Gömülü Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boru Davranışının Sayısal Analizi

Havvanur Kılıç[1,*] ve Emre Akınay[2]

[1]Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, kilichavvanur@gmail.com
[2]Y.Müh, AustrothermTürkiye, emre.akinay@austrotherm.com.tr

ABSTRACT: This paper presents results obtained from true-scale laboratory model tests and two dimensional numerical analyses which were performed for the purpose of investigating buried HDPE pipe behavior. The parameters used in modeling of test soil were determined by back-calculation using the settlements measured in the model test performed with only test soil. Hardening Soil Model and Linear Elastic model were chosen for modeling the behaviors of test soil and HDPE pipe, respectively. Interface interaction between walls of test cell and test soil and between HDPE pipe wall and test soil were taken into account. The values measured in laboratory model tests are compatible with the values calculated in two dimensional numerical analyses.

Keywords: HDPE pipe, Numerical analysis, PLAXIS, Interface

ÖZET: Bu yayında gömülü yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru davranışının incelenmesi amacı ile yapılmış olan iki adet 1:1 ölçekli laboratuvar model deneyinden ve iki boyutlu sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Deney zemininin modellenmesinde kullanılan parametreler model deney ortamının yalnızca deney zemini ile oluşturulduğu deneyden alınan oturma ölçümlerinden yararlanılarak geri hesaplama ile belirlenmiştir. Modellemede deney zemini ve HDPE boru için davranış modeli olarak sırası ile Pekleşen Zemin Modeli ve Doğrusal Elastik Model kullanılmıştır. Analizlerde, model deney tank duvarları ile deney zemini arasındaki arayüzey etkileşimi ve boru ile deney zemini arasındaki arayüzey etkileşimi göz önünde bulundurulmuştur. Model deneylerde ölçülen değerlerin sayısal analizlerde hesaplanan değerler ile genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

AnahtarKelimeler: HDPE boru, Sayısal analiz, PLAXIS, Arayüzey

GİRİŞ

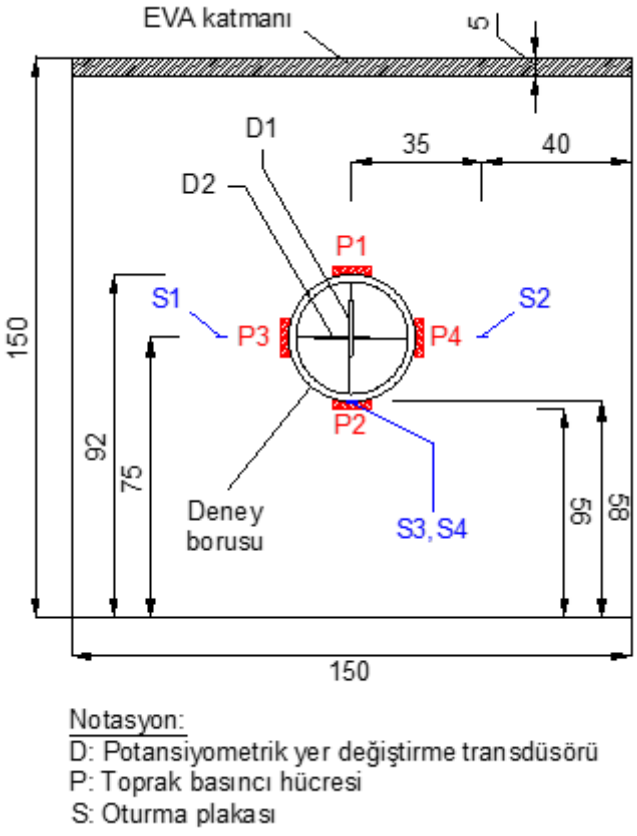
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boruların kullanımı, beton ve çelik boruların kullanımına göre, sağladığı avantajlardan dolayı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Gömülü boru davranışı bir zemin-yapı etkileşimi olgusu olup, bu olguyu incelemek için günümüze kadar sayısal analizlerin, enstrumante edilmiş laboratuvar ve arazi deneylerinin içinde yer aldığı birçok çalışma yapılmış olup, günümüzde de bu çalışmalar devam etmektedir.
Bu bildiride gömülü, astarlı kıvrımlı (lined corrugated) duvarlı bir HDPE borunun davranışını incelemek amacı ile gerçekleştirilen iki adet laboratuvar model deneyi ve iki boyutlu sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar paylaşılmış ve değerlendirilmiştir.

MODEL DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜMLER

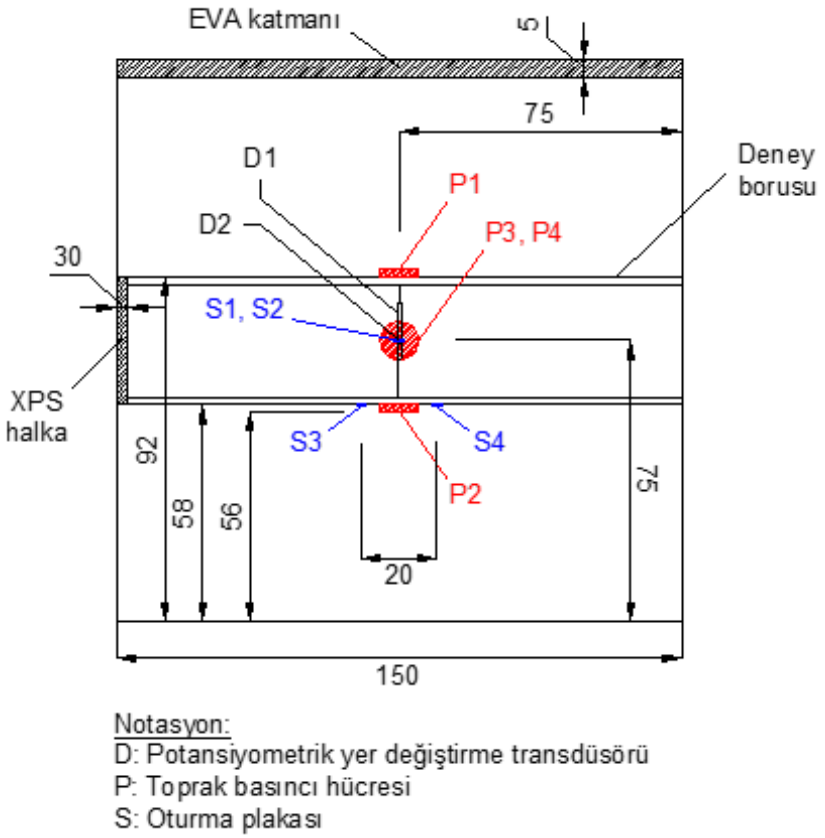
Laboratuvar model deneyleri 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m boyutlarında üç duvarı 10 mm kalınlığında çelik ve bir duvarı 30 mm kalınlığında saydam pleksiglas olan bir tanktan ve bu tankın üzerinde yer alan toplam 50 ton yükleme kapasitesine sahip iki adet hidrolik pistondan oluşmaktadır. Pistonların ucunda düşey yükü zemin yüzeyine iletecek bir rijit çelik plaka yer almaktadır. Pistonların üzerinde yer aldığı reaksiyon kirişi tank yapısına bağlıdır; diğer bir deyiş ile sistem bir yük çerçevesidir. Tank duvarlarının yanal yükler altında dışa doğru hareketini engellemek amacı ile tank duvarları çelik payandalar ve kuşaklar ile güçlendirilmiştir (Akınay vd. 2016).
Model deneylerde kapsamlı bir enstrumantasyon uygulanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2). Özetlenecek olunur ise: 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. P1 hücresi boru taç konumuna, P2 hücresi boru taban konumuna, P3 ve P4 hücreleri ise boru yan duvarı konumlarına yerleştirilmiştir (TML KDG-200PA ve KDG-500PA). P1, P2, P3 ve P4 toprak basıncı hücrelerinin ölçtüğü değerler sırası ile σ_{VC}, σ_{VI}, σ_{HW} ve σ_{HE} imgeleri ile gösterilmiştir.
Boru yanlarında ve boru tabanında zemin oturmalarını ölçmek için bu konumlara oturma plakaları yerleştirilmiştir. Her bir oturma plakası tank tabanına terazide oturtulmuş bir kutu profilden, bu profil içerisine yerleştirilmiş bir potansiyometrik yer değiştirme transdüsörü ve transdüsörün ucuna vidalanmış 25 mm (en) x 25 mm (boy) ve 3 mm (kalınlık) boyutlarında metal bir plakadan oluşmaktadır (Burster 8712-100). 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, aralarındaboru eksenin doğrultusunda 20 cm açıklık yer almaktadır. Oturma plakalarının ölçtüğü değerler sırası ile δ_W, δ_E, δ_{I1} ve , δ_{I2} imgeleri ile gösterilmiştir.

Borunun düşeyde ve yatayda esnemesini (deflection) ölçmek için boru içerisine -borunun orta uzunluktaki enkesitine- iki adet potansiyometrik yer değiştirme transdüsörü yerleştirilmiştir (Burster 8709-5100). 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. Yapılan deneylerde 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) tarafından sunulan yayınlarda verilmiştir.



Şekil 1. Model deney tank içerisinde ölçüm aletlerinin konumları (Doğu-Batı kesiti)



Şekil 2. Model deney tank içerisinde ölçüm aletlerinin konumları (Kuzey-Güney kesiti)

LABORATUVAR MODEL DENEYLERİ

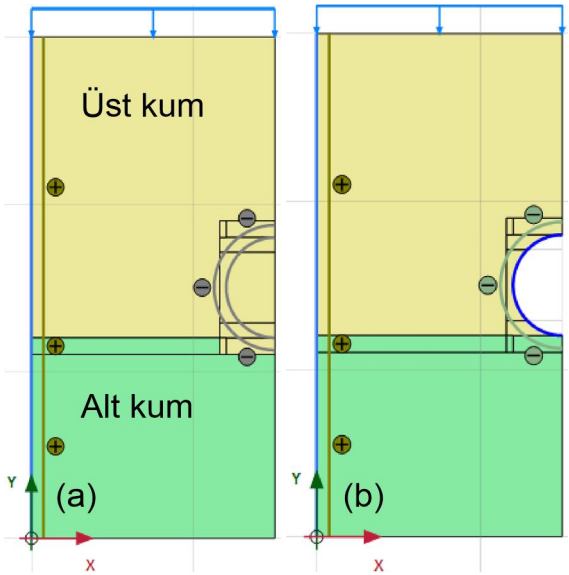
Bu yayın kapsamında iki adet laboratuvar model deneyine ilişkin veriler paylaşılmıştır. Deney #1, Borusuz Deney olarak da anılan, yalnızca deney zemininin davranışının incelendiği deneydir. Bu deneyden elde edilen oturma ölçümleri, sayısal analizler ile deney zemini rijitlik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Deney #2 ise deney zemini içerisinde, borunun yer aldığı deneydir. Laboratuvar model deneylerinin yapılması hakkında daha fazla ayrıntı Akınay vd. (2016) tarafından sunulan yayında verilmiştir.

İKİ BOYUTLU SAYISAL ANALİZLER

Laboratuvar model deneylerinden alınan ölçümlere dayanılarak boru ve zemin tepkilerinin boru düşey eksenine göre simetrik olduğu varsayılmış ve çözümlemelerde yarım geometri kullanılmıştır. Model geometrisi 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar ile oluşturulmuştur. Sonlu eleman ağ sıkılığının çözümleme hassasiyeti üzerindeki etkisi incelenmiş ve model geometrisi sonlu eleman ağının "çok küçük (very fine)" elemanlar kullanılarak oluşturulmasına karar verilmiştir.

Deney #1

Deney #1'in hazırlanması aşamasında deney kumunun tank tabanından 60 cm yukarıya (y = 0.60 m) ulaşmasının ardından tankın içerisine girilmiş ve ölçüm aygıtları (oturma plakaları ve toprak basıncı hücreleri) yerleştirilmiştir. y = 0.60 m düzeyi, Deney #2'de boru taban düzeyine karşılık gelmektedir. Ayaklardan aktarılan vücut yükünü dağıtmak amacı ile zemin yüzeyine EPS veya XPS paneller yerleştirilmiş ve bu panellerin üzerine basılmıştır. Bu nedenle sayısal analizlerde zemin ortamı y=0.60 m düzeyinden görece sıkı "alt kum" ve görece gevşek "üst kum" olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. a)Deney #1 ve b) Deney #2 için model geometrileri

Sayısal analizlerde deney kumu için malzeme modeli olarak Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model) kullanılmıştır. Bu modelde referans çevre basıncı p=100 kN/m² olarak girilmiştir. Deney #1 için

yapılan sayısal analizlerde deneme-yanılma yolu ile boru bölgesindeki (boru yanlarındaki ve boru tabanındaki) zemin oturmalarının 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}) Pekleşen Zemin Modelinin varsaydığı biçimde sırası ile $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ ve $E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref}$ olarak alınmıştır. Üst kum ve alt kum zeminlerin rijitlik parametrelerini belirlemek için yapılan sayısal analizlerden saptanan parametreler Tablo1'de sunulmuştur. Deney zemini için kayma dayanımı açıları konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri sonucunda belirlenmiştir. Genleşme açıları yazılımın önerdiği biçimde $\psi = \varphi - 30$ olarak alınmıştır. Genleşmenin bitmesi (dilatancy cut-off) seçeneği devre dışı bırakılmıştır.

Tablo 1. Deney zemini için belirlenen HS Modeli parametreleri

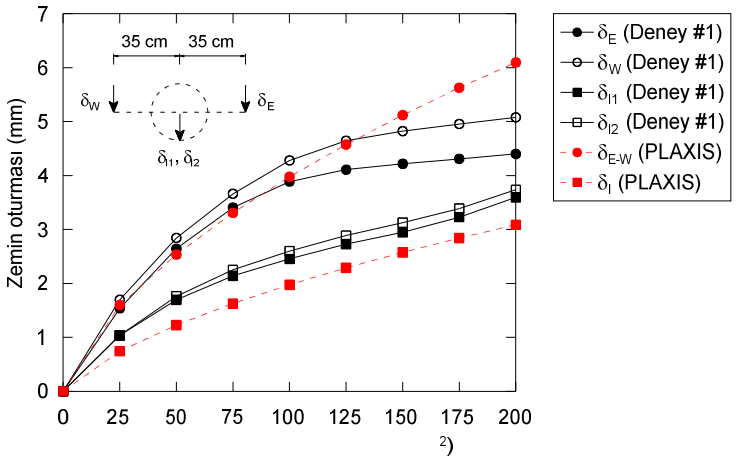
Model Parametresi	Üst Kum	Alt Kum
γ_k (kN/m³)	15	15.5
E_{50}^{ref} (MPa)	7.5 (Aşama 1-2) 10 (Aşama 3-9)	60
E_{oed}^{ref} (MPa)	7.5 (Aşama 1-2) 10 (Aşama 3-9)	60
E_{ur}^{ref} (MPa)	22.5 (Aşama 1-2) 30 (Aşama 3-9)	180
m (-)	0.5	0.5
φ(°)	30	35
ψ (°)	0	5.0
c (kN/m²)	0.1	0.1

Tank duvarlarının yeterince rijit olması nedeniyle dışa doğru hareketinin olmadığı kabul edilerek, sayısal analizlerde tank duvarı-deney kumu arayüzey davranışının modellenebilmesi için zemin ortamı sınırlarına kiriş elemanlar (plate elements) atanmıştır. Tank duvarı malzeme modeli için Doğrusal Elastik Model kullanılmıştır. Tank duvarının birim uzunlukta eğilme rijitliğinin EI = 2083.33 (kNm²/m) ve tank duvarının birim uzunlukta normal rijitliğinin $EA=10^7$ (kN/m) olduğu varsayılmış, Poisson Oranı v = 0.30 olarak alınmıştır.
Tank duvarı-deney zemini ara yüzey dayanımının en aza indirgenmesi amacı ile tank duvarlarına Tognon vd.(1999) tarafından önerilen iyileştirme katmanı uygulanmıştır. Bu iyileştirmenin tank

duvarı-deney zemini arayüzey dayanım açısını 5^0 düzeyine indirdiği belirtilmiştir. Diğer bir deyiş ile tank duvarı-deney zemini arayüzey dayanım açısı deney zemini kayma dayanımı açısının 1/6'sı ila 1/7'si düzeyine ulaştığı anda arayüzeyde hareket meydana gelmeye başlayacaktır. 1/6 oranı göz önünde bulundurularak alt kum zemin ve üst kum zemin için arayüzey azaltma oranı R_{inter}=0.17 olarak belirlenmiştir.

Zemin yüzeyinden uygulanan sürşarj gerilmesinin modellenmesi amacı ile model geometrisi üst sınırı boyunca düzgün yayılı çizgisel yük (uniformly distributed line load) atanmıştır. Deney #1'in sayısal analizinde başlangıç aşaması (initial phase) ardından birinci aşamada düzgün yayılı yükün değeri sıfır olarak girilmiş ve deney zemininin kendi ağırlığı altındaki oturmalar hesaplanmıştır. Daha sonra takip eden her bir yükleme adımında düzgün yayılı yük değeri 25 kN/m² artırılarak dokuz adımda 200 kN/m² değerine ulaşılarak deney tamamlanmıştır.

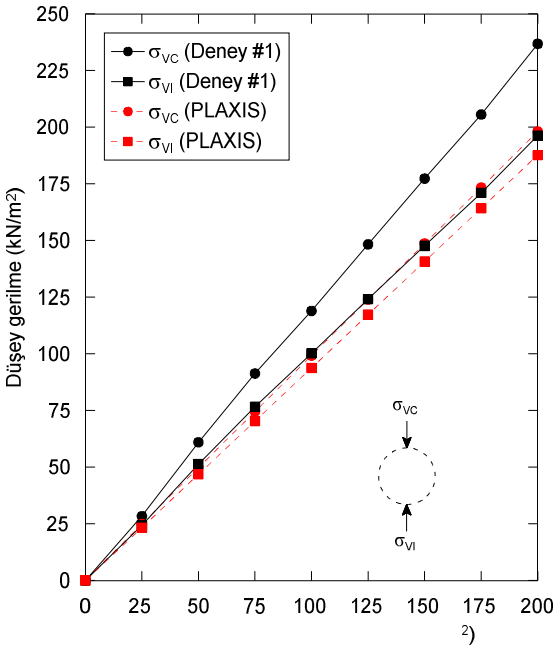
Oturma plakalarından alınan oturma ölçümlerinin sayısal analizlerle hesaplanan değerler ile karşılaştırılması Şekil 4'te, toprak basıncı hücrelerinden alınan gerilme ölçümlerinin sayısal analizlerden hesaplanan değerler ile karşılaştırılmaları ise Şekil'te ve Şekil 6'da sunulmuştur.



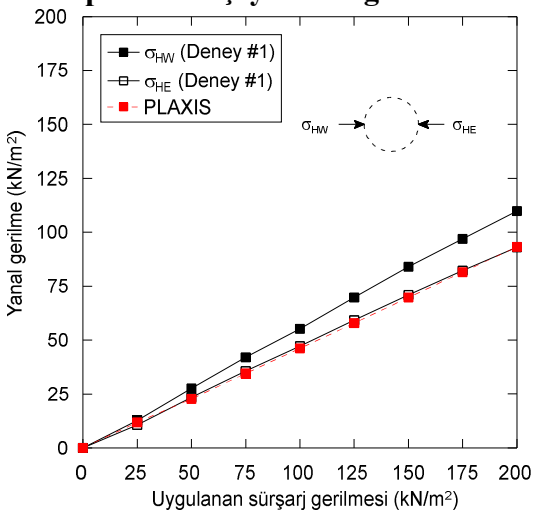
Şekil 4. Deney #1'de ölçülen ve hesaplanan zemin oturmaları

200 kN/m² sürşarj gerilmesi altında boru tacında hesaplanan düşey gerilme ölçülen değerden %19 azdır. Boru tabanında hesaplanan düşey gerilmeler ve boru yan duvarlarında hesaplanan yanal gerilmeler ölçülen değerlere daha yakındır. Zemin içerisinde yer alan bir basınç hücresinin verdiği tepkinin zemin rijitliği, hücre rijitliği, hücre geometrisi, bağıl dane boyutu, yerleştirme yöntemi, gerilme düzeyi gibi

birçok etkene bağlı olduğu (Monfore 1950; Selig 1980; Talesnick 2005, Talesnick 2013) göz önünde bulundurulduğunda ölçülen değerler ile hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 5. Deney #1'de boru tacında ve boru tabanında ölçülen ve hesaplanan düşey zemin gerilmeleri



Şekil 6. Deney #1'de boru yan duvarlarında ölçülen ve hesaplanan yanal zemin gerilmeleri

Deney #2

Deney #2'de borunun zemin yüzeyine yerleştirilmesinin ardından bazı ölçüm aygıtlarının işlevinde bir aksaklık olduğu görülmüştür. Aksaklığın giderilmesi amacı ile boru tanktan dışarı çıkarılmıştır. Borunun tank dışına çıkarılması sırasında boru tabanı altında yer alan zemin bölgesi örselenmeye maruz kalmıştır. Bu nedenle boru tabanı altındaki zemin bölgesi bu analizde alt kum bölgesine dahil edilmiştir (Şekil 3b). Bu bölgenin boru anma çapından 4 cm daha geniş (34 cm) ve 5 cm kalınlıkta olduğu varsayılmıştır.

Deney borusu kiriş elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Astarlı kıvrımlı (lined corrugated) duvarlı deney borusunun birim uzunlukta eylemsizlik momenti 4.886×10^{-7} m^4/m olarak belirlenmiştir. Belirlenmiş olan birim uzunluktaki eylemsizlik momentinden düz duvarlı borunun duvar kalınlığı $t = 1.803 \times 10^{-7}$ m olarak hesaplanmıştır. Düz duvarlı boru duvarının birim uzunlukta alanı duvar kalınlığına eşit olup $A=1.803 \times 10^{-7}$ m^2/m'dir.

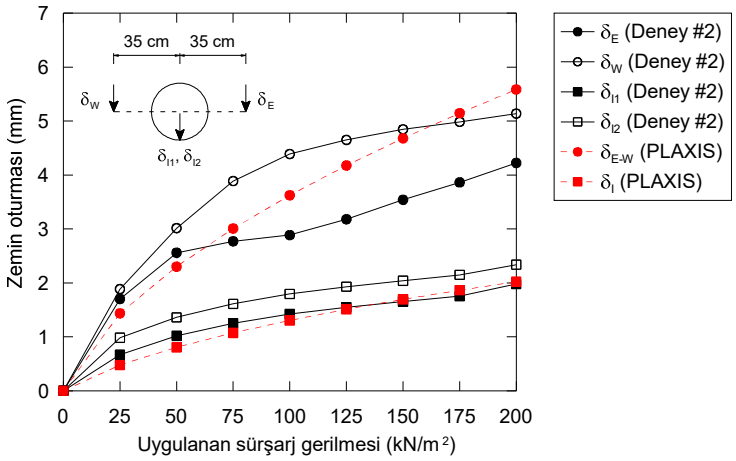
Dhar vd. (2004) ve Dhar ve Moore (2006) boru davranışını doğrusal elastik olarak varsaydıkları sayısal analizlerde HDPE borunun elastisite modülü olarak 6 saatlik deney süresi için temsilci olan 450 MN/m^2 değerini ve Poisson Oranı olarak da 0.46 değerini kullanmışlardır. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde boru davranışının doğrusal elastik olduğu varsayılmış ve HDPE elastisite modülü olarak DIN 16961-2 (2010)'da 24 saatlik yükleme için verilen en küçük akma modülü olan 390 MN/m^2 değeri ve HDPE Poisson Oranı olarak da 0.46 değeri kullanılmıştır. Düz ve elastik bir kiriş olarak modellenen boru duvarı için belirlenen malzeme ve kesit özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deney borusu için doğrusal elastik model parametreleri

Parametre	Değer
E (MN/m^2)	390
v (-)	0.46
w (kN/m/m)	0
I (m4/m)	4.886×10^{-7}
A (m^2/m)	1.803×10^{-7}
EI (kNm^2/m)	1.906×10^{-1}
EA (kN/m)	7032.41

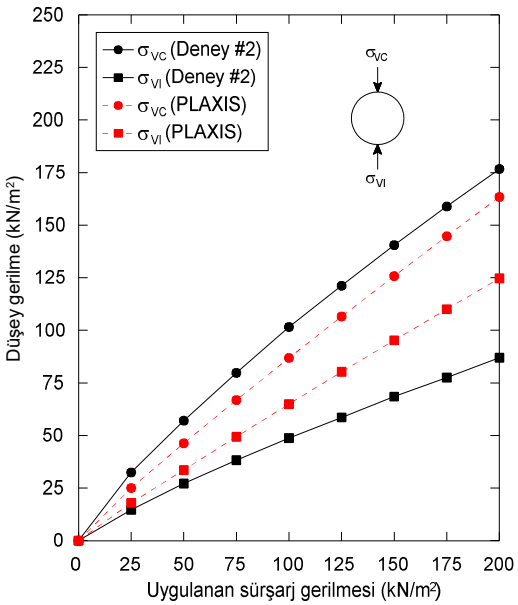
Çeşitli ortalama dane çaplarında Ottawa kumu ile çalışan Martin vd. (1984), Saxena ve Wong (1984), Williams ve Houlihan (1987), O'Rourke vd. (1990) ve Dove ve Frost (1999) kesme kutusu deneyleri

sonucunda HDPE-kum arayüzey açısını sırası ile 18°, 19.8°, 19°, 19.1°-19.4° ve 21.3°olarak bulmuşlardır. Bhatia ve Kasturi (1996) HDPE-ince kum arayüzey dayanımı açısını pik 23.3° ve %10 yatay şekil değiştirmede 21.1° olarak bulmuşlardır.
Oturma plakalarından alınan oturma ölçümlerinin, sayısal analizden hesaplanan değerler ile karşılaştırılması Şekil 7'de gösterilmiştir. Hesaplanan değerler ölçülen değerler ile uyumludur. Deney #1'in sayısal analizinde kalibre edilen zemin malzeme parametrelerinin Deney #2'nin modellenmesi için de uygun parametreler olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç aynı zamanda Deney #1'de ve Deney #2de deney zemininin hemen hemen aynı koşullarda yerleştirilmiş olduğunun kanıtıdır.



Şekil 7. Deney #2'de oturmaların karşılaştırılması

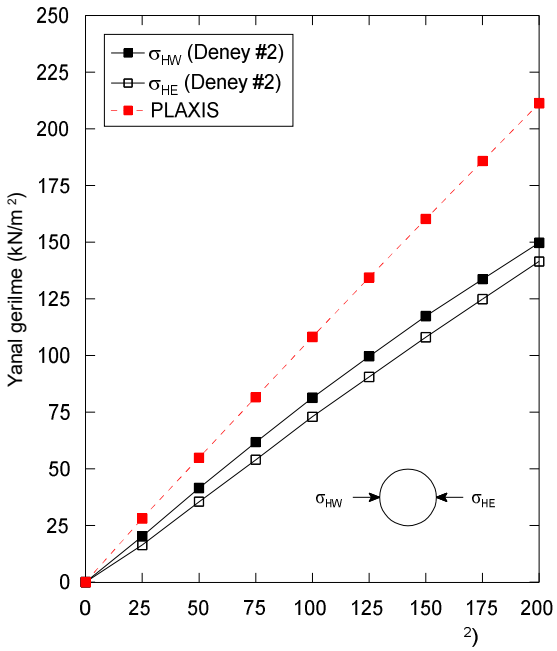
Toprak basıncı hücrelerinden alınan gerilme ölçümlerinin hesaplanan değerler ile karşılaştırılması Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Boru tacında hesaplanan düşey gerilmeler ölçülen değerler ile uyumludur. 200 kN/m² sürşarj gerilmesi altında boru tabanında hesaplanan düşey gerilme ise ölçülen değerden %45, boru yan duvarlarında hesaplanan yanal gerilme ise ölçülen değerlerden ortalama %43 fazladır.



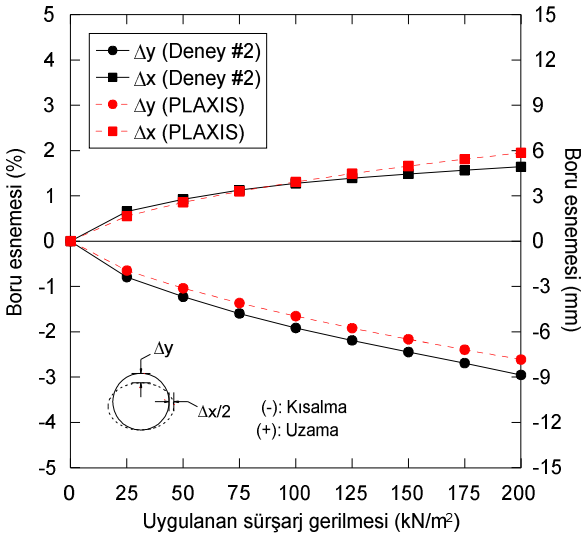
Şekil 8. Deney #2'de boru tacında ve boru tabanında ölçülen ve hesaplanan düşey zemin gerilmeleri

Borunun düşeyde esnemesi boru tacındaki ve boru tabanındaki düşey hareket miktarlarının farkına eşittir. Sayısal analizde hesaplanan düşey esnemeleri elde etmek amacı ile boru tacı ve boru tabanı konumlarında (sırası ile x=0.75 m; y=0.90 m ve x=0.75 m; y=0.60 m) yer alan düğüm noktalarının düşey hareket miktarları incelenmiştir.

Borunun yatayda esnemesi boru yan duvarlarındaki yatay hareket miktarlarının farkına eşittir. Bu tanım, elbette ki, hareket yönlerinin aynı referans noktasına göre belirlenmiş olduğu durum için geçerlidir. Yukarıda değinildiği üzere, boru tepkisinin boru düşey eksenine göre simetrik olduğu varsayılmıştır. Bu varsayıma göre, boru yan duvarında hesaplanan yatay hareket miktarının iki katı borunun yatay esnemesine eşittir. Sayısal analizlerde hesaplanan yatay esnemeleri elde etmek amacı ile boru yan duvarı konumundaki (x=0.58 m; y=0.75 m) yer alan düğüm noktasının yatay hareket miktarı incelenmiştir. Ölçülen boru esnemelerinin hesaplanan değerler ile karşılaştırılması Şekil 10'da sunulmuştur. Hesaplanan boru esnemelerinin ölçülen değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Deney #2'de boru yan duvarlarında ölçülen ve hesaplanan yanal zemin gerilmeleri



Şekil 10. Deney #2'de ölçülen ve hesaplanan boru esnemeleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, gömülü HDPE boru davranışının incelenmesi amacı ile yapılmış olan iki adet laboratuvar model deneyinden ve sonlu eleman yöntemi ile yapılan iki boyutlu sayısal analizden elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Deney zemininin modellenmesinde kullanılan rijitlik parametreleri, model deney ortamının yalnızca deney zemini ile oluşturulduğu Deney#1'de alınan oturma ölçümlerinden yararlanılarak geri hesaplama ile belirlenmiştir. Bu aşamanın ardından HDPE boru-zemin etkileşiminin incelendiği Deney#2'nin sayısal analizi gerçekletirilmiştir. Sayısal analizlerde tank duvarı-deney zemini ve HDPE-deney zemini arasında arayüzey etkileşimi dikkate alınmıştır. HDPE-deney zemini ara yüzey dayanım açısının 20° olarak alınması uygun görülerek, boruyu çevreleyen üst kum için girilen kayma dayanımı açısının 30° olması nedeni ile HDPE-deney zemini arayüzeyi için azaltma etkeni R_{inter}=0.67 olarak seçilmiştir. Yapılan sayısal analizlerin sonucunda hesaplanan oturma, gerilme ve boru esnemelerinin ölçülen değerler ile genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu tarafından 110M673 nolu proje ve YTÜ Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2014-05-01-DOP01 nolu Proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Akınay, E, Kılıç, H., ve Rouzegari, B. (2016). "Gömülü Esnek Boru Üzerindeki Zemin Gerilmelerinin EPS Geofoam ile Azaltılması", *ZMGM 16. Ulusal Kongresi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Akınay, E., Kılıç, H., Rouzegari, B. (2013). "Gömülü Boru Davranışının Modellenmesi Amacı ile Kurulan Deney Tümleşkesinin Tanıtımı", 5. *Geoteknik Sempozyumu,* Çukurova Üniversitesi, Adana (5-6 Aralık 2013).

Bhatia, S.,and Kasturi, G. (circa 1996). "Comparison of PVC and HDPE Geomembranes (Interface Friction Performance)", *Research Report,* Dept. of Civil and Env. Engineering, Syracuse University.

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.

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.

Dove, J. E., and Frost, J. D. (1999). "Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane Particle Interfaces", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, 7, pp. 544-555.

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.

Kılıç, H., ve Akınay, E. (2014). "Gömülü Esnek Boru Davranışının Laboratuar Model Deneyleri ile İncelenmesi" *Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN Onuruna Geoteknikte Gelişmeler ve Deneyimler Sempozyumu*, Sayfa: 91 -101, 2 Haziran 2014, Davutpaşa Kongre ve Kültür Merkezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Monfore, G. E. (1950). "An Analysis of the Stress Distribution in and near Stress Gauges Embedded in Elastic Soils", Structural Laboratory Report No. SP 26, U.S. Bureau of Rec., Denver, CO.

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.

Saxena, S. K.,and Wong, Y. T. (1984). "Friction Characteristics of a Geomembrane." *Proc, Int. Conf. on Geomembranes, Industrial Fabrics Association International,* pp. 187-190.

Selig, E. T. (1980). "Soil Stress Gage Calibration", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 172-186.

Talesnick, M. L. (2005) "Measuring Soil Contact Pressure on a Soil Boundary and Quantifying Soil Arching", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 2, pp. 171-179.

Talesnick, M. L. (2013) "Measuring Soil Pressure within a Soil Mass", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, pp. 716-722.

Tognon, 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*, 17, No. 4, 193–212.

Williams, N. D., and Houlihan, M. F. (1987). "Evaluation of Interface Friction Properties Between Geosynthetics and Soils." *Proc. Geosynthetic '87 Conf.,*Industrial Fabrics Association International, pp. 616-627.