

TERMOPLASTİK BORU DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ

İ.F. Bektaş¹, M.E.Selçuk², H. Kılıç³

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen boru–zemin etkileşiminin incelenmesi amacı ile gerçekleştirilmiş olan iki adet gerçek ölçekli laboratuvar deneyinin sonlu farklar yöntemiyle analiz yapan FLAC3D (2017) ile sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan rijitlik parametreleri laboratuvar model deney tankı içine boru yerleştirilmeden yapılmış olan borusuz deneyden alınan oturma ölçümlerinden yararlanılarak geri analizle belirlenmiştir. Analizlerde geri dolgu kum zeminin ve borunun bünye davranışı sırasıyla Plastic-Hardening ve Elastik (isotropic) model olarak dikkate alınmıştır. Deneylerde ölçülen oturma, gerilme ve boru esnemeleri sayısal analizlerden hesaplanan değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Keywords: HDPE boru, FLAC3D, sayısal analiz, boru-zemin etkileşimi

1. GİRİŞ

Gömülü boru hatlarının mühendislik tasarımı sürecinde yaklaşık 70-80 yıl öncesine kadar betonarme 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 yükü tek basına tasırken, esnek borularda boru ile zeminin birlikte bir bütün gibi davranmasıdır.

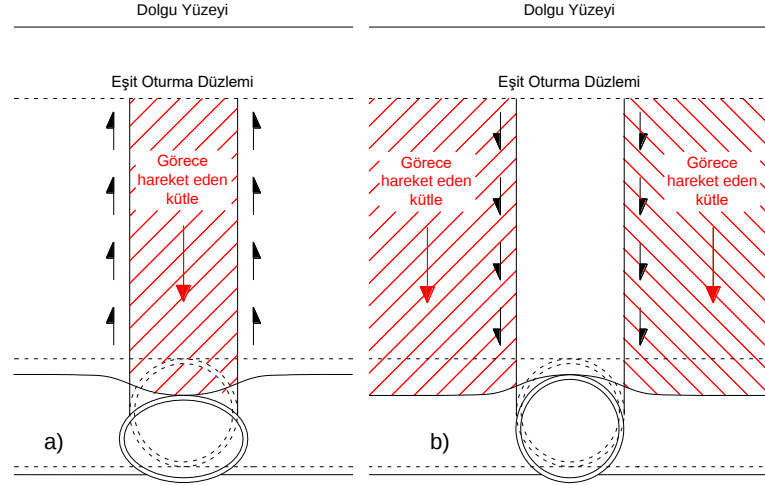
Borular şekil değiştirme kapasitelerine göre ikiye ayrılmaktadır; yapısal hasar oluşmaksızın %2'den daha fazla şekil değiştirebilen (esneyebilen) esnek borular (Şekil 1a) ve bu koşulu sağlamayan borular ise rijit borular olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1b) (Moser, 2008). Terzaghi (1943) kemerlenme olgusu göz önünde bulundurulduğunda gömülü esnek bir borunun üzerinde pozitif kemerlenme mekanizmasının gelişeceği anlaşılar (Şekil 1a). Kemerlenmenin derecesi ise görece hareketin büyüklüğüne ve buna bağlı olarak zemin prizmaları ara yüzeylerinde kayma dayanımının mobilizasyon derecesine bağlıdır. Eğer

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, YTÜ, İstanbul, Türkiye, i.furkanbektas@gmail.com

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, YTÜ, İstanbul, Türkiye, meselcuk@yildiz.edu.tr

³ İnşaat Mühendisliği Bölümü, YTÜ, İstanbul, Türkiye, kilichavvanur@gmail.com

görece hareket ara yüzeylerde kayma dayanımının tamamı ile mobilize olmasını sağlayacak büyüklükte ise pozitif kemerlenme en büyük yararı sağlar; diğer bir ifadeyle bu durumda boru tacı üzerine etkiyen zemin gerilmesi en küçük değeri alır. Bununla birlikte, görece hareketin miktarı boru tacından yukarı doğru giderek azalır ve eğer boru yeteri kadar derine gömülmüş ise dolgu zemini içerisinde bir eşit oturma düzleminin varlığından söz edilir. Bu düzlemdeki bütün oturmalar eşittir ve –dolayısı ile– bu düzlemin üzerinde kemerlenmenin etkisi görülmez.



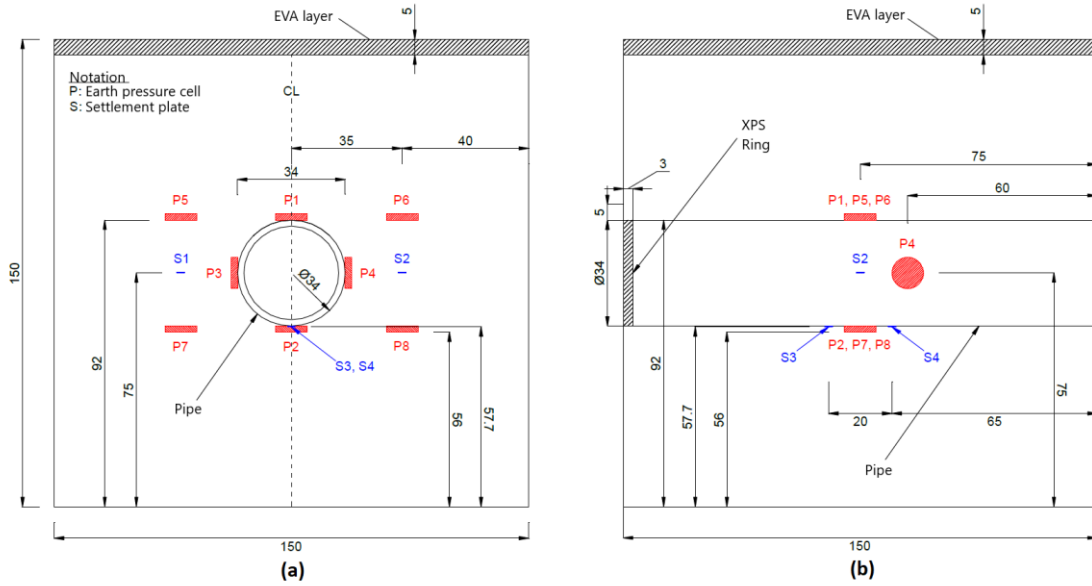
Şekil 1. Gömülü borularda kemerlenme olgusu (a) Pozitif kemerlenme (Esnek boru) (b) Negatif kemerlenme (Rijit boru).

Gömülü boru davranışı bir zemin-yapı etkileşimi olgusu olup, bu olguyu incelemek için günümüze kadar sayısal analizlerin, enstrumante edilmiş laboratuvar ve arazi deneylerinin içinde yer aldığı birçok çalışma yapılmış ve günümüzde de bu çalışmalar hala devam etmektedir. Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından (Jeyapalan et al. (1987); Rogers (1988); Zanzinger and Gartung (1995), (1998); Roger et al. (1996); Brachman et al. (1996); Moser (1998); McGrath (1998); Brachman et al. (2001); Masada et al. (2002); Dhar et al. (2004); Watkins (2004); Dhar and Moore (2006); Sargand and Masada (2007); Brachman et al. (2008); Munro et al. (2009); Alzabeebee et al. (2011); Guigan and Valsangkar (2011); Corey et al. (2014); Khatri et al. (2015) Brayden et al (2015); Wang et al. (2016); Kilic and Akinay (2017); Akinay and Kilic (2019); Zhou et al. (2017), (2019), (2020)) esnek bir borunun, üzerine aktarılan düşey gerilmeler nedeniyle borunun esnemesi sonucu, üzerindeki düşey gerilmelerin bir kısmını meydana gelen pozitif kemerlenme ile içerisinde bulunduğu zemin ortamına aktardığını ortaya koymuştur.

Akinay (2017) tarafından YTÜ - Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN Geoteknik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen ve bu çalışmada dikkate alınan gerçek ölçekli laboratuvar deneyleri 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m boyutlarında üç duvarı 10 mm kalınlığında çelik ve bir duvarı 30 mm kalınlığında saydam pleksiglas olan bir çelik tank ve toplam 50 ton kapasiteli bir yükleme sisteminde yapılmıştır. Deneylerde sürşarj gerilmesi yükleme plakası ile zemin üst yüzeyine 25 kPa'lık düşey gerilme artışları halinde kademeli olarak uygulanarak 200 kN/m² değerine kadar yüklenmiştir. Oluşturulan deney sisteminde, uygulanan düşey gerilmelerin etkisi ile kum zeminde meydana gelen oturma, gerilme değerleri ile boruda meydana gelen esneme miktarlarının hassas bir şekilde elde edilebilmesi amacıyla deneylerde kapsamlı bir enstrümantasyon uygulanmıştır (Şekil 2). Boru tacına ve boru tabanına etkiyen düşey zemin gerilmelerini ve boru yan duvarlarına etkiyen yanal zemin gerilmelerini ölçmek amacı ile bu konumlara yük hücresi tipi toprak basıncı hücreleri yerleştirilmiştir. Bu basınç hücrelerinden P1 hücresi boru taç konumuna, P2 hücresi boru taban konumuna, P3 ve P4 hücreleri ise

boru yan duvarı konumlarına yerleştirilmiştir. P1, P2, P3 ve P4 toprak basıncı hücrelerinin ölçtüğü değerler sırası ile σ_C , σ_B , σ_{HW} ve σ_{HE} imgeleri ile gösterilmiştir. Ayrıca boru yan duvarlarının her iki tarafında 18 cm açıkta kum zemin içerisinde boru taç seviyesinde P5 ve P6 toprak basınç hücreleri ile boru taban seviyesinde yerleştirilmiş P7 ve P8 hücreleri yerleştirilmiştir. P5 ve P6 toprak basınç hücreleri sırasıyla σ_{CW} , σ_{CE} imgeleri ile; P7 ve P8 hücreleri ise sırasıyla σ_{BW} ve σ_{BE} imgeleriyle gösterilmiştir. Deney sistemine yerleştirilen toprak basınç hücrelerinden P1, P2, P5, P6, P7 ve P8 hücreleri bulundukları konumlarda uygulanan gerilme etkisiyle meydana gelen düşey doğrultulu gerilmeleri ölçerken; P3 ve P4 toprak basınç hücreleri yanal zemin gerilmelerini ölçmektedir.

Akınay (2017) tarafından oluşturulan gerçek ölçekli deney sisteminde toprak basınç hücrelerinin yanısıra boru yanlarında ve boru tabanında zemin oturmalarını ölçmek için bu konumlara oturma plakaları yerleştirilmiştir. S1 ve S2 plakaları boru yan duvarı düzeyinde yan duvarlardan 18 cm açıkta yer almaktadır. S3 ve S4 oturma plakaları ise boru taban düzeyinde yer almakta olup, aralarında boru eksenin doğrultusunda 20 cm açıklık bulunmaktadır. Oturma plakalarının ölçtüğü değerler sırası ile δ_W , δ_E , δ_{B1} ve δ_{B2} imgeleri ile gösterilmiştir. Ayrıca borunun düşeyde ve yatayda esnemesini (deflection) ölçmek için boru içerisine -borunun orta uzunluktaki enkesitine- iki adet potansiyometrik yer değiştirme transdüsörü yerleştirilmiştir. D1 transdüsörü borunun düşey esnemesini ve D2 transdüsörü ise borunun yatay esnemesini ölçmüştür. D1 ve D2 transdüsörlerinin ölçtüğü değerler sırası ile Δy ve Δx imgeleri ile gösterilmiştir. Borusuz ve Referans deneylerinde toprak basıncı hücreleri ve oturma plakaları zemin içerisinde aynı konumlara yerleştirilmiştir. Deney düzeneği ve aletsel ölçümler ile ilgili daha fazla ayrıntı Akınay vd. (2013), Kılıç ve Akınay (2014) ve Akınay vd. (2016), Akınay (2017) ve Kılıç ve Akınay (2019)'da sunulmuştur.



It is in schematic scale and the dimensions given are nominal measurements. All measurements are in cm.

Şekil 2. Deney tankı içerisinde ölçüm aletlerinin konumları a) boru en kesitinde b) boru boyunca (Akınay, 2017)

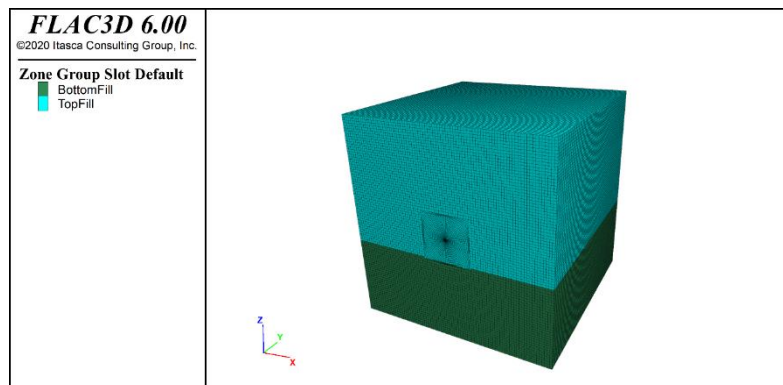
Akınay (2017) tarafından gerçekleştirilen gerçek ölçekli laboratuvar deneylerinden bir kısmının FLAC3D (2017) yazılımıyla modellenerek sayısal analizlerinin gerçekleştirildiği bu çalışma kapsamında ise, borusuz deneyin sayısal analizinde tank içinde sadece kum geri dolgu malzemesinin bulunması durumunda düşey yükler altında kum malzemenin yük altındaki davranışı dikkate alınarak kum geri dolgu zemine ait malzeme parametrelerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, deney ölçümleri ile uyumlu değerlerin elde edilebilmesi amacıyla farklı parametrik kombinasyonlarla analizler tekrar edilmiştir. Deney

sonuçları ile uyumlu hesap değerleri elde edildikten sonra belirlenen parametreler dikkate alınarak ve modele boru eklenerek referans deneyin sayısal analizi yapılmıştır. Oluşturulan sayısal modellerde, rijit deney tankı modellenmemiş, bunun yerine bir FLAC3D komutu olan “zone face-apply velocity normal 0” komutu ile sayısal modelin tank yüzeyine temas eden dış yüzeylerinde normal doğrultudaki ötelenmeler sınırlandırılmış ve kayma doğrultusundaki ötelenmeler serbest bırakılmıştır. Dolayısıyla analizlerde model deney tank duvarları ile kum zemin arayüzey etkileşiminin dikkate alınması gerekmemiş, boru ile zemin arayüzey etkileşimi ise arayüzey sürtünme açısı ve arayüzey rijitlik katsayıları tanımlanarak gözönünde bulundurulmuştur.

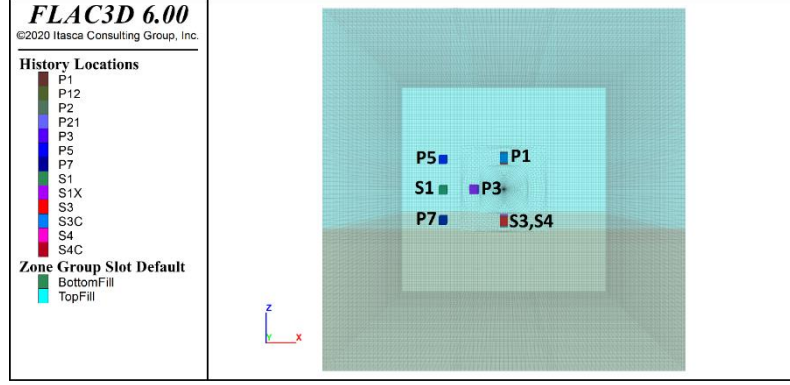
2. BORUSUZ DENEY ANALİZLERİ

Deneylerde kum malzemenin boru tabanından $z = 0.60$ m yüksekliğe kadar daha sıkı yerleştirildiği kabul edildiğinden (Akinay, 2017) bu kısım “alt kum” olarak, bu yüksekliğin üzerindeki kısım ise “üst kum” olarak ayrılmıştır (Şekil 3). Borusuz deneyde boru yer almadığından (Şekil 3) borunun temsil ettiği hacim, gerçek ölçekli deneyde olduğu gibi kum malzeme olarak tanımlanmış, bununla birlikte kesitlerde gösterilen S1, S3 ve S4 oturma plakaları ile P1, P3, P5 ve P7 gerilme ölçerlerine karşılık gelen ölçüm noktaları model geometrisinde belirtilen konumlarına yerleştirilmiştir. FLAC3D programında borusuz deney için oluşturulan analiz geometrisi Şekil 3’te gösterilmiştir.

Analizlerde kum malzeme davranışı “Plastic-Hardening (PH) Model” dikkate alınarak modellenmiştir. Bu modelde referans çevre basıncı $p=100$ kN/m² olarak girilmiştir. Borusuz deney için FLAC3D ile yapılan sayısal analizlerde deneme-yanılma yöntemi ile S1 ve S3 zemin oturmalarının deneyde ölçülen değerlere en yakın olarak modellenmesini sağlayan referans ortalama sekant modülleri belirlenmiştir. Referans tanjant ödometre modülü (E_{oed}^{ref}) ve referans yük boşaltma-geri yükleme modülü (E_{ur}^{ref}) FLAC3D bünyesinde yer alan Plastic-Hardening Model’in varsaydığı biçimde sırası ile $E_{oed}^{ref} = E_{ur}^{ref}$ ve $E_{ur}^{ref} = 4 \times E_{50}^{ref}$ olarak alınmıştır. Gerilmeye bağlılığı sağlayan üstel kuvvet, (m) her iki zemin bölgesi için $m = 0.999$ olarak alınmıştır. Genleşme açıları yine PH modelin varsaydığı biçimde $\psi = \phi - 30$ olarak alınmıştır. PH modele ait kalibrasyonu tamamlanan malzeme parametreleri Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 3. FLAC3D yazılımında oluşturulan borusuz deney geometrik modeli

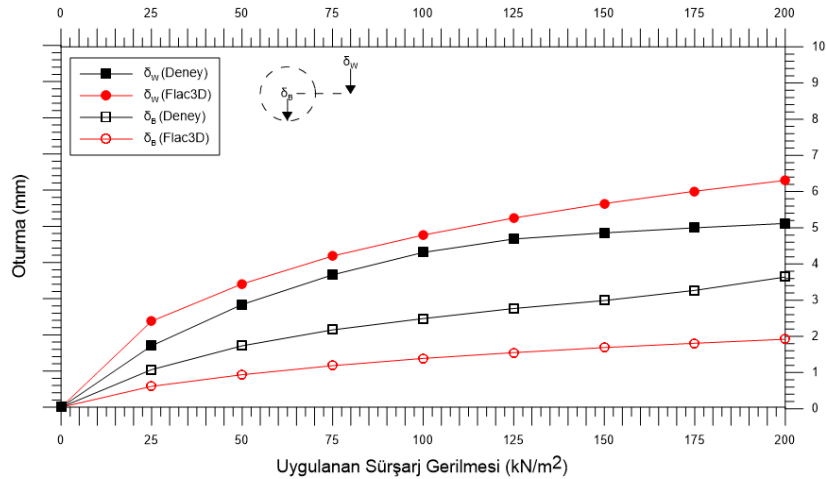


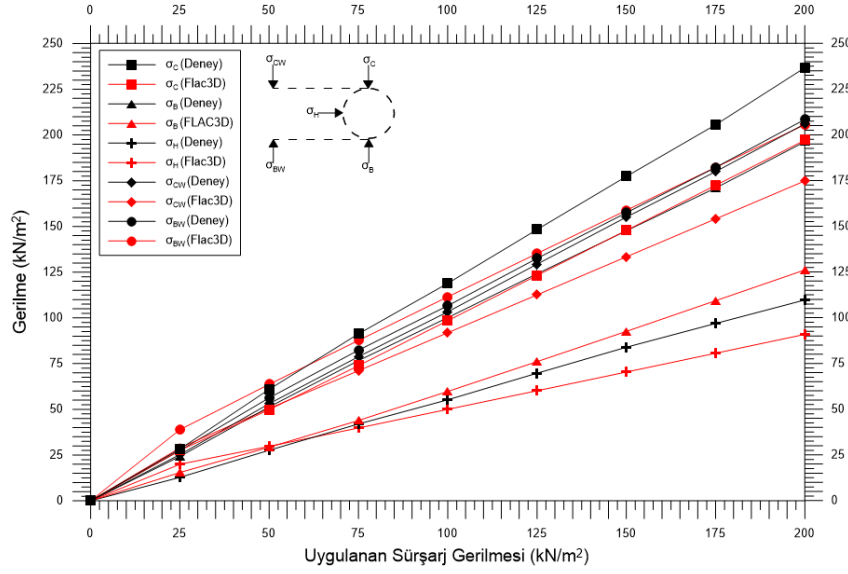
Şekil 4. FLAC3D programında tanımlanan ölçüm noktalarının 3 boyutlu yerleşimi

Table 1. Kum zemine ait PH model malzeme parametreleri

Model Parametresi	Üst Kum	Alt Kum
γ_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
ϕ (°)	30	35
ψ (°)	0.0	5.0
c (kN/m ²)	0.1	0.1
failure-ratio	0.9	0.9

Borusuz deney sayısal analizlerinde, boru taban düzeyinde 20 cm aralıklarla yerleştirilen S3 ve S4 oturma noktalarından elde edilen değerler aynı olduğundan, borusuz analiz sonuçlarında yalnızca S3 (δ_B) oturma değerleri paylaşılacaktır. Şekil 4'te gösterilen noktalardan alınan S1 (δ_W) ve S3 (δ_B) oturma eğrileri Şekil 5'te; P1 (σ_C), P2 (σ_B), P3 (σ_H), P5 (σ_{CW}) ve P7 (σ_{BW}) eğrileri ise Şekil 6'da sunulmuştur.

Şekil 5. S1 (δ_W) ve S3 (δ_B) noktalarında hesaplanan oturma değerlerinin karşılaştırması



Şekil 6. P1 (σ_c), P2 (σ_B), P3 (σ_H), P5 (σ_{CW}) ve P7 (σ_{BW}) noktalarında hesaplanan gerilme değerlerinin karşılaştırması

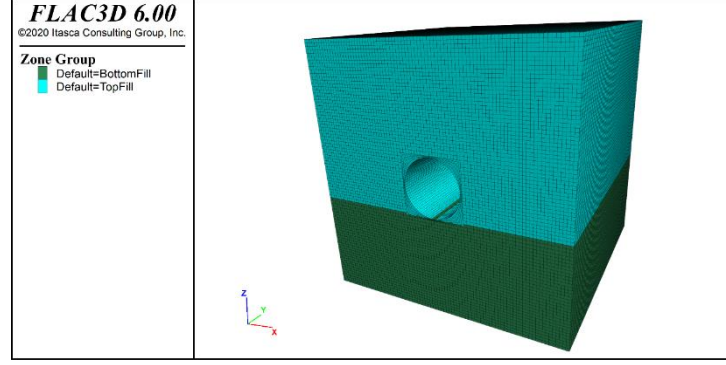
S1 ve S3 noktalarında elde edilen oturma değerleri ile gerçek ölçekli laboratuvar deneyinde elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde boru yan duvarından 18 cm açıkta bulunan S1 noktası için sayısal analizlerde hesaplanan değerlerin laboratuvar ölçüm sonuçlarıyla büyük ölçekte uyumlu olduğu görülmüştür. Boru tabanında yer alan S3 noktasında hesaplanan oturma miktarlarının ise deneyde elde edilen oturma miktarlarından daha düşük değerler verdiği görülmüştür.

Borusuz analizler sonucunda elde edilen gerilme değerleri gerçek ölçekli deney ölçümleri birlikte değerlendirildiğinde, sayısal analiz sonuçlarının boru taç noktasında (P1), boru tabanında (P2) ve taç seviyesinin 18 cm açığındaki (P5) düşey gerilmelerinden daha küçük, boru simetri çizgisi üzerindeki (P3) yanal gerilmelerde ve taban seviyesinin 18 cm açığındaki (P7) düşey gerilmelerde ise yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

3. REFERANS DENEY ANALİZLERİ

Şekil 2’de gösterilen Referans deney kesiti sayısal olarak modellenmiş ve kademeli olarak artan sürşarj yükleri altında HDPE borunun esnemesi ve boru üzerine etkiyen gerilmeler hesaplanarak laboratuvar da yapılan gerçek ölçekli deney ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizde öncelikle deney sistemini oluşturan, HDPE boru ve geri dolgu malzemesi olarak kullanılan kum malzemenin geometrik modeli oluşturulmuştur. Çelik tank yerine ise “zone face apply velocity-normal 0” komutu kullanılarak sınır koşullar tanımlanmıştır. Deneyde olduğu gibi kum malzemenin tabandan $z = 0.60$ m yüksekliğe kadar olan kısmı “alt kum” bu yüksekliğin üzerindeki kısmı ise üst kum olarak ayrılmış ve HDPE boru bu iki katman arasında yer almıştır (Şekil 7). Termoplastik korige boru elastik (izotropik) malzeme modeli ile tanımlanmıştır. FLAC3D yazılımında boru için sayısal model üretilirken yazılım bünyesindeki yapısal elemanlar (structural elements) arasından astar (liner) eleman kullanılmıştır. Diğer yapısal elemanlar arasından liner elemanın tercih edilmesindeki neden, liner yapısal elemanın arayüzey etkileşimine izin vermesidir. Liner yapısal elemanı sayısal

model içerisinde temas ettiği diğer yüzeylerle düğüm noktaları aracılığıyla normal doğrultudaki basınç ve çekme kuvvetlerini taşıyabilen bağlantılar kurabilirken aynı zamanda ara yüzeylerde kayma etkileşimine de izin vermektedir. Bu amaçla sayısal modelde boru elemanına ait parametreler tanımlanırken, kum-boru arayüzeyi için de arayüzey rijitlik parametreleri olan $K_n=K_s=6$ GPa değerleri ve arayüzey kayma açısı $\phi=20.1^\circ$ olarak tanımlanmıştır.

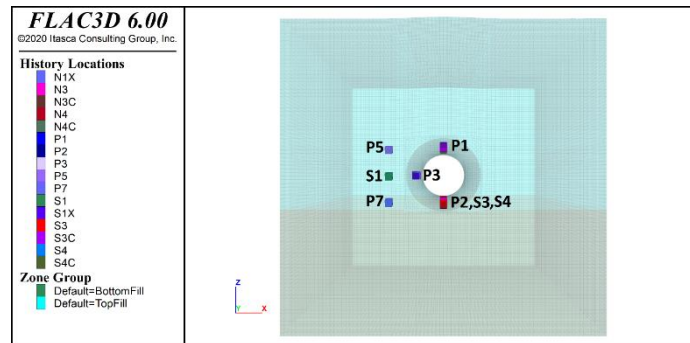


Şekil 7 Referans deneyde yer alan alt kum, üst kum tabakaları ve boru yerleşimi

Laboratuvarda yapılan gerçek ölçekli borusuz ve referans deneylerinde, 0 - 200 kPa arasında 25 kPa adımlarla artırılan sürşarj yükü altında boru tabanında (S3) ve boru yatay simetri çizgisi üzerindeki (S1) zemin oturmaları, yatay ve düşey doğrultulardaki boru esnemeleri (Δx , Δz) ve Şekil 2’de konumları gösterilen P1, P2, P5, P7 noktalarındaki düşey gerilmeler ve P3 noktasındaki yanal gerilme değerleri ölçülmüştür.

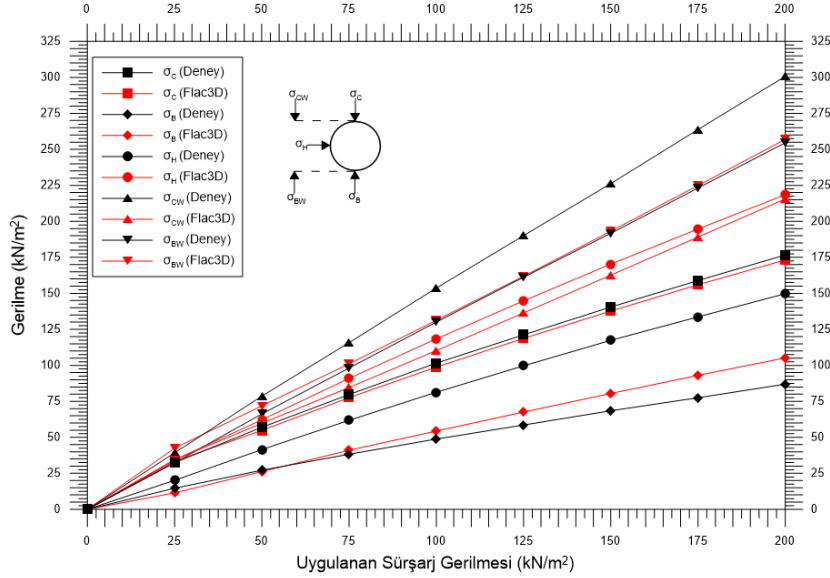
Referans deneyde S1 ve S3 oturma plakaları ile P1, P2, P3, P5 ve P7 gerilme ölçerlerine karşılık gelen ölçüm noktaları sayısal modelde belirtilen koordinat noktalarına yerleştirilmiştir. Ölçüm noktalarının konumları üç boyutlu geometrik model üzerinde gösterimi Şekil 8’de sunulmuştur.

Sayısal analizlerde yapılan yüklemeler sonucunda elde edilen S1 ve S3 oturma değerleri ile borusuz analizlerde elde edilen oturma değerleri (Şekil 5) aynı sonuçları vermiştir. Referans analizler sonucunda elde edilen P1, P2, P3, P5, P7 gerilmeleri Şekil 9’da ve yatay (Δx) ve düşey doğrultulardaki boru esnemeleri (Δy) Şekil 10’da sunulmuştur.



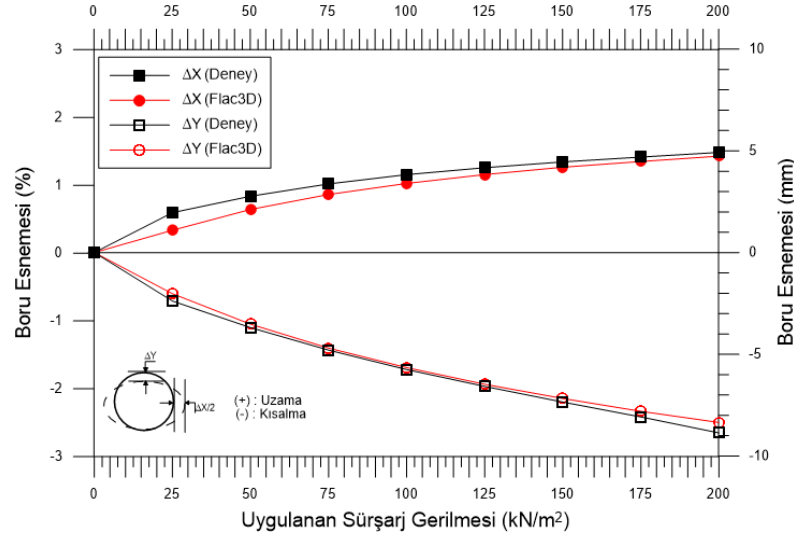
Şekil 8. Üç boyutlu FLAC3D modeli üzerindeki oturma ve gerilme noktaları

FLAC3D (2017) ile gerçekleştirilen referans model analizleri sonucunda elde edilen gerilme grafiklerine bakıldığında boru tacında (P1) model deney sonuçlarına oldukça yakın, boru taç seviyesinin 18 cm açığında (P5) düşey gerilme miktarlarının ise deney sonuçlarından %25 daha küçük olduğu görülmüştür. Boru tabanındaki (P2) düşey gerilmeleri ile boru yan yüzeyindeki (P3) yanal gerilme sonuçlarının ise model deney sonuçlarından sırasıyla %20 ve %33 oranında daha büyük olduğu görülmüştür. Boru taban seviyesinin 18 cm açığındaki P7 noktasında ise sayısal analiz sonuçları deney sonuçlarıyla aynı sonuçları vermiş grafik üzerindeki bu iki eğri birbirinin üzerine binmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. P1, P2, P3, P5 ve P7 noktalarında elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırması

Borusuz analiz ile referans analiz sonuçları 200 kPa yük altında elde edilen gerilme değerleri bakımından karşılaştırmalı olarak ele alındığında ise; sisteme boru eklenmesi dolayısıyla boru taç seviyesindeki P1 noktasında hesaplanan düşey gerilme değerinde yaklaşık % 10'luk azalma, boru tabanındaki P2 noktasında yaklaşık %25'lik artış, boru yan duvarında bulunan P3 noktasındaki yanal gerilme değerinde % 144'lük büyük bir artış, boru taç seviyesinin 18 cm açığındaki P5 noktası ile boru taban seviyesinin 18 cm açığındaki P7 noktalarında yaklaşık %23'lük gerilme artışları görülmüştür. FLAC3D (2017) yazılımı ile sayısal modeller üzerinden elde edilen bu gerilme değerlerinden en dikkat çekici olanı ise boru yan yüzeyindeki yanal toprak basıncını ölçen P3 gerilme ölçerine karşılık gelen noktadan alınan gerilme değerleri olmuştur. Borusuz analizde bu noktada elde edilen gerilme değerine karşılık referans analizde elde edilen gerilme değerindeki % 144'lük artış, Şekil 10'da gösterilen boru esneme değerleri ve boru taç seviyesinde konumlandırılan P1 noktasındaki gerilme değerleri arasındaki %10'luk azalma ile birlikte değerlendirildiğinde, sisteme boru eklendiği takdirde düşey gerilmeler etkisi ile boruda hem düşey hem de yatay doğrultularda esnemelerin meydana geldiğini ve dolayısıyla boru üzerinde bulunan dolgu zeminde pozitif zemin kemerlenmesi durumunun meydana geldiğini göstermiştir.



Şekil 10. Düşey gerilmeler altında boruda meydana gelen esneme değerlerinin karşılaştırması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek dolgu gerilmeleri altında kalan HDPE koruge boruların davranışını incelemek amacıyla laboratuvarında yapılan gerçek ölçekli iki adet deneyin sayısal analizi FLAC3D (2017) ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, borusuz deney analizinde kum geri dolgu malzemesine ait Plastic-Hardening malzeme parametrelerinin kalibrasyonu yapılmış, Referans deney modelinde kum-boru ara yüzüne ait parametrik kalibrasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Termoplastik koruge boru FLAC3D yazılımındaki elastic (izotropik) model ile tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen davranış eğrileri gerçek ölçekli deney ölçümleri ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Sayısal modeli oluşturularak 0 kPa'dan 200 kPa'a kadar 25 kPa aralıklarla artırılan düşey gerilmelere maruz kalan borusuz model ve Referans model analizlerinden elde edilen sonuçlardan özellikle boru tacındaki düşey gerilmeler arasındaki fark, boru yan yüzeyindeki yanal gerilmeler arasındaki fark ve her iki doğrultudaki boru esneme sonuçları dikkate alındığında modele eklenen HDPE boru dolayısıyla zeminde pozitif kemerlenme meydana geldiği görülmüştür.

5. TEŞEKKÜR

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

REFERANSLAR

- Akinay, E. (2017). Sıkışabilir Yatak Malzemesi Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırlanan doktora tezi*, İstanbul, Turkey.
- Kılıç, H., & Akinay, E. (2019). Effects of using EPS geofoam as compressible inclusion on HDPE pipe behavior. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(2), 04019006.
- Akinay, E., & Kılıç, H. (2012). Investigating parameters affecting buried flexible pipe behavior. *3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, June 28-30, Near East University, Nicosia, North Cyprus.
- Zhou, M., Wang, F., Du, Y. J., Corey, R., & Liu, M. D. (2020). Feasibility study on the use of geosynthetics to reinforce buried HDPE pipes subjected to localized ground subsidence. *Transportation Geotechnics*, 22, 100303.
- Wang, F., Han, J., Khatri, D. K., Parsons, R. L., Brennan, J. J., & Guo, J. (2016). Field installation effect on steel-reinforced high-density polyethylene pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7(1), 04015013.
- McGuigan, B. L., & Valsangkar, A. J. (2011). Field monitoring and analysis of twin 3660 mm inside diameter induced trench culverts installed under 21.7 m of fill. *Canadian geotechnical journal*, 48(5), 781-794.
- Alzabeebee, S., Chapman, D. N., & Faramarzi, A. (2018). Innovative approach to determine the minimum wall thickness of flexible buried pipes. *Geomech Eng*, 15(2), 755-767.
- Corey, R., Han, J., Khatri, D. K., & Parsons, R. L. (2014). Laboratory study on geosynthetic protection of buried steel-reinforced HDPE pipes from static loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(6), 04014019.
- Khatri, D. K., Han, J., Corey, R., Parsons, R. L., & Brennan, J. J. (2015). Laboratory evaluation of installation of a steel-reinforced high-density polyethylene pipe in soil. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 199-207.
- Zhou, M., Wang, F., Du, Y. J., & Liu, M. D. (2019). Laboratory evaluation of buried high-density polyethylene pipes subjected to localized ground subsidence. *Acta Geotechnica*, 14(4), 1081-1099.
- Zhou, M., Wang, F., Du, Y. J., & Liu, M. D. (2017). Performance of buried HDPE pipes—part II: total deflection of the pipe. *Geosynthetics International*, 24(4), 396-407.
- Marston, A. (1922). "Second Progress Report to the Joint Concrete Culvert Pipe Committee", Iowa Engineering Experimental Station, Ames, Iowa.
- Spangler, M. G. (1968). "Discussion of the Modification of the Pressures on Rigid Culverts with Fill Procedures" *Highway Research Record*, No. 249, 41 -43.
- Rude, L. C. (1979). "A Study of the Imperfect Ditch Method for Rigid Culverts", Ph.D. Thesis, University of Virginia.
- Sladen, J. A., and Oswell, J. M. (1988). "The Induced Trench Method for Buried Pipe Protection: A Critical Review and Case History". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 3, pp. 541 – 549.
- McAfee, R. P., and Valsangkar, A. J. (2004). "Geotechnical Properties of Compressible Materials Used for Induced Trench Construction", *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 32, No. 2, pp. 1-10.

- McAfee, R. P., and Valsangkar, A. J. (2008). "Field Performance, Centrifuge Testing and Numerical Modelling of an Induced Trench Installation", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, No. 1, pp. 85 - 101.
- Parker, B. A., McAfee, R. P., and Valsangkar, A. J. (2008). "Field Performance and Analysis of a 3-m-Diameter Induced Trench Culvert under 19.4-m High Soil Cover", Journal of Transportation Research Board, Transportation Research Record, No. 2045, pp. 68-76.
- Kim, H., Choi, B., and Kim, J. (2010). "Reduction of Earth Pressure on Buried Pipes by EPS Geofoam Inclusions", Geotechnical Testing Journal, Vol. 33., No. 4, paper ID: GTJ102315.
- McGuigan, B. L., and Valsangkar, A. J. (2010). "Earth Pressures on Twin Positive Projecting and Induced Trench Box Culverts under High Embankments" Can. Geotech. J. 47 (2), 147-163.
- Vaslestad, J., Sayd, M.S., Johansen, T. H., and Wiman, L. (2011). "Load Reduction and Arching on Buried Rigid Culverts using EPS Geofoam. Design Method and Instrumented Field Tests", Proceedings of EPS 2011, June 6th e 8th2011 at Lillestrøm, Norway, vol. 1 paper 36, 10 pp.
- Sun, L., Hopkins, T.C., and Beckham, T.L. (2011). "Long-term monitoring of culvert load reduction using an imperfect ditch backfilled with geofoam." Transportation Research Record, 2212, 56-64.
- Kang, J., Parker, F., and Yoo, C. H. (2007). "Soil-Structure Interaction and Imperfect Trench Installations for Deeply Buried Corrugated Polyvinyl Chloride Pipes", 192 Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2028, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007, pp. 192-202. DOI: 10.3141/2028-21
- Akınay, E, Kılıç, H., ve Rouzegari, B. (2016). "Gömülü Esnek Boru Üzerindeki Zemin Gerilmelerinin EPS Geofoam ile Azaltılması", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- TS EN ISO 9969 (2009). "Termoplastik Borular-Çember Rijitliğinin Tayini"
- Wong, L., and Leo, C. J. (2006). "A Simple Elastoplastic Hardening Constitutive Model for EPS Geofoam", Geotextiles and Geomembranes, vol. 24, pp. 299-310.
- Atmatzidis, D.K., Missirlis, E.G., and Chrysikos, D.A. (2001) "An Investigation of EPS Geofoam Behavior in Compression", Proc. "EPS 2001", 3rd Int. Conf., Salt Lake City, USA.
- Chun, B.S., Lim, H., Sagong, M., and Kim, K. (2004)0 "Development of a Hyperbolic Constitutive Model for Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam under Triaxial Compression Tests." Geotextiles and Geomembranes, vol. 22, pp. 223-237.
- Togonon, A. R. M., Rowe, R. K., and Brachman, R. W. I. (1999). "Evaluation of Side Wall Friction for a Buried Pipe Testing Facility". Geotextiles and Geomembranes, vol. 17, pp. 193-212.
- Mert, B. (2014), "Kum Zeminde Rijitliğin Geogauge ile Belirlenmesi". Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- DIN 16961-2 (2010). "Thermoplastics Pipes and Fittings with Profiled Wall And Smooth Pipe Inside - Part 2: Technical Delivery Specifications", Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dhar, A. S., Moore, I. D., and McGrath, T. J. (2004). "Two-Dimensional Analyses of Thermoplastic Culvert Deformations and Strains", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 199-208.
- Dhar, A. S., and Moore, I. D. (2006). "Evaluation of Local Bending in Profile-Wall Polyethylene Pipes", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 11, pp. 898-906
- Schanz, T., Vermeer, P. A., and Bonnier, P. G. (1999). "The Hardening Soil Model: Formulation and Verification", *Beyond 2000 in Computational Geotechnics—10 Years of PLAXIS*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp 1–16.
- Martin, J. P., Koerner, R. M., and Whitty, J. E. (1984). "Experimental Friction Evaluation of Slippage Between Geomembranes, Geotextiles and Soils." *Proc. Int. Conf. on Geomembranes*, pp. 191-196.
- O'Rourke, T. D., Druschel, S. J., and Netravali, A. N. (1990). "Shear Strength Characteristics of Sand-Polymer Interfaces.", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, Vol. 116, No. 3, pp. 451–469.
- Bhatia, S., and Kasturi, G. (circa 1996). "Comparison of PVC and HDPE Geomembranes (Interface Friction Performance)", *Research Report*, Dept of Civil and Environmental Engineering, Syracuse University.
- Sheeley, M. and Negussey, D. (2000). "An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior", *Geotechnical Special Publication*, No.112-Soft Ground Technology, ASCE, pp. 292-303.
- Itasca Consulting Group, *FLAC3D 6.0 Modeling*. Itasca Consulting Group, Inc, 2017.