelerinin hesaplanmasında kullanılan geleneksel yöntemlerden biri de düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin belirlenmesidir. Boyutsuz olan bu faktörler sürşarj yüklerine maruz kalan gömülü bir borunun kendisini çevreleyen zemin ortamı ile etkileşimi dolayısıyla gerçekleşen kemerlenme olayını tanımlamak için kullanılmaktadır [3]. Düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörünü (HAF) ifade eden denklemler sırasıyla Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 ile ifade edilmiştir.

$$\text{VAF} = \frac{W_e}{PL} = \frac{2N_{sp}}{PL} \qquad \text{Denklem 3.1}$$

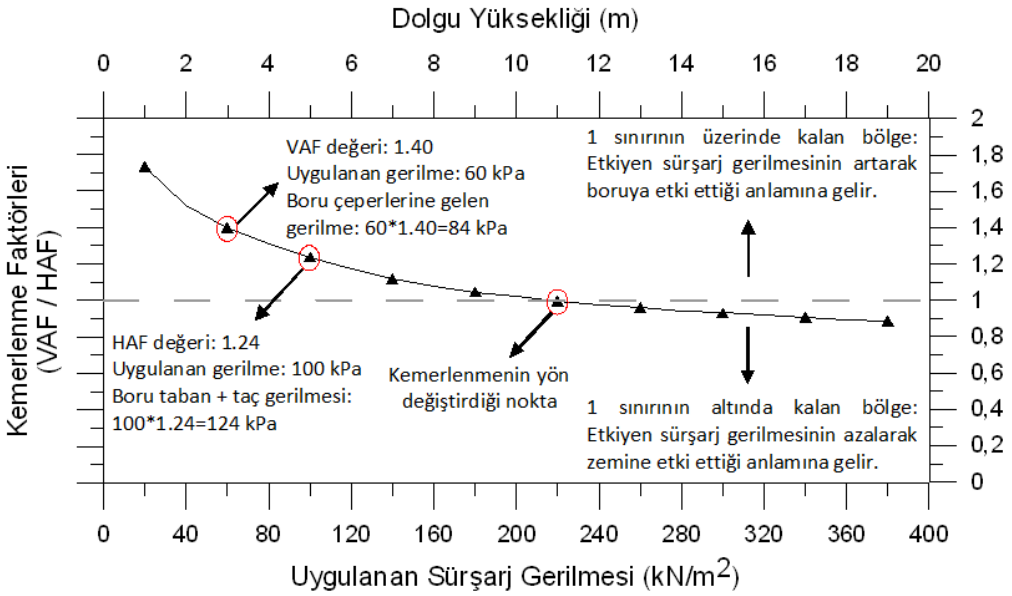
$$\text{HAF} = \frac{W_h}{PL} = \frac{N_c + N_i}{PL} \qquad \text{Denklem 3.2}$$

Denklem 3.1 ve 3.2'de yer alan değerler;

- We = düşey doğrultudaki toplam zemin yükünü
- Wh = yatay doğrultudaki toplam zemin yükünü
- PL = Prizma yükünü (dolgu yüksekliği x birim hacim ağırlık)
- Nsp = boru yatay eksenine etki eden zemin gerilmesini
- Nc = boru tacında oluşan toplam zemin gerilmesini
- Ni = boru tabanında oluşan toplam zemin gerilmesini

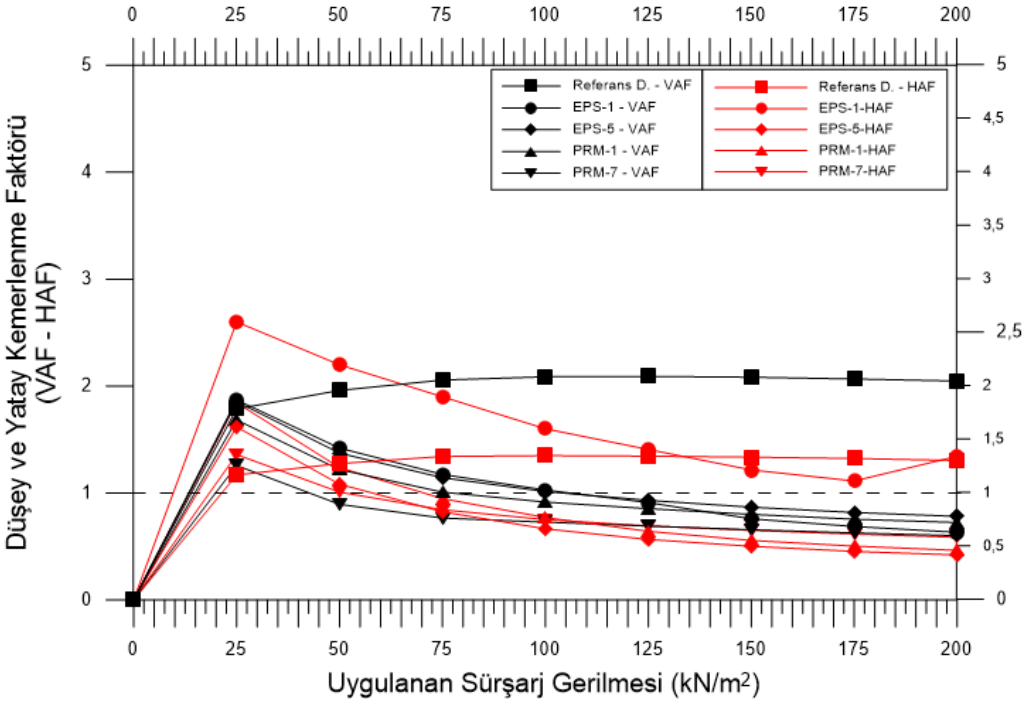
ifade etmektedir [3].

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 yardımıyla elde edilen düşey ve yatay kemerlenme faktörleri EPS Geofoam, zemin ve boruya ait malzeme parametrelerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bu formüllerin kullanılması durumunda her bir parametrenin değişiminde elde edilen gerilme, oturma ve esneme değerlerini ayrı ayrı ele almak yerine doğrudan kemerlenme faktörlerinin değişimi incelenmiş ve değişen malzeme parametrelerinin neden olduğu malzeme davranışları grafikler yardımı ile sunulmuştur. Bu grafiklerde belirtilen değerlerin anlaşılması için örnek bir grafik Şekil 4.48 ile sunulmuştur. Bu örnek üzerinden düşey kemerlenme faktörünün sayısal değeri ile boru çeperlerine gelen toplam gerilmeler arasındaki ilişki ve yatay kemerlenme faktörünün sayısal değeri ile boru tacı ve tabanına gelen toplam gerilmeler arasındaki ilişki sayısal olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.48 Düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin değişimini gösteren örnek grafik üzerinden açıklamalar [3]

Bu tez çalışması kapsamında sayısal analizleri gerçekleştirilen Referans model, Konfigürasyon-1 (EPS-1) ve Konfigürasyon-5 (EPS-5) ile PRM-1 ve PRM-7 parametrik analizlerine ait sonuçlardan yararlanılarak düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin kademeli olarak artan sürşarj gerilmelerine bağlı olarak değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.49'da gösterilmiştir.



Şekil 4.49 Gerçekleştirilen sayısal analizlere ait düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin değişimi

Şekil 4.49'da gösterilen sonuçlara göre tüm analizlerde 0-25 kPa yükleme aralığında hem düşey hem de yatay kemerlenme faktörlerinin pik değerine ulaştığı görülmüştür. Bununla beraber Referans modelde 25-200 kPa arası yükleme adımları için düşey ve yatay kemerlenme faktörleri yaklaşık olarak sabit kalmış ve her iki kemerlenme faktörü değeri de düşey eksende 1 sınırının üzerinde kalmıştır. EPS-1 ve EPS-5 konfigürasyon sonuçları incelendiğinde artan gerilmelerle birlikte kemerlenme faktörlerinde azalma eğilimi görülmüş ve düşey kemerlenme faktörlerinin 75 kPa - 100 kPa değerlerinden sonra 1 sınırının altına geçtiği görülmüştür. Çalışma kapsamında incelenen PRM-1 ve PRM-7 parametrik analiz sonuçları ele alındığında ise 25 kPa yükleme değerinde pik değerine ulaşan düşey ve yatay kemerlenme faktörlerinin artan sürşaj yükü ile birlikte azalarak 50 kPa ve 75 kPa değerlerinden sonra düşey eksende 1 sınırının altına indiği görülmüştür. Kemerlenme faktörü değerlerinin düşey eksende 1 sınırının üzerinde kalması ise uygulanan sürşarj yüklerinin boruya artarak etki ettiği, 1 sınırının altında kalması durumunda sürşarj yüklerinin boruya azalarak etki ettiği anlamına gelmektedir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının sonuç bölümünde, Akınay [1] tarafından doktora tez çalışması olarak gerçekleştirilen gerçek ölçekli laboratuvar deneyleri arasından seçilerek FLAC3D yazılımı ile sayısal modeli oluşturulduktan sonra kalibrasyonu yapılan sayısal modellerden elde edilen sonuçlar ve laboratuvar deneylerinde yer almayan ancak FLAC3D yazılımında modellenerek analizleri gerçekleştirilen iki farklı parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlara ait değerlendirmelere yer verilecektir.

5.1 FLAC3D Yazılımı ile Sayısal Modellerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, FLAC3D (2017) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde "Borusuz Deney" analizinde kum geri dolgu malzemesinin ve "Referans Deney" analizinde HDPE koruge boru malzemesine ait parametrelerin kalibrasyonu yapılmış,bu amaçla mümkün olduğunca gerçek deney sonuçlarına yaklaşılmaya çalışılmış ve genel olarak kabul edilebilir ölçüde gerçek deney sonuçlarına yaklaşıldığı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte hem borusuz model analizinde elde edilen oturma ve gerilme grafikleri hem de referans model analizinde elde edilen oturma, gerilme ve boru esneme grafiklerinde bazı sonuçların gerçek ölçekli deney sonuçları ile neredeyse bire bir örtüştüğü eğriler elde edilebilmiş ancak bazı FLAC3D eğrileri yaklaşık olarak deney sonuçlarına uygun çıkmıştır.

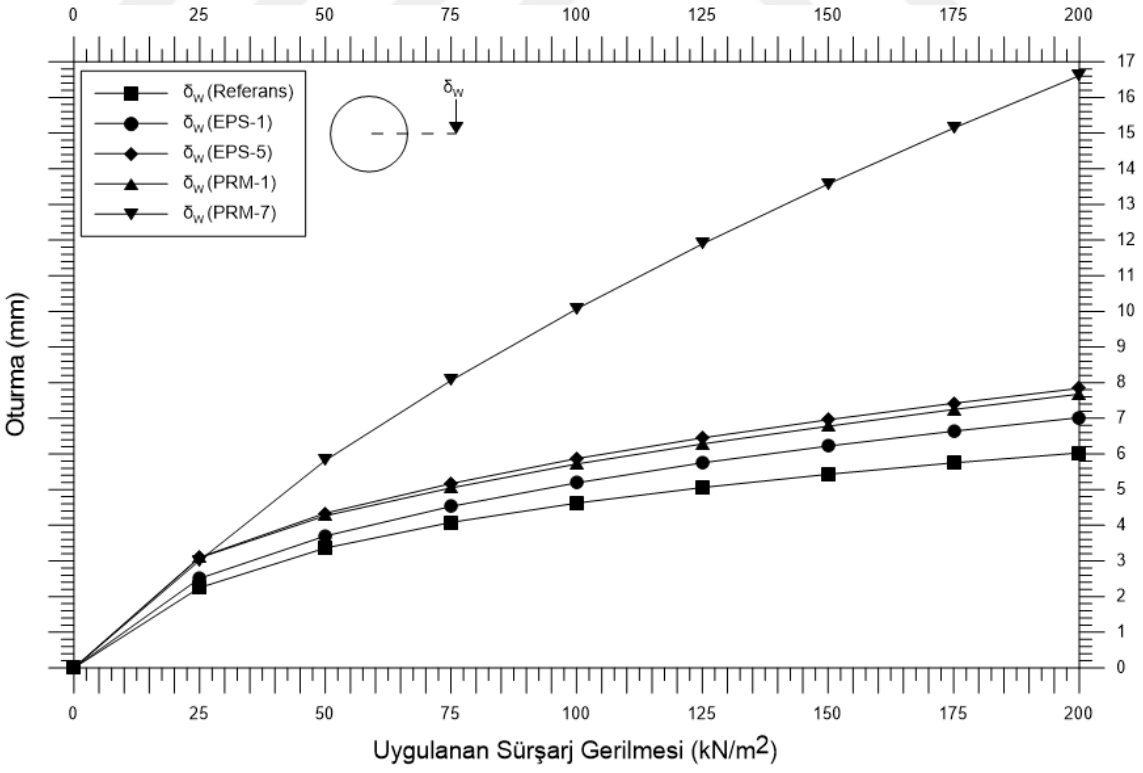
Çalışma kapsamında borusuz ve referans model analizleri sonucunda elde edilen kalibre edilmiş parametrelerin kullanıldığı ikinci aşama kalibrasyon çalışmaları olan "Konfigürasyon-1 (EPS-1)" ve "Konfigürasyon-5 (EPS-5)" çalışmalarında ise gerçek ölçekli deney sisteminde oluşturulan modellerde kullanılan EPS10 malzemesine ait parametrelerin kalibrasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Ardından FLAC3D yazılımı ile sekiz farklı parametrik çalışma gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalardan kayda değer farklı sonuçlar veren iki parametrik çalışma bu tez kapsamına alınmıştır. Gerçekleştirilen EPS'li konfigürasyon analiz sonuçlarında elde edilen davranış eğrileri

gerçek ölçekli deney sonuçlarına ait eğrilerle karşılaştırıldığında da borusuz ve referans model sonuçlarında gözlenen duruma benzer sonuçlar ortaya çıkmış; FLAC3D sonuçlarının kabul edilebilir sonuçlar verdiği düşünülmüştür. Ayrıca belirtmek gerekir ki; EPS-1 sayısal analizine ait P2 gerilme grafiğinde gösterilen FLAC3D sonucu kabul edilebilir hata sınırının dışında kalmış ve eğri anlamsız bir dalgalanma göstermiştir. Bu noktada 19 aylık uzun soluklu bir çalışmaya rağmen programa tüm yönleriyle hakim olunamadığından söz konusu probleme de yeterince müdahale etmenin mümkün olmadığını belirtmek gerekir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen FLAC3D analizlerine ait sonuçlar değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. **Boru yatay simetri çizgisi üzerinde yer alan S1 noktasında meydana gelen oturmalar bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında S1 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 6,27 mm, referans model analizi sonucunda 6,03 mm, EPS-1 model analizi sonucunda 7,02 mm, EPS-5 analizi sonucunda 7,84 mm, PRM-1 analizi sonucunda 7,68 mm, PRM-7 analizi sonucunda ise 16,61 mm oturma değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

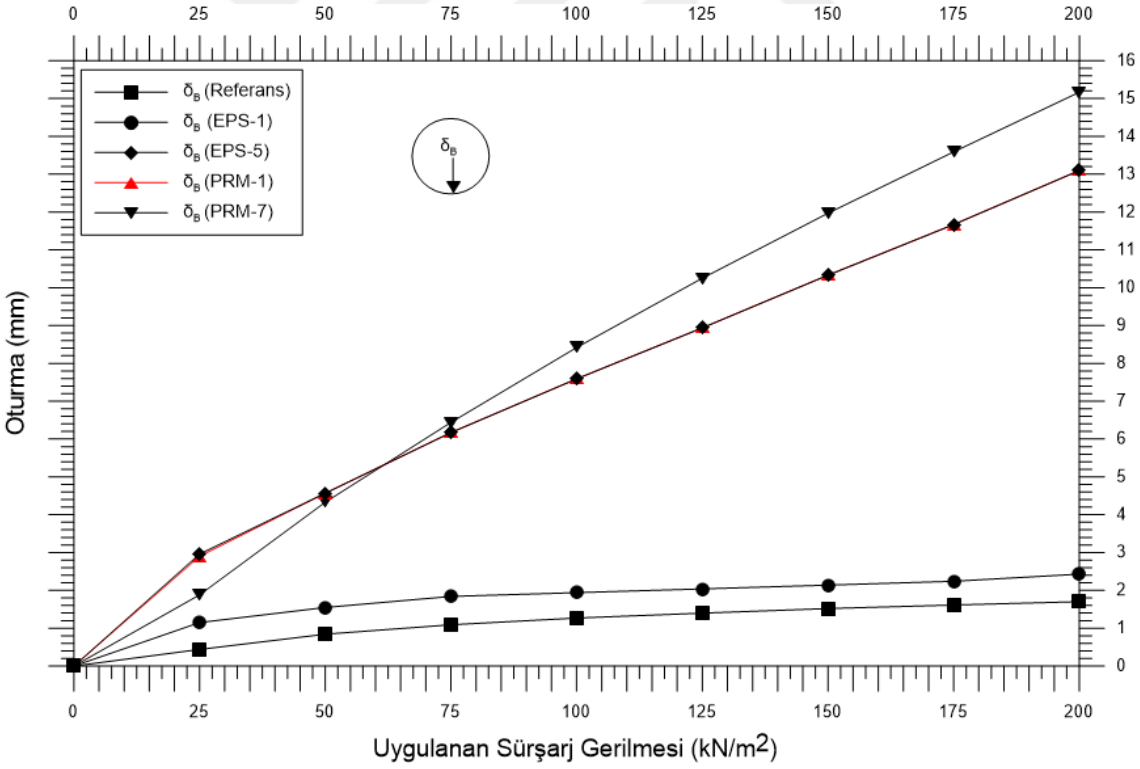


Şekil 5.1 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru yanında meydana gelen oturmaların karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda S1 oturmaları bakımından deney sisteminde borunun olup olmaması sonuçlar üzerinde ciddi bir yaratmamıştır. Sistemdeki borunun tamamen EPS10 levhalarla kaplanması durumunda, boru üzerine 5 cm kalınlığında EPS10 levha yerleştirilmesi durumuna göre nispeten daha büyük oturmalar gerçekleşmiştir. Etrafı tamamen EPS10 levhalarla çevrili sistemin üzerine ayrıca 5 cm kalınlığında EPS10 levha eklendiğinde ise oturma miktarında görece azalma meydana gelmiştir. Sisteme kum yerine düşük plastisiteli kumlu silt malzeme yerleştirildiğinde ise S1 noktasında meydana gelen oturma miktarında % 216'ya varan bir artış söz konusu olmuştur.

2. **Boru tabanında yer alan S3 noktasında meydana gelen oturmalar bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında S3 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 1,88 mm, referans model analizi sonucunda 1,70 mm, EPS-1 model analizi sonucunda 2,43 mm, EPS-5 analizi sonucunda 13,10 mm, PRM-1 analizi sonucunda 13,10 mm, PRM-7 analizi sonucunda ise 15,17 mm oturma değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



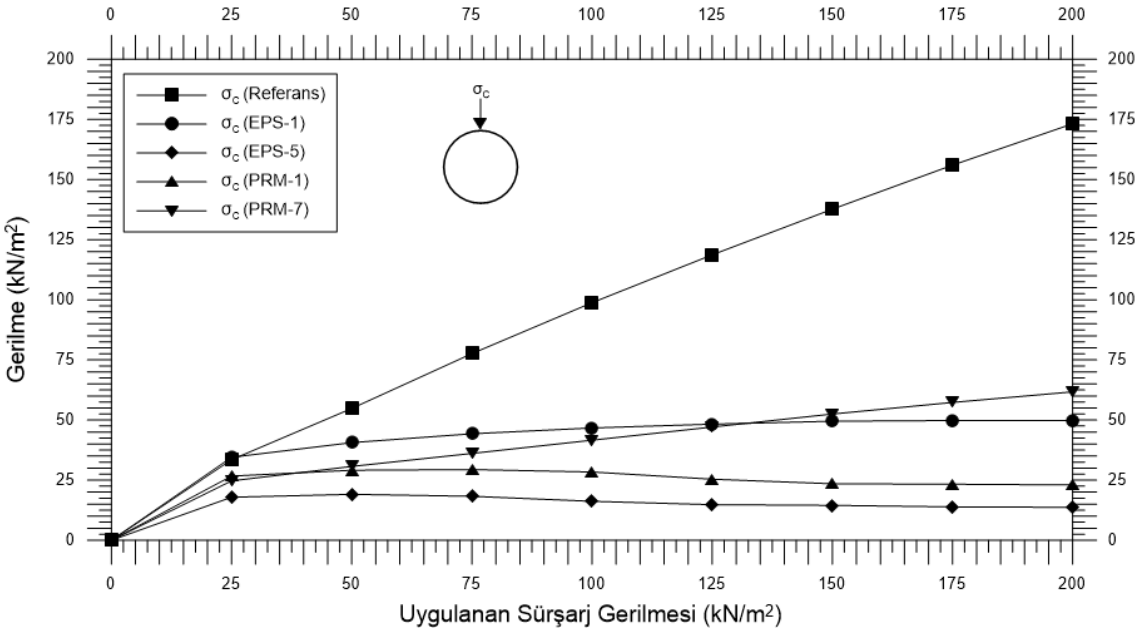
Şekil 5.2 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tabanında meydana gelen oturmaların karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda S3 noktasında meydana gelen oturmalar bakımından sistemdeki borunun etkisinin çok sınırlı kaldığı ve sisteme boru eklendiğinde S3 noktasındaki oturma miktarında 0,18 mm azalma olduğu

görülmüştür. Elde edilen bu sonuçtan hareketle oturma değerindeki 0,18 mm'lik azalmaya borunun düşey doğrultuda bir miktar esneyerek boru tabanına denk gelen S3 noktasındaki deplasmanın bir kısmını bu şekilde karşıladığı düşünülmektedir. Öte yandan esnek termoplastik boru etrafının tamamen EPS ile kaplanması durumunda sadece boru üst kısmına 5 cm kalınlığında EPS yerleştirilmesi durumuna göre % 539'a varan oturma artışı gözlenmiştir ve bu oturma değerleri laboratuvar deney sonuçlarıyla büyük ölçüde örtüşmektedir.Boru çevresini kaplayan EPS üzerine ayrıca eklenen 5 cm kalınlığındaki EPS'nin ise S3 oturmaları bakımından bir etkisi görülememiştir. Sistemde kum zemin yerine yüksek kohezyon değerine sahip geri dolgu malzemesi kullanıldığında ise oturma miktarında 2,07 mm kadar artış saptanmıştır.

3. **Boru taç seviyesinde yer alan P1 noktasında meydana gelen düşey doğrultulu gerilmeler bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında P1 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 197,20 kPa, referans model analizi sonucunda 173,20 kPa, EPS-1 model analizi sonucunda 49,80 kPa, EPS-5 analizi sonucunda 13,70 kPa, PRM-1 analizi sonucunda 23 kPa, PRM-7 analizi sonucunda ise 61,70 kPa düşey gerilme değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



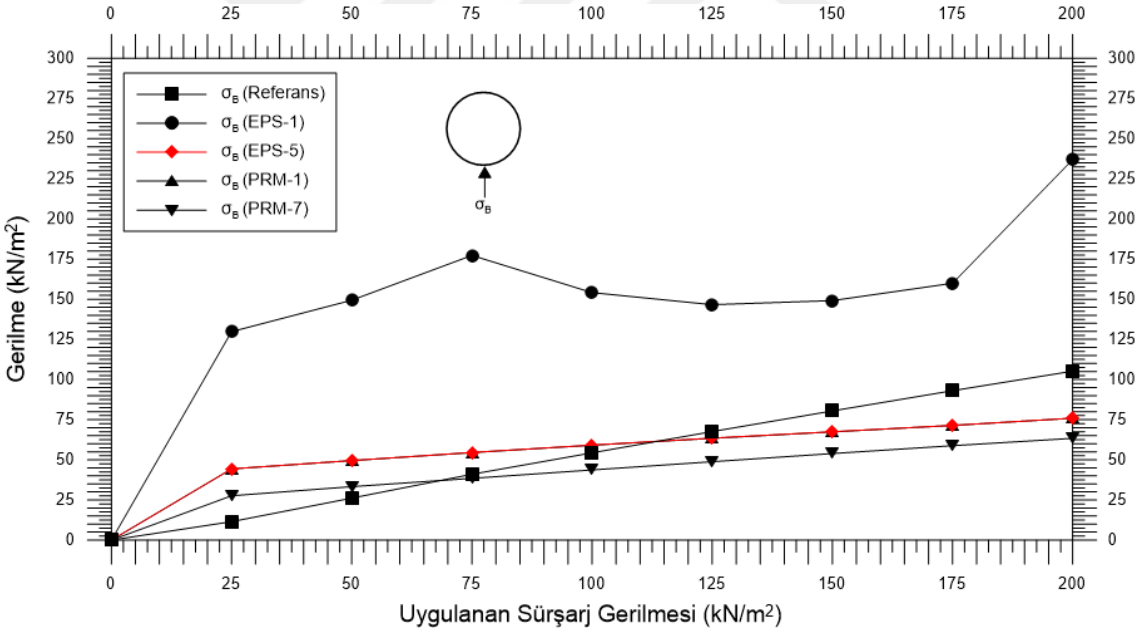
Şekil 5.3 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tacında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda boru taç noktasındaki P1 noktasında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından sisteme boru eklenmesi

durumunda -borusuz duruma kıyasla- hesaplanan gerilmelerde azalma görülmüştür. Sisteme sadece 5 cm kalınlığında EPS10 levha eklenmesi durumunda ise P1 noktasında önemli ölçüde gerilme azalışı görülürken boru etrafı tamamen EPS levhalarla kaplandığında elde edilen gerilme değeri daha da azalmıştır. Dört tarafı EPS ile kaplı sistemin üzerine eklenen 5 cm kalınlığındaki EPS levha ise bu noktada ölçülen gerilme değerinde küçük miktarda artışa neden olmuştur. Aynı sistemde geri dolgu olarak kum yerine kumlu silt malzeme tanımlandığında ise boru taç seviyesinde gerilme artışı olduğu gözlenmiştir.

4. **Boru taban seviyesinde yer alan P2 noktasında meydana gelen düşey doğrultulu gerilmeler bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında P2 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 126,20 kPa, referans model analizi sonucunda 105,20 kPa, EPS-1 model analizi sonucunda 237 kPa, EPS-5 analizi sonucunda 76 kPa, PRM-1 analizi sonucunda 75,90 kPa, PRM-7 analizi sonucunda ise 63,40 kPa düşey gerilme değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



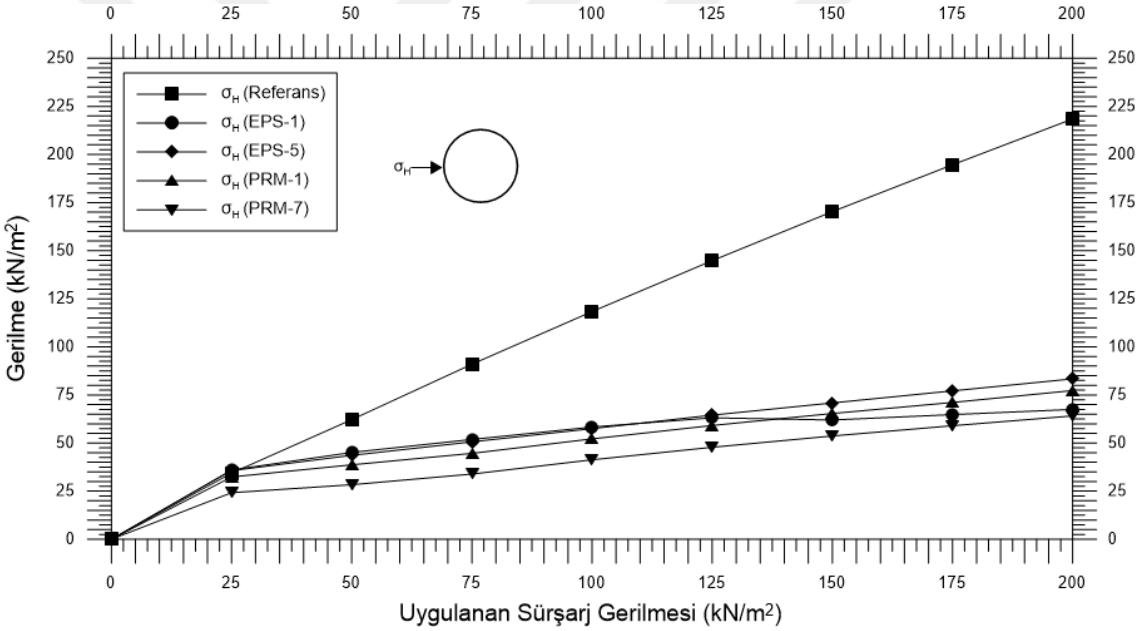
Şekil 5.4 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tabanında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda boru taban noktasındaki P2 noktasında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından sisteme boru eklenmesi durumunda -borusuz duruma kıyasla- hesaplanan gerilmelerde azalma görülmüştür. Boru etrafının EPS ile tamamen sarıldığı durumda bu azalma miktarı daha fazla olmuştur. Ancak boru üzerine 5 cm EPS eklenmesi durumuna ait sonuçlar tutarlılıktan uzak olduğundan bu sonuçlar değerlendirme

aşamasında dikkate alınmamıştır. Etrafı EPS ile çevrili sistem üzerine eklenen EPS levhanın ise boru taban noktasında oluşan gerilme üzerinde herhangi bir etkisi görülememiştir. Sistemde kum yerine kumlu silt dolgu malzemesi kullanılması durumunda boru taban seviyesindeki gerilme miktarının 13 kPa kadar azaldığı tespit edilmiştir.

5. **Boru yatay simetri çizgisi üzerinde bulunan P3 noktasında meydana gelen yatay doğrultulu gerilmeler bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında P3 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 91 kPa, referans model analizi sonucunda 218,50 kPa, EPS-1 model analizi sonucunda 67,50 kPa, EPS-5 analizi sonucunda 83,40 kPa, PRM-1 analizi sonucunda 77,30 kPa, PRM-7 analizi sonucunda ise 64,10 kPa yatay gerilme değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



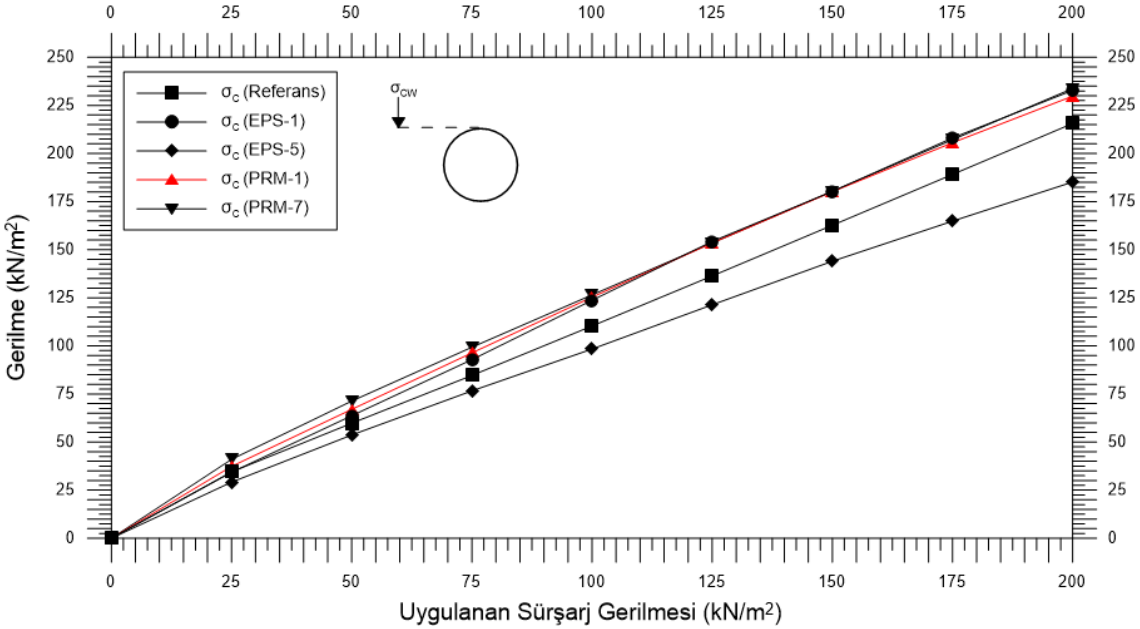
Şekil 5.5 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru yan duvarında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda boru yatay simetri çizgisi üzerindeki P3 noktasında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından sisteme boru eklenmesi durumunda -borusuz duruma kıyasla- hesaplanan gerilmelerde % 240'a varan artışlar görülmüştür. Sisteme sadece 5 cm kalınlığında EPS10 levha eklenmesi durumunda ise P3 noktasında önemli ölçüde gerilme azalışı görülürken boru etrafı tamamen EPS levhalarla kaplandığında elde edilen gerilme değerinde bir miktar artış gözlenmiştir. Dört tarafı EPS ile kaplı sistemin üzerine eklenen 5 cm kalınlığındaki EPS levha ise bu noktada ölçülen gerilme değerinde bir miktar daha azalmaya neden olmuştur. Aynı sistemde geri dolgu olarak kum yerine

kumlu silt malzeme tanımlandığında ise boru taç seviyesinde gerilme azalışı olduğu gözlenmiştir.

6. **Boru taç seviyesinde boru merkezinin 35 cm uzağında yer alan P5 noktasında meydana gelen düşey doğrultulu gerilmeler bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında P5 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 174,90 kPa, referans model analizi sonucunda 215,60 kPa, EPS-1 model analizi sonucunda 232,80 kPa, EPS-5 analizi sonucunda 185,20 kPa, PRM-1 analizi sonucunda 229,80 kPa, PRM-7 analizi sonucunda ise 233,80 kPa düşey gerilme değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

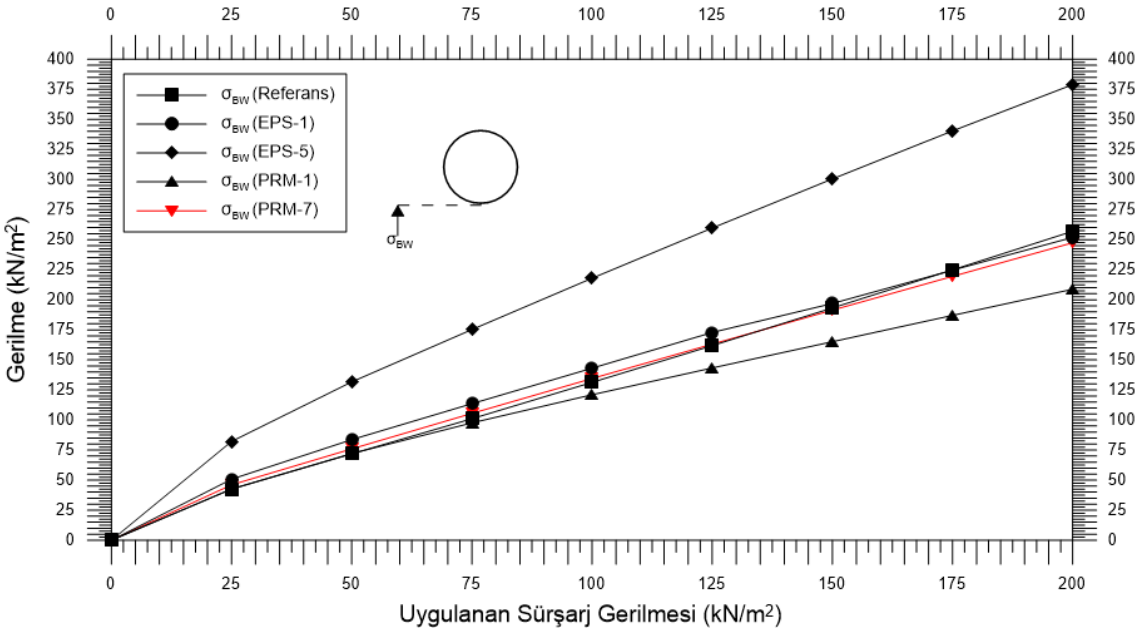


Şekil 5.6 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru taç seviyesinde boru merkezinden 35 uzakta meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda boru taç noktasının 35 cm doğusundaki P5 noktasında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından sisteme boru eklenmesi durumunda -borusuz duruma kıyasla- hesaplanan gerilmelerde artış görülmüştür. Sisteme sadece 5 cm kalınlığında EPS10 levha eklenmesi durumunda ise P5 noktasında küçük miktarda düşey gerilme artışı görülürken boru etrafı tamamen EPS levhalarla kaplandığında elde edilen gerilme değeri azalmıştır. Dört tarafı EPS ile kaplı sistemin üzerine eklenen 5 cm kalınlığındaki EPS levha ise bu noktada ölçülen gerilme değerinde artışa neden olmuştur. Aynı sistemde geri dolgu olarak kum yerine kumlu silt malzeme tanımlandığında ise P5 noktasında gerilme artışına neden olmuştur.

7. **Boru taban seviyesinde boru merkezinin 35 cm uzağında yer alan P7 noktasında meydana gelen düşey doğrultulu gerilmeler bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında P7 noktasında FLAC3D borusuz model analizi sonucunda 205,70 kPa, referans model analizi sonucunda 257 kPa, EPS-1 model analizi sonucunda 251,90 kPa, EPS-5 analizi sonucunda 379 kPa, PRM-1 analizi sonucunda 208,80 kPa, PRM-7 analizi sonucunda ise 247,40 kPa düşey gerilme değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



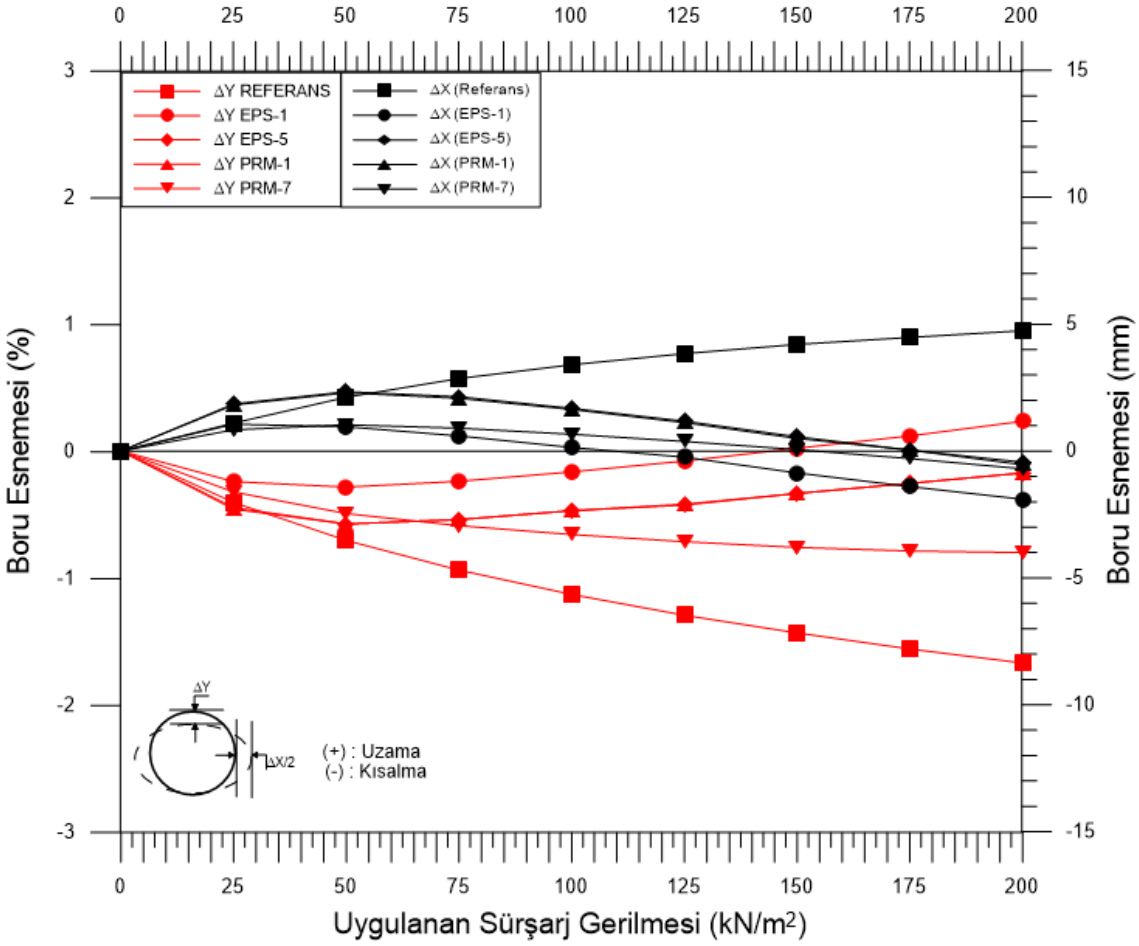
Şekil 5.7 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru taban seviyesinde boru merkezinden 35 uzakta meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Elde edilen bu veriler doğrultusunda boru taban noktasının 35 cm doğusundaki P7 noktasında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından sisteme boru eklenmesi durumunda -borusuz duruma kıyasla- hesaplanan gerilmelerde artış görülmüştür. Sisteme sadece 5 cm kalınlığında EPS10 levha eklenmesi durumunda ise P7 noktasında küçük miktarda düşey gerilme azalışı görülürken boru etrafı tamamen EPS levhalarla kaplandığında elde edilen gerilme değeri artmıştır. Dört tarafı EPS ile kaplı sistemin üzerine eklenen 5 cm kalınlığındaki EPS levha ise bu noktada ölçülen gerilme değerinde azalmaya neden olmuştur. Aynı sistemde geri dolgu olarak kum yerine kumlu silt malzeme tanımlandığında ise P7 noktasında gerilme azalışına neden olmuştur. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil gg gösterilmiştir.

8. **Boruda meydana gelen düşey ve yatay doğrultulu esnemeler bakımından:**

   200 kPa sürşarj yükü altında düşey ve yatay doğrultulardaki boru esneme değerlerine bakıldığında (Şekil) FLAC3D referans model analizi sonucunda

yatay doğrultuda % 1,58'lik düşey doğrultuda % 2,78'lik esneme miktarı sözkonusu iken, bu değerler boru üzerine 5 cm kalınlığında EPS10 levha eklenmesi durumunda sırasıyla % 1,90 ve % 1,17; boru etrafının EPS ile tamamen sarılması durumunda % 0,44 ve % 0,86; etrafı tamamen çevrili sistem üzerine 5 cm kalınlıkta EPS levha eklenmesi durumunda % 0,54 ve % 0,86 ; etrafı tamamen EPS ile çevrili sistemde kum yerine kumlu silt dolgu malzemesi kullanılması durumunda ise % 0,70 ve % 4,00 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler grafik üzerinde Şekil 5.8'da gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda boru tabanında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda ise nihai olarak gömülü bir boru sistemine uygulacak EPS levhaların geometriden bağımsız olarak zemin ortamındaki farklı oturmaları artırarak pozitif zemin kemerlenmesini artırarak boru üzerindeki geostatik yükleri azalttığı; ancak etrafı tamamen EPS ile çevrili boru sistemi üzerine ayrıca eklenecek EPS levhanın pozitif zemin kemerlenmesi üzerine çok ciddi bir etkisi olmayacağının yanısıra gömülü bir boru sisteminin tamamen EPS levha ile çevrelenmesi durumunda boru sistemi üzerindeki geostatik yüklerin maksimum düzeyde azaldığı görülmüştür. Ayrıca yataklama katmanı ve geri dolgu malzemesi olarak granüler malzeme yerine düşük plasitisiteli yüksek kohezyonlu zemin malzemesinin uygulanabilir olmadığı, pozitif zemin kemerlenmesi artırıcı etkide bulunmak bir yana negatif kemerlenmeye neden olarak hem boru üzerindeki geostatik yükü artıracağı hem de boruda daha fazla esnemeye bağlı olarak gelişmesi muhtemel deformasyonları hızlandıracağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] E. Akınay, *Sıkışabilir Yatak Malzemesi Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi,* Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Hazırlanan Doktora Tezi, 2017.

[2] M. Bildirici, "Klasik çağda su iletiminde basınçlı ve basınçsız borular,"

[3] F. Akyelken, *Genleştirilmiş Polistiren Malzeme Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışına Etkilerinin Sayısal Analizler ile İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Hazırlanan Yüksek Lisans Tezi, 2020.

[4] M. Meguid, M. Ahmed, M. Hussein, Z. Omeman, "Earth pressure distribution on a rigid box covered with u-shaped geofoam wrap," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 3, no. 2, p. 11, 2017.

[5] Y. Beju, J. Mandal, "Expanded polystyrene (eps) geofoam: Preliminary characteristic evaluation," *Procedia engineering*, vol. 189, pp. 239–246, 2017.

[6] S. F. Bartlett, B. N. Lingwall, J. Vaslestad, "Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using eps geofoam," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 43, no. 5, pp. 450–461, 2015.

[7] F. Giuliani, F. Autelitano, E. Garilli, A. Montepara, "Expanded polystyrene (eps) in road construction: Twenty years of ıtalian experiences," *Transportation Research Procedia*, vol. 45, pp. 410–417, 2020.

[8] A. H. Padade, J. Mandal, "Behavior of expanded polystyrene (eps) geofoam under triaxial loading conditions," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 17, pp. 2542–2553, 2012.

[9] M. Meguid, M. o. G. Hussein, "A numerical procedure for the assessment of contact pressures on buried structures overlain by eps geofoam inclusion," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 1–14, 2017.

[10] J. Vaslestad, T. H. Johansen, W. Holm, "Load reduction on rigid culverts beneath high fills: Long-term behavior," *Transportation Research Record*, pp. 58–58, 1993.

[11] L. Sun, T. Hopkins, T. Beckham, "Load reduction by geofoam for culvert extension: Numerical analysis," in *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, 2006, pp. 1–5.

[12] S. Li, Y. Yao, I.-H. Ho, L. Ma, Q. Wang, C. Wang, "Coupled effect of expanded polystyrene and geogrid on load reduction for high-filled cut-and-cover tunnels using the discrete-element method," *International Journal of Geomechanics*, vol. 20, no. 6, p. 04 020 052, 2020.

[13] M. A. Meguid, M. I. Khan, “On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems,” *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 10, no. 1, p. 6, 2019.

[14] M. I. Khan, M. A. Meguid, “Experimental investigation of the shear behavior of eps geofoam,” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 4, no. 2, p. 12, 2018.

[15] H. Ichino, M. Beppu, E. B. Williamson, N. Haraguchi, “Performance and evaluation of an eps plate to mitigate blast on underground protective structures,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 148, p. 103 758,

[16] A. Witthoeft, H. Kim, “Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using eps geofoam compressible inclusions,” *Geosynthetics International*, vol. 23, no. 4, pp. 287–300, 2016.

[17] O. Khalaj, M. Azizian, S. M. Tafreshi, B. Mašek, “Laboratory investigation of buried pipes using geogrid and eps geofoam block,” in *IOP conference series: earth and environmental science*, IOP Publishing, vol. 95, 2017, p. 022 002.

[18] H. Kim, B. Choi, J. Kim, “Reduction of earth pressure on buried pipes by eps geofoam inclusions,” *Geotechnical Testing Journal*, vol. 33, no. 4, pp. 304–313, 2010.

[19] O. Khalaj, M. Azizian, N. Joz Darabi, S. N. Moghaddas Tafreshi, H. Jirková, “The role of expanded polystyrene and geocell in enhancing the behavior of buried hdpe pipes under trench loading using numerical analyses,” *Geosciences*, vol. 10, no. 7, p. 251, 2020.

[20] B. Soylemez, “Effect of geofoam location and density on the improvement of buried flexible pipe,”

[21] S. M. Tafreshi, N. J. Darabi, A. Dawson, “Combining eps geofoam with geocell to reduce buried pipe loads and trench surface rutting,” *Geotextiles and Geomembranes*, 2020.

[22] H. Kılıç, E. Akınay, “Effects of using eps geofoam as compressible inclusion on hdpe pipe behavior,” *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 10, no. 2, p. 04 019 006, 2019.

[23] J. Kang, “Finite element analysis for deeply buried concrete pipes in proposed imperfect trench installations with expanded polystyrene (eps) foams,” *Engineering Structures*, vol. 189, pp. 286–295, 2019.

[24] M. A. Meguid, M. R. Ahmed, “Earth pressure distribution on buried pipes ınstalled with geofoam ınclusion and subjected to cyclic loading,” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2020.

[25] I. Itasca Consulting Group, *FLAC3D 6.0 Modeling*. Itasca Consulting Group, Inc, 2017.

[26] ——, *FLAC3D 6.0 Help*. Itasca Consulting Group, Inc, 2020.

[27] E. Akınay, H. Kılıç, “Investigating parameters affecting buried flexible pipe behavior,”

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Proje

1. TÜBİTAK Projesi : Genleştirilmiş Polistiren Malzeme Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışına Etkilerinin Sayısal Analizler ile İncelenmesi, Doç. Dr. Havvanur KILIÇ, 219M061, 01.04.2020-01.04.2021, Bursiyer Yüksek Lisans Öğrencisi.