

## Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi

Havvanur KILIÇ<sup>1</sup>  
Emre AKINAY<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada gömülü yüksek yoğunluklu polietilen borularda (HDPE) boru çember rijitliği, düşey gerilme, dolgu yerleşiminin relatif kompaksiyonu ve dolgu malzeme türünün esnemelere olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, kalın dolgular altına drenaj amacıyla yerleştirilen esnek boruların davranışının incelenmesi kapsamındaki arazi deneyleri kullanılmıştır. Boru özellikleri, dolgu yerleşimi, dolgu malzeme türü dikkate alınarak söz konusu borularda meydana gelen esnemeler, Geliştirilmiş Iowa yaklaşımları ve sayısal analizler ile incelenmiş ve elde edilen sonuçların arazi ölçümleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Zemin – boru etkileşiminin dikkate alınabildiği yarı ampirik yaklaşımlar ve sayısal analizlerden hesaplanan esnemelerin arazi ölçümleri ile yaklaşık olarak uyumlu olduğu belirlenmiştir. Çember rijitliği düşük ve yüksek olan yüksek yoğunluklu polietilen boruların tasarımı için bu ampirik yaklaşımların ve iki boyutlu sayısal analizlerin kullanılabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** HDPE boru, esnemeler, Geliştirilmiş Iowa yaklaşımları, sayısal analiz.

### ABSTRACT

#### Investigation of Buried HDPE Pipe Deflection Behavior

In this study, the effects of pipe ring stiffness, vertical stress, fill placement relative compaction of fill placement and fill material type on deflection were investigated in buried high density polyethylene pipes (HDPE). In this content, field tests which are carried out to examine the behavior of flexible pipes placed under thick embankments for drainage purposes are used. Considering the pipe characteristics, fill placement, type of fill material, the results were examined by using Modified Iowa approaches and numerical analyses, and the obtained results were compared with the field measurements. As a result of comparisons, it is seen that the deflections computed from numerical analyses are in close agreement with

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21 Şubat 2018 günü ulaşmıştır. 12 Kasım 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.397254>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, - [kilic@yildiz.edu.tr](mailto:kilic@yildiz.edu.tr) - <https://orcid.org/0000-0001-9455-1687>

2 Austrotherm Yalıtım Malzemeleri San. Tic. Ltd. Şti. - İstanbul, - [emre.akinay@austrotherm.com.tr](mailto:emre.akinay@austrotherm.com.tr) - <https://orcid.org/0000-0001-9843-0532>

the computed from the semi-empirical approaches that take in to deflections account the soil-pipe interaction. As a conclusion it is determines that the empirical approaches and two dimensional numerical analyses can be used in the design high density polyethylene pipes with low and high ring rigidity.

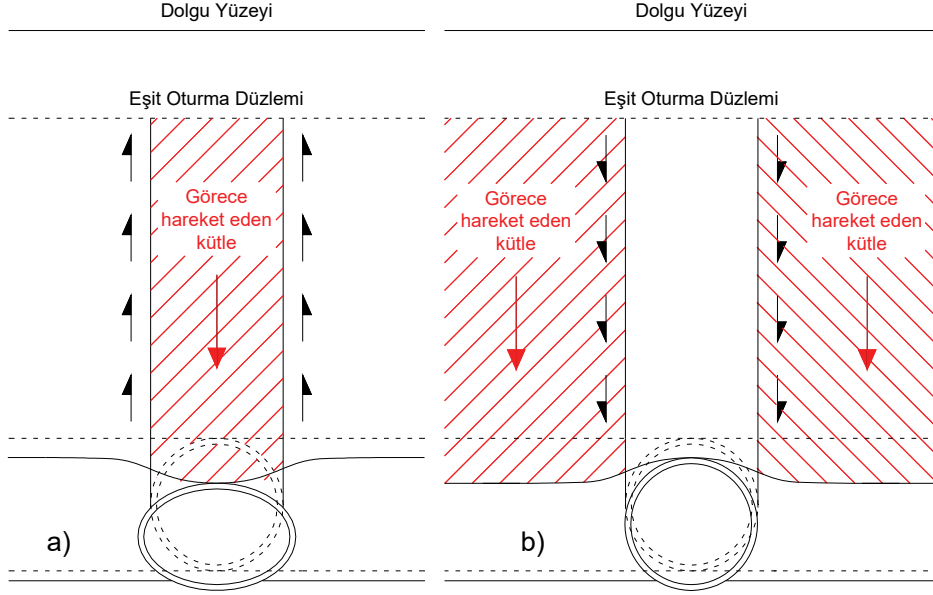
**Keyword:** HDPE pipe, deflections, Modified Iowa approachs, numerical analysis.

## 1. GİRİŞ

Dünya genelinde 20. yüzyılın başlarına kadar rijit borular yaygın olarak kullanılmış, ancak son yarım yüzyılda plastik sanayiindeki gelişmelere paralel olarak düşük maliyeti, hafifliği, esnekliği, korozyona ve aşınmaya karşı direnci gibi avantajlarından dolayı yerlerini büyük ölçüde esnek borulara bırakmışlardır. Esnek boruların davranışını rijit borulardan farklı kılan en önemli özellik, geri dolgu (gömlekleme dolgusu) ile boru arasındaki etkileşimin borunun yapısal davranışını etkilemesidir. Genellikle yüksek dolgular altında kalacak drenaj borularının, üzerindeki kalın dolgu yükünü güvenle taşıyamayacağı ve esneme sınır değerlerini aşarak kullanılamaz hale geleceği düşünülerek, uygulamada çelik boru kullanımı yaygın kabul görmektedir.

Gömülü esnek boruların davranışı, geoteknik mühendisliğinin en karmaşık zemin-yapı etkileşimi problemlerinden biridir. Boru rijitliği gömülü bulunduğu zemin ortamının rijitliğinden genellikle farklıdır. Bu nedenle, borunun üzerinde yeralan zemin prizması ile komşu zemin prizmaları arasında bir görece hareket söz konusudur. Bu görece hareketin yönü ve büyüklüğü boru üzerine etkileyen zemin gerilmelerinin büyüklüğünü etkilemektedir. Hareket eden bir zemin kütesinden komşu durağan zemin kütlelerine yük aktarılması kemerlenme olgusu olarak tanımlanmaktadır. Zemin kütesi içerisinde görece rijitliğe bağlı olarak kemerlenme pozitif (aktif) veya negatif (pasif) olabilir. Zemin içerisindeki yapının zeminden daha sıkışabilir olduğu durumda yapının sıkışması nedeni ile yapının üzerinde yer alan zemin prizması görece hareket eder (oturur). Görece hareket eden zemin prizması ile komşu zemin prizmaları ara yüzeylerinde hareketin yönü ile ters yönde kayma kuvvetleri oluşur. Böylelikle de yapının üzerine etkileyen gerilme yapı üzerinde yükselen zemin prizmasının neden olacağı gerilmeden (geostatik gerilme) daha az olur. Bu olgu pozitif (aktif) kemerlenme olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1a). Zeminin yapıdan daha sıkışabilir olduğu durumda ise ara yüzeylerde oluşan kayma kuvvetlerinin yönü terstir (aşağı yönlüdür) ve bunun sonucu olarak da yapının üzerine etkileyen gerilme geostatik gerilmeden daha fazla olur. Bu olgu ise negatif (pasif) kemerlenme olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1b). Yukarıda yer alan kemerlenme olgusu tanımları da göz önünde bulundurulduğunda gömülü esnek bir borunun üzerinde pozitif kemerlenme mekanizması gelişir (Şekil 1a). Kemerlenmenin derecesi ise görece hareketin büyüklüğüne ve buna bağlı olarak zemin prizmaları ara yüzeylerinde kayma dayanımının mobilizasyon derecesine bağlıdır. Eğer görece hareket ara yüzeylerde kayma dayanımının tamamı ile mobilize olmasını sağlayacak büyüklükte ise pozitif kemerlenme en büyük yararı sağlar; diğer bir deyiş ile bu durumda boru tacı üzerine etkileyen 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 (Şekil 1). Bu düzlemdeki bütün oturmalar eşittir ve –dolayısı ile– bu düzlemin üzerinde kemerlenmenin etkisi görülmez. Bu durumda eşit oturma düzleminin üzerinde kalan dolgunun yükü boru üzerine

sürşarj yükü gibi etkir. Terzaghi (1936) ünlü tuzak-kapak deneyinde (trap-door experiment) hareket eden kapak ile eşit oturma düzlemi arasındaki uzaklığın yaklaşık olarak kapak genişliğinin 2.5 katı olduğunu belirtmiştir [2]. Eğer, boru görece sığa gömülmüş ise eşit oturma düzlemi dolgu zemininin dışında yer alır; diğer bir deyiş ile imgeseldir. Bu durumda ise zemin yüzeyinde bir miktar çökme meydana gelir.

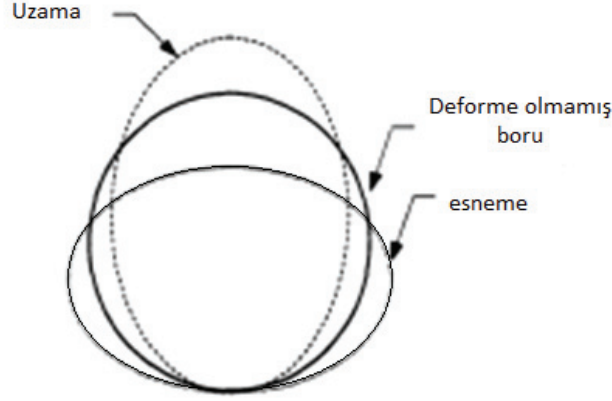


Şekil 1 - Gömülü borularda kemerlenme olgusu (a) Pozitif kemerlenme (Esnek boru) (b) Negatif kemerlenme (Rijit boru)

Şekil 2'de yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular için deformasyon biçimleri gösterilmiştir. Uygulanan yüklerden dolayı boru esneyebilir (düşey çap kısılması veya yatay çap uzaması - esneme) veya geri dolgunun kompaksiyonu sonucunda uzama (düşey çap uzaması veya yatay çap kısılması) meydana gelebilir. Esneme veya uzama biçiminde meydana gelen deformasyonlar esnek boru etrafındaki geri dolgunun türü, sıklığı, yerleştirilme biçimi, kompaksiyonu vb. uygulamalar ile kontrol edilebilmektedir.

Boru çapı değişimi esnek ve yarı rijit borular için önemli bir tasarım parametresidir. Esnek borularda kırılma ve çatlama meydana gelmeksizin büyük deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Tasarımda hasar, göçme vb. gibi davranışların meydana gelmemesi için maksimum boru çapı değişimi (performans sınırı) değeri için bir güvenlik sayısı ile azaltmaya gidilmektedir. Genellikle, boru çapındaki değişimin sınırı borunun kullanıldığı coğrafi bölgeye, yerleştirme amacına, ilettikleri akışkanın özelliklerine ve taşıdığı sıvının debi limitlerine göre değişmektedir [4]. Gömülü esnek borunun servis süresi boyunca güvenle hizmet edebilmesi için, çeşitli uygulama kodlarında %5 - %7.5 kadar esnemelerine izin verilmektedir [5] [6].

## Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi



Şekil 2 - Esnek boruda kısalma (esneme) ve uzama [3].

Şekil değiştirmeler esnemeye bağlı olduğundan, üreticilerin çoğu esnemeyi ve dolayısıyla şekil değiştirmeleri sınırlamak için bir yerleştirme tekniği önerir. Şekil değiştirme sınırı, boru duvar şekil değiştirmesinin belirli bir eşik şekil değiştirme değerini aştıktan sonra meydana gelen bozulma olarak tanımlanan şekil değiştirme korozyonunu önlemek için kullanılır. Toplam şekil değiştirme, sırasıyla (1), (2), (3) ve (4) eşitliklerinde sunulan eğilme şekil değiştirmesi, çembersel şekil değiştirme ve Poisson oranı nedeni ile şekil değiştirmeleri kapsar.

$$\varepsilon_b = 6 \left( \frac{t}{D} \right) \left( \frac{\Delta y}{D} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_v D}{2tE_p} \quad (2)$$

$$\varepsilon_p = \frac{P_i D}{2tE_p} \quad (3)$$

$$\varepsilon = -\nu \times (\text{boyuna deformasyon}) \quad (4)$$

(1) – (4) eşitliklerinde verilen;  $\varepsilon_b$ = düşey ekseninde boru çapı değişimi nedeni ile oluşan eğilme deformasyonu,  $\varepsilon_c$ = boru duvarlarında düşey zemin basıncından kaynaklanan gerilme nedeni ile oluşan basınç deformasyonu,  $\varepsilon_p$ =boru duvarlarında iç basınçtan (vakum) kaynaklanan gerilme nedeni ile oluşan basınç deformasyonu,  $\varepsilon$ =Poisson çember deformasyonu,  $P_v$ =prizma yükü ve hareketli yük (toplam düşey yük),  $D$  = boru çapı,  $t$ = boru et kalınlığı,  $E_p$ = boru elastisite modülü,  $\Delta y$  = boruda düşey ekseninde meydana gelen boy kısalması,  $\Delta y/D$  =esneme ve  $P_i$ = iç basınçtır.

Bu makale kapsamında, drenaj amaçlı olarak kullanılacak HDPE boruların kalın dolgu yüküne maruz kalması durumunda, esneme davranışına gömlekleme dolgu türü ve dolgunun yerleşim kalitesi, boru çember rijitliği etkileri incelenmiştir. Bu amaçla Ohio Eyalet Üniversitesi'ne bağlı araştırma enstitüsü ORITE tarafından yürütülen arazi deneyleri kapsamında 11 adet HDPE borunun esneme davranışı incelenmiştir. Çalışmada öncelikle yük-boru-zemin etkileşiminin dikkate alınabildiği yarı-ampirik eşitliklerden, daha sonra ise geoteknik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan Plaxis sonlu elemanlar programı ile yapılan sayısal analizlerden hesaplanan esnemelerin arazi ölçümleri ile karşılaştırılması yapılmış ve değerlendirmeler sunulmuştur.

## 2. HDPE BORULARDA ESNEMELERİN HESAPLANMASI

Gömülü esnek boruların tasarımında genellikle ampirik yaklaşımlar, arazi ve laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerden yararlanılabilir. Gömülü HDPE boru tasarımında Iowa Eşitliği yaygın olarak kullanılmaktadır [8] [9]. Yatay ekseninde meydana gelen esnemeyi veren bu yarı-ampirik bağıntı temel olarak (5) eşitliği ile ifade edilmektedir [1].

$$\text{Esneme} = (\text{Yük}) / (\text{Boru rijitliği} + [\text{Sabit}] \text{Zemin Rijitliği}) \quad (5)$$

Iowa Eşitliği'nin Watkins ve Spangler (1958) tarafından geliştirilen formu (6) eşitliği ile verilmektedir [8].

$$\frac{\Delta x}{D} = \frac{D_L K P}{E_p I / r^3 + 0.061 E'} \quad (6)$$

(6) eşitliğinde verilenler:  $\Delta x$  = Yatay ekseninde yer değiştirme,  $D$  = Boru çapı,  $K$  = Yatak sabiti,  $D_L$  = Gecikme faktörü (boyutsuz),  $P$  = Boru tacına etkiyen düşey gerilme,  $E_p$  = Boru malzemesinin Young Modülü,  $I$  = Boru duvarının birim uzunlukta eylemsizlik momenti,  $r$  = ort. boru yarıçapı = (ort. dış çap - 2 · ort. et kalınlığı)/2 [10] ve  $E'$  = Zemin reaksiyon modülü'dür.

Moser (2008) esnek boru üzerine etkiyen yük için iki sınır değer olduğunu belirtmiştir [1]. Buna göre, alt sınır Marston Yük Teorisi ile belirlenen hendek yükünün hendek genişliğine bölünüp boru dış çapı ile çarpılması ile elde edilir [11]. Üst sınır ise borunun üzerinde yer alan zemin prizmasının neden olduğu yüküdür; kısaca "prizma yükü"dür.

Yatak sabiti ( $K$ ) boru alt yarısında yataklamanın ne ölçüde kaliteli yapıldığını ifade etmektedir. Yatak sabiti yataklama açısının 180 derece olması durumunda 0.0843 değerini (maksimum dolgu desteği), 0 derece olması durumunda ise 0.11 değerini (dolgu desteği yok) almaktadır [12].

Gecikme faktörü ( $D_L$ ) ile, esnek bir boruda sabit düşey yük altında zamana bağlı şekil değiştirmeler dikkate alınmaktadır. Sabit düşey yük altındaki esnek bir boruda, yanlarda yer alan dolgunun sıkışması sonucunda zamana bağlı şekil değiştirmeler (sürekli azalan bir oranla) meydana gelebilir. Bunun yanında, HDPE borularda sabit düşey yük altında ve/veya ortam sıcaklığının artması ile kriplenen davranış gözlenmektedir [13]. Moser (2008) gecikme faktörünün –genellikle– Marston Yük Teorisi [11] ile belirlenen minimum yük değeri

kullanılması durumunda 1.5 ve prizma yükünün kullanılması durumunda ise 1.0 olarak alındığını ifade etmiştir [1].

Zemin reaksiyon modülü ( $E'$ ) gömülü esnek bir boruda yatay ekseninde meydana gelen şekil değiştirmeye karşı, dolgu zeminin (gömlekleme dolgusu) gösterdiği pasif direnç olarak ifade edilebilir. Howard (1977, 2006) bir çok arazi verisini derleyerek zemin reaksiyon modülü için tasarım değerleri sunmuştur [14] [15]. Zeminin cinsine ve Proktor sıkılık derecesine (veya relatif sıkılık derecesine) göre değişen değerlerin yer aldığı bu çalışmada, zemin reaksiyon modülünün dolgu kalınlığından etkilenmediği kabul edilmektedir. Hartley ve Duncan (1987) tüm zemin modüllerinin çevre basıncı arttıkça arttığını, dolayısı ile daha derinlerde yer alan zeminlerin daha rijit olacağını öne sürmüşlerdir [16]. Görüşlerini arazi deneyleri ve analitik çalışmalar ile destekleyen Hartley and Duncan (1987) ve ayrıca McGrath (1998a) zeminin bir boyutlu sıkışma modülünün ( $M_s$ ) zemin reaksiyon modülü yerine kullanılabileceğini savunmuştur ( $E' \approx M_s$ ) [17]. Bir boyutlu sıkışma modülü temsilci zemin numuneleri ile yapılan laboratuvar deneyleri ile elde edilen bir parametredir. Bu nedenle, bu parametrenin arazi koşullarını yansıtabilmesi için bir sabit ile çarpılmasını ( $E' = kM_s$ ) öneren görüşler bulunmaktadır ve elastik analizlere dayanarak bu sabitin 0.7 – 1.5 değerleri arasında yer aldığını belirtmişlerdir [18] [19] [20].

Esnek borunun gömülü bulunduğu yerel zemin koşullarına bağlı olarak, hendek genişliği/boru çapı oranı, hendek dolgusu rijitliğini etkilemektedir. Örneğin, yerel zeminin yumuşak ve hendeğin dar olması durumunda, hendek dolgusunun efektif rijitliği azalacaktır. Bu azalma, hendek dolgusu rijitliği ile yerel zemin rijitliği arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Aynı yerel zemin koşullarında daha geniş bir hendek kullanılması durumunda ise, hendek dolgusu rijitliği üzerinde yerel zeminin olumsuz etkisi daha az olacaktır. Bu nedenle, zemin reaksiyon modülü için bir tasarım değeri belirlenirken, hendek dolgusu rijitliği ile beraber yerel zemin rijitliği ve hendek genişliği/boru çapı oranı da dikkate alınmalıdır. Bu amaç için, Leonhardt (1979) tarafından geliştirilen zeta ( $\xi$ ) faktörü yaygın olarak kullanılmaktadır (7 Eşitliği) [21]. Zeta ( $\xi$ ) faktörü; hendek dolgusu rijitliği, yerel zemin rijitliği ve hendek genişliği/boru çapı oranının bir fonksiyonudur. Hendek dolgusu için efektif rijitlik değeri (kompozit  $E'$  [22]), hendek dolgusu rijitliği ve zeta ( $\xi$ ) faktörünün çarpılması ile elde edilmektedir (8 Eşitliği).

$$\xi = \frac{1.662 + 0.639(B/D - 1)}{(B/D - 1) + [1.662 - 0.361(B/D - 1)](E'_b/E'_n)} \quad (7)$$

$$E' = \xi E'_b \quad (8)$$

(7) ve (8) eşitliklerinde verilenler:  $B$  = Boru orta yüksekliği düzeyinde hendek genişliği,  $D$  = Boru çapı,  $E'_b$  = Hendek dolgusu rijitliğine  $E'_n$  = Yerel zemin rijitliğidir.

McGrath (1998b) gömülü termoplastik bir borunun düşey esnemesinin iki bileşeni olduğunu ifade etmiştir [23]: bunlardan biri (6) eşitliği ile hesaplanan uniform olmayan şekil değiştirme, diğeri ise zeminin hidrostatik etkisi altında meydana gelen uniform şekil değiştirme, yani çembersel kısalmadır. Bu yöntemde, Watkins ve Spangler (1958) yönteminden farklı olarak, zemin reaksiyon modülü yerine gömlekleme dolgusunun bir boyutlu sıkışma modülünün kullanılması ve prizma yükünün neden olduğu düşey gerilmenin

bir düşey kemerlenme faktörü ile azaltılması önerilmektedir. Uniform şekil değiştirmeyi veren bileşen Burns ve Richard (1964) tarafından türetilen elastik çözüm kullanılarak türetilmiştir [24]. Iowa Eşitliği'nin McGrath (1998b) tarafından geliştirilen şekli (9) eşitliği ile verilmiştir [23]:

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{P(DKF)}{EA/r + 0.57M_s} + \frac{D_L KP(DKF)}{EI/r^3 + 0.061M_s} \quad (9)$$

(9) eşitliğinde verilen: P = Prizma yükünün ( $\gamma xH$ ) neden olduğu düşey gerilme, H= dolgu kalınlığı,  $\gamma$ =dolgu birim hacim ağırlığı, A = Boru duvarının birim uzunlukta kesit alanı,  $M_s$  = Dolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü ve DKF = Düşey kemerlenme faktörüdür (boyutsuz). Düşey kemerlenme faktörü (10) eşitliği ile verilmiştir:

$$DKF = 0.76 - 0.71 \left( \frac{S_H - 1.17}{S_H + 2.92} \right) \quad (10)$$

(10) eşitliğinde verilen:  $S_H = rM_s/EA$  (Halka rijitliği parametresi)'dir (boyutsuz). McGrath (1998b) (9) eşitliğinde ikinci bileşenin birinci bileşenden çıkarılması ile borunun yatay esnemesinin elde edileceğini ifade etmiştir [23].

Masada (2000) (5) eşitliği üzerinde yalnızca sayısal derivasyonlar uygulayarak düşey ve yatay ekseninde meydana gelen boru esnemeleri arasında (11) eşitliği ile verilen ilişkiyi elde etmiştir [25].

$$\left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| \approx 1 + \frac{0,0094E'}{BR} \quad (11)$$

(11) eşitliğinde verilen: BR = Boru rijitliği =  $F/\Delta y$ , F = Paralel plaka yükleme deneyinde esnek boruda  $\Delta y$  çap değişimine neden olan düşey yüküdür [10]. Boru rijitliği  $BR=6.71EI/r^3$  formülü ile ampirik olarak da belirlenebilmektedir.

Sargand vd.'nin (2005) gömülü bir HDPE borudaki yatay esnemeyi öngören eşitliğindeki yaklaşım McGrath'm (1998b) yaklaşımı ile aynıdır [26]:

- Toplam yatay esnemenin uniform ve uniform olmayan olmak üzere iki bileşeni vardır.
- Yatay esnemenin uniform olmayan bileşeni (6) Eşitliği ile hesaplanmaktadır. Watkins ve Spangler (1958) yönteminden farklı olarak; zemin reaksiyon modülü yerine gömlekleme dolgusunun bir boyutlu sıkışma modülünün kullanılması ve prizma yükünün neden olduğu düşey gerilmenin bir düşey kemerlenme faktörü ile azaltılması önerilmektedir.
- Uniform bileşeni veren eşitlik Burns ve Richard (1964) tarafından türetilen eşitlik kullanılarak elde edilmiştir.

### Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi

Iowa Eşitliği'nin Sargand vd. (2005) tarafından geliştirilen şekli (12) Eşitliği ile verilmiştir[26]:

$$\frac{\Delta x}{D} (\%) = \frac{100D_L KP(DKF)}{EI/r^3 + 0.061M_s} - \frac{100P(DKF)}{M_s} \left( \frac{0.364S_H + 0.061S_B + 0.012S_H S_B}{2.571 + 0.572S_H + 0.163S_B + 0.039S_H S_B} \right) \quad (12)$$

(12) Eşitliğinde verilen:  $S_B = r^3 M_s / EI$  (Eğilme rijitliği parametresi) (boyutsuz) olup ve düşey kemerlenme faktörü (13) Eşitliği ile verilmiştir:

$$DKF = 1 - 0.714 \left( \frac{S_H - 0.7}{S_H + 1.75} \right) + 0.29 \left( \frac{27.31 - S_B}{16.81 + S_B} \right) \quad (13)$$

Bu yaklaşımda ayrıca termoplastik borunun zamana ve sıcaklığa bağlı rijitlik kaybı da göz önünde bulundurularak boru ham maddesinin elastisite modülünün düzeltilmesi önerilmektedir. HDPE borunun elastisite modülü için (14) Eşitliği kullanılarak düzeltme yapılabilir [26].

$$E^* (T, t) = 0,85(257000 - 2150,5T + 4,8T^2).t^{-0,08257} \quad (14)$$

(14) eşitliğinde verilen:  $E^* (T, t)$  = Boru malzemesinin zamana ve sıcaklığa bağlı olarak düzeltilmiş elastisite modülü (psi),  $T$  = Sıcaklık ( $F^\circ$ ),  $t$  = Zaman (dakika)

Gömülü HDPE borunun esneme davranışı; boru rijitliği ve zamana bağlı olarak rijitlik değişimi, boru üzerine etkileyen gerilme miktarı, gömlekleme dolgusu (geri dolgu) malzemesi ve rijitliği, yerel zemin özelliği gibi parametrelere bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu bakımdan HDPE boruların tasarımında kullanılan ampirik yaklaşımın veya yöntemin seçimi çok önem kazanmaktadır.

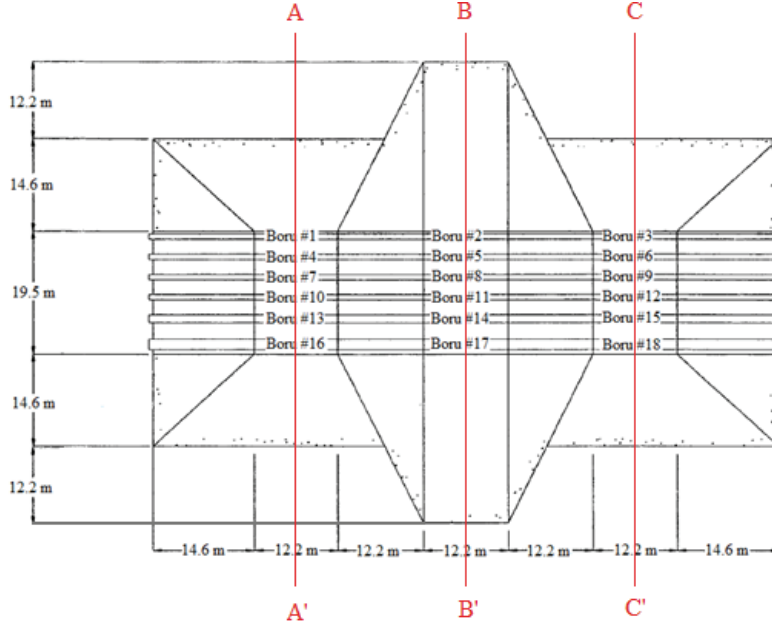
### 3. VAKA ANALİZİ

Bu çalışmada, Ohio Eyalet Üniversitesi'ne bağlı araştırma enstitüsü ORITE (The Ohio Research Institute for Transportation and the Environment) tarafından HDPE borular üzerinde gerçekleştirilen Derin Gömü Projesi (Deep Burial Project) [27] [28] kapsamında yürütülen arazi deneylerinden 11 adet HDPE borunun esneme davranışı değerlendirilmiştir. Bu proje kapsamında yerleştirilen HDPE borular, özellikle kalın dolgular altında kalacak drenaj için kullanılan boruların davranışını incelemek amaçlıdır, bu boruların içinden basınçlı su geçirilmemiştir. Şekil 3'te proje kapsamında gömülen boruların yerleşim planı gösterilmiştir. Bu projede boru yerel zemin içerisinde (düşük plastisiteli kil) açılan dar ve sığ hendeklere (hendekler boru dış çapının iki katı genişliğindedir) negatif projeksiyonlu olarak yerleştirilmiştir. Borular granüler malzemeden oluşan yatak tabakası (15.4-38 cm kalınlığında değişen) üzerine konumlandırılmıştır. Yatağın boru altında yer alan 1/3'lük bölümünde kompaksiyon işlemi uygulanmamış, geri kalan 1/3'lük kısımlarda ise kompaksiyon işlemi uygulanmıştır. Geri dolgu (GD) malzemesi olarak kullanılan kum ve kırmataş malzemelerin dane çapı dağılımlarına göre kırmataşın birleştirilmiş zemin



sınıflandırma sistemine göre kötü derecelenmiş çakıl (GP), kum zeminin ise kötü derecelenmiş kum (SP) olduğu belirtilmiştir. Kırmataş ve kum zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon deneylerinden sırası ile optimum su içeriği %7.63 ve %11.5, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar sırası ile  $22.0 \text{ kN/m}^3$  ve  $18.9 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Geri dolgu malzemesi 15-20 cm kalınlığında katmanlar halinde yerleştirilmiş ve boru üst kotunun 30cm yukarısına kadar sürdürülmüştür. Her bir tabakada titreşimli plaka kompaktör ile kompaksiyon işlemi uygulanmış ve dolgular %86, %90 ve %96 rölatif kompaksiyon (R.K) derecelerinde sıkıştırılmıştır. Hendeklerin geri dolgu işleminin ardından yerel zemin malzemesi aynı zamanda dolgu zemini olarak da kullanılarak 6.1 m ve 12.2 m kalınlıklarda dolgu inşa edilmiştir. Yerleştirilen toprak dolgu malzemesinin yoğunluğu ortalama  $20.4 \text{ kN/m}^3$  olup, prizma yükü gerilmesi (geostatik gerilme) 12.2m'lik dolgu için yaklaşık 250 kPa ve 6.1m'lik dolgu için ise yaklaşık 125 kPa'dır. Çalışma kapsamında incelenen boruların ve dolgu zeminlerin özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

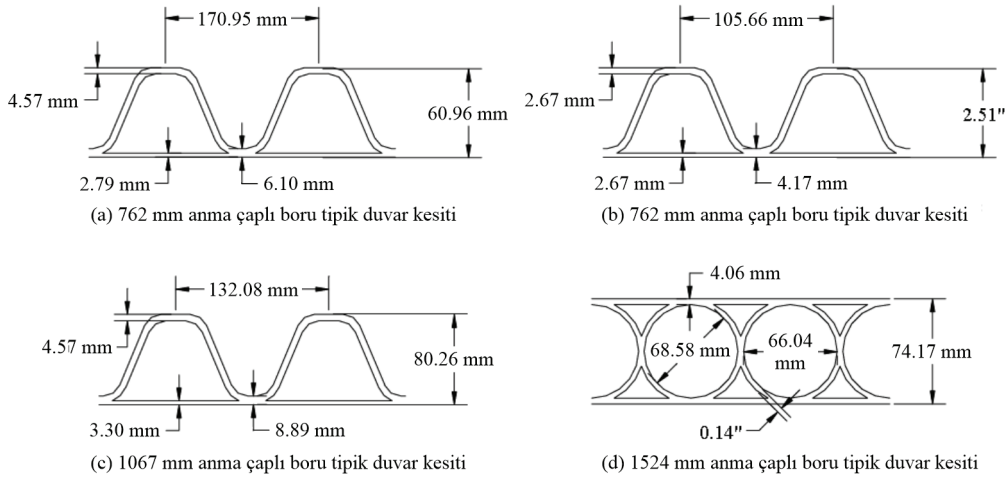
İncelenen boruların duvar en kesit profilleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Çizelge 1'de belirtilen  $A_p$  boru duvarının birim uzunlukta kesit alanı,  $I_p$  boru duvarının birim uzunlukta eylemsizlik momenti,  $EI/r^3$  boru rijitliğidir. Borularda düşey ve yatay ekseninde meydana gelen yer değiştirmeler ve çembersel kısalmaların ölçümü için boru içerisine lineer potansiyometreler yerleştirilmiştir. Boru kesitinde meydana gelen şekil değiştirmelerin belirlenmesi için ise portatif lazer profilometre kullanılmıştır. Boru tacında ve yan duvarda enine ve boyuna doğrultuda meydana gelen deformasyonların ölçümü için iç ve dış yüzeylere toplam 8 adet, boru tabanında ise iç ve dış yüzeylerde meydana gelen enine deformasyonların ölçümü için 2 adet elektrik rezistanslı deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Ayrıca dolgu yüklemesi ile boru tacında ve yan duvarında meydana gelen gerilme değişimleri de gerilme ölçerler ile ölçülmüştür.



Şekil 3 - Boruların yerleşim planı ve gömülme ortamında kesitler [28]

Çizelge 1 - Analizlerde İncelenen Boru ve Gömülme Ortamı Özellikleri [28]

Boru # No.	Boru Kesiti	Boru Çapı mm	GD Türü	R.K (%)	Dolgu Kalınlığı (m)	$A_p$ mm <sup>2</sup> /mm	$I_p$ mm <sup>4</sup> /mm	$EI/r^3$ N/mm <sup>2</sup>
7	C	762	Kum	96	6.1	9.58	4760	0.0334
8	C	762	Kum	96	12.2	9.58	4760	0.0334
9	C	762	Kırmataş	86	6.1	9.58	4760	0.0334
10	D	762	Kum	86	6.1	9.96	4703	0.0333
11	D	762	Kırmataş	96	12.2	9.96	4703	0.0333
12	D	762	Kırmataş	96	6.1	9.96	4703	0.0333
13	E	1067	Kum	90	6.1	10.90	8538	0.0222
14	E	1067	Kum	96	12.2	10.90	8538	0.0222
15	E	1067	Kırmataş	90	6.1	10.90	8538	0.0222
16	F	1524	Kırmataş	90	6.1	16.70	13978	0.0123
18	F	1524	Kum	96	6.1	16.70	13978	0.0123



Şekil 4 - Boru duvar profil en kesitleri [28]

Dolgu inşası süresince meydana gelen esnemeler McGrath (1998b) ve Sargand vd. (2005) eşitlikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır [23] [26]. 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16 ve 18 nolu deneylerde dolgu kalınlığı 6.1m, diğerlerinde ise dolgu kalınlığı 12.2m'dir. HDPE elastisite modülünün belirlenmesinde ortam sıcaklığı ve yükleme süresine bağlı değişim (14) eşitliği kullanılarak,  $E_p = 410 - 425$  MPa arasında hesaplanmıştır [26]. Bu çalışma kapsamında McGrath (1998b) ve Sargand vd. (2005) tarafından Geliştirilmiş Iowa Eşitlikleri ile yapılan

esneme hesaplarında HDPE elastisite modülü  $E_p = 425$  MPa olarak dikkate alınmış, prizma yükü teorisi esas alınarak yatak açısının  $90^0$  olduğu kabul edilmiş, yatak sabiti  $K = 0.096$  olarak alınmıştır. Zemin reaksiyon modülü için geri dolgu zeminlerin laboratuarda belirlenen bir boyutlu sıkışma modülü değerleri doğrudan kullanılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2 - Kum Zeminin Bir Boyutlu Sıkışma Modülü [28]

Geri Dolgu Türü	Düşey Gerilme (kPa)	Bir Boyutlu Sıkışma Modülü, Ms (kPa)		
		R.K. = %86	R.K. = %90	R.K. = %96
Kum	<34	8270	10480	13790
	34.5 – 68.9	9650	11380	14820
	69.0– 103.3	10340	11930	17580
	103.4 – 137.8	10690	12890	24130
Kırmataş	<34.5	7580	13100	16890
	34.5 – 68.9	12070	15860	17440
	69.0 – 103.3	17580	19370	20550
	103.4 – 137.8	21370	22340	25510
	137.9 – 172.3	25860	26820	28610
	172.4 – 206.8	27580	28340	33100
	206.9 – 241.3	29.30	31300	37230

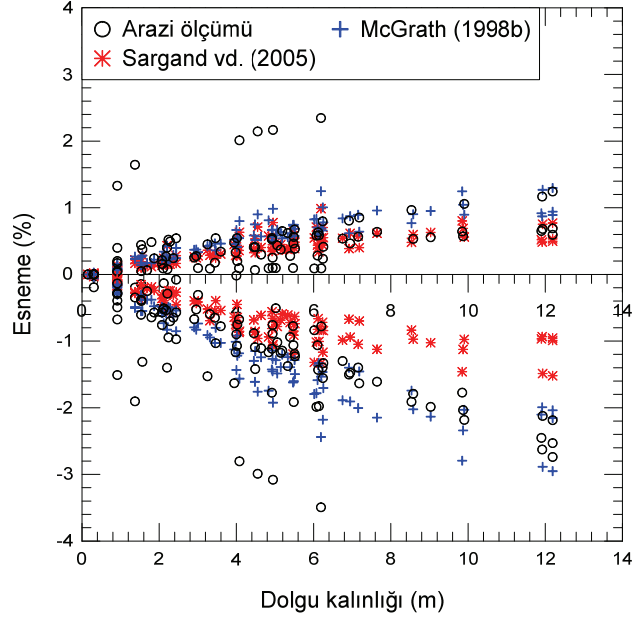
### 3.1. Yarı-Ampirik Yaklaşımlar ile Esneme Hesabı

Sargand vd, (2002) tarafından yürütülen proje kapsamında bütün deneylerde arazi dolgu inşa aşamaları ayrıntılı olarak sunulmuştur [28]. Bu inşa adımları dikkate alınarak (9) ve (12) eşitlikleri kullanılarak adım adım esnemeler hesaplanmıştır [29]. Arazide ölçülen ve hesaplanan esneme değerleri ile dolgu kalınlığı arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir.

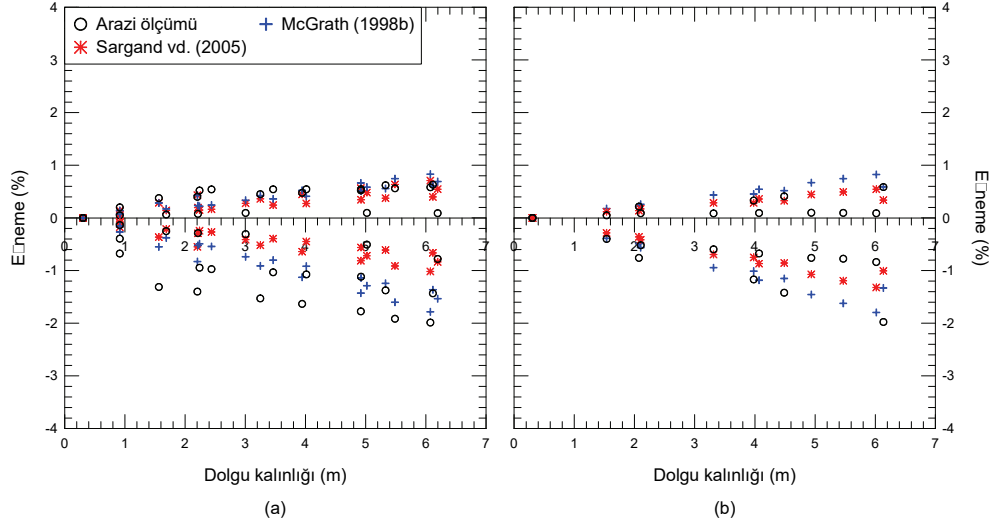
Şekil 5'te düşey eksen takımında pozitif değerler borunun yatay ekseninde meydana gelen esnemeleri, negatif değerler ise borunun düşey ekseninde meydana gelen esnemeleri göstermektedir. Dolgu kalınlığı arttıkça boruların esnemesi lineer olarak artış göstermiştir. Eşitliklerden hesaplanan değerler genellikle arazi ölçümleri arasında kalmıştır.

Şekil 6'da yüksek çember rijitliğine sahip (82.1–73.3 kPa) borularda (Boru #7 – 9 ve 12) ve düşük çember rijitliğine sahip (34.4 kPa) borularda (Boru #16 ve 18) meydana gelen esnemeler ile eşitliklerden hesaplanan değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Çember rijitliği yüksek olan borularda (Şekil 6a) hesaplanan düşey esnemelerin genellikle arazi ölçümlerinden daha küçük ve yatay esnemelerin ise genellikle arazi ölçümlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Çember rijitliği düşük olan borularda (Şekil 6b) ise düşey esnemeler arazi ölçümlerine daha yakın, yatay esnemeler ise arazi ölçümlerinden daha büyük tahmin edilmiştir. Görüldüğü gibi yarı-ampirik yaklaşımlar, rijitliği yüksek ve düşük HDPE boruların düşey esnemelerinin tahmininde yatay esnemelere göre daha başarılıdır.

Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi



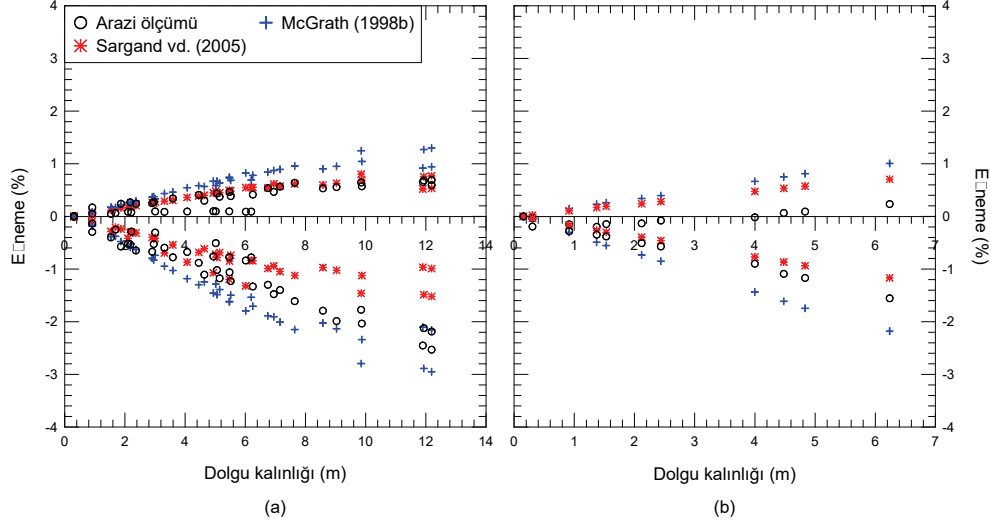
Şekil 5 - Dolgu inşası ile HDPE borularda ölçülen ve hesaplanan esnemeler



Şekil 6 - Boru çember rijitliğine göre arazide ölçülen ve hesaplanan esnemeler  
a) Yüksek çember rijitliği (82.1–73.3 kPa) b) Düşük çember rijitliği (34.4 kPa)

Arazi ölçümleri ile yarı-ampirik eşitliklerden hesaplanan esnemeler karşılaştırılırken geri dolgu malzemesinin türü ve R.K. derecesi de göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 7a'da geri

dolgu olarak yerleşim kalitesi yüksek (R.K.=%96) kum kullanılan deneylerde (Boru # 7, 8, 14 ve 18) ve Şekil 7b’de ise yerleşim kalitesi düşük (R.K.=%90) kum kullanılan deneyde (Boru #13) alınan ölçümler ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 7 - Kum dolgu yerleşim kalitesine göre ölçülen ve hesaplanan esnemeler  
a) Kum zemin R.K =%96 b) Kum zemin R.K =%90 [29]

Şekil 7a ve Şekil 7b’de arazide ölçülen düşey esneme değerleri genellikle, Sargand vd. (2005) eşitliği ile hesaplanan değerlerden büyük McGrath (1998b) eşitliği ile hesaplananlardan ise daha küçüktür. Ölçülen yatay esnemeler ise genellikle, her iki eşitlikle tahmin edilenlerden daha küçüktür.

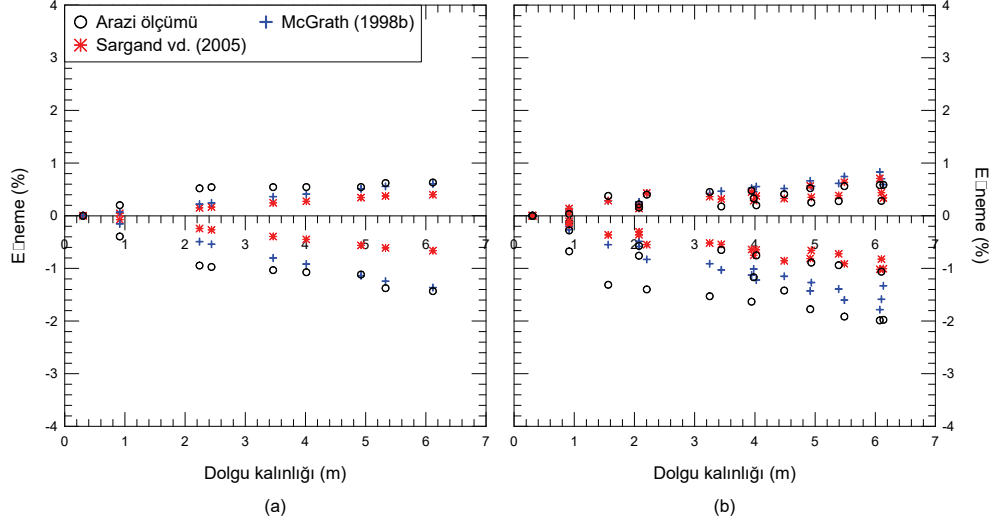
Şekil 8a’da geri dolgu olarak yerleşim kalitesi yüksek (R.K.=%96) kırma taş kullanılan deneyde (Boru #12) ve Şekil 8b’de ise yerleşim kalitesi düşük (R.K.=%86-90) kırma taş kullanılan deneylerde (Boru #9, 15 ve 16) ölçülen esnemelerin karşılaştırılması gösterilmiştir. Her iki şekil incelendiğinde kırmataş dolgu malzeme ile yapılan dolgu sonucu düşeyde boru esnemelerinin R.K.=%86-90’da daha büyük olduğu, yatay esnemelerin ise tam tersi olarak R.K.=%96’da daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 9’da kırmataş ve kum kullanılan deneylerin karşılaştırmaları ve Şekil 10’da ise dolgu kalınlığının 6.1m ve 12.2m olması durumları için değerlendirmeler verilmiştir.

Nihai dolgu kalınlığı altında, HDPE borularda ölçülen ve eşitliklerden hesaplanan esnemeler Çizelge 3’te sunulmuştur. Örneğin Boru #8 ve Boru #14’de nihai dolgu kalınlığı 12.1m ve kum dolgu zemin %96 R.K ile yerleştirilmiştir. Boru duvar profilleri bakımından da birbirlerine benzemekle birlikte Boru #8 çember rijitliği Boru #14’den daha yüksektir.

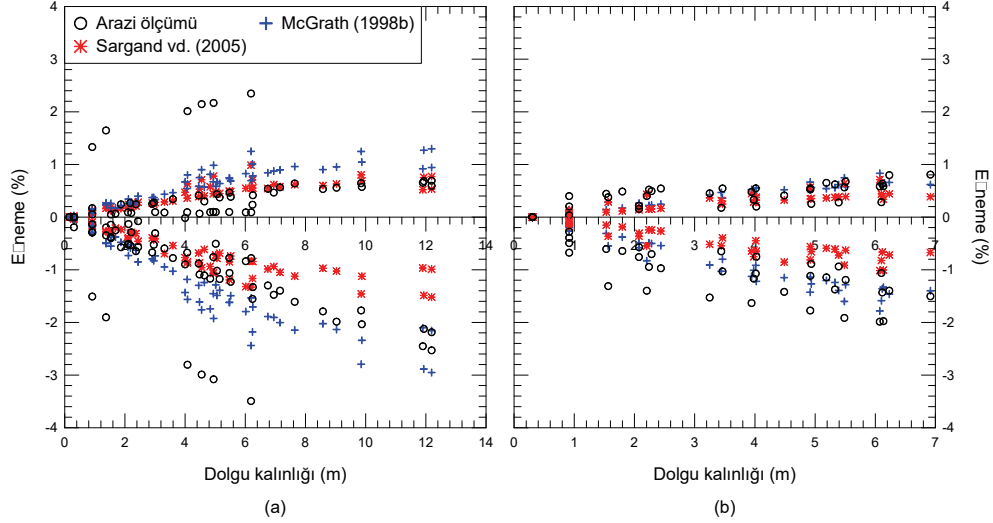
Boru #16 ve Boru #18’de boru profil yapısı (F), boru çapı (1524mm) ve nihai dolgu yüksekliği (6.1m) aynı, R.K değerleri ve dolgu malzemesi türü birbirinden farklıdır. Boru #16 kırmataş malzeme %90 R.K ile yerleştirilmiş, Boru #18 ise kum malzeme %96 R.K ile yerleştirilmiştir. R.K=%90 kırmataş malzeme kullanılarak yapılan dolgu altında ölçülen

## Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi

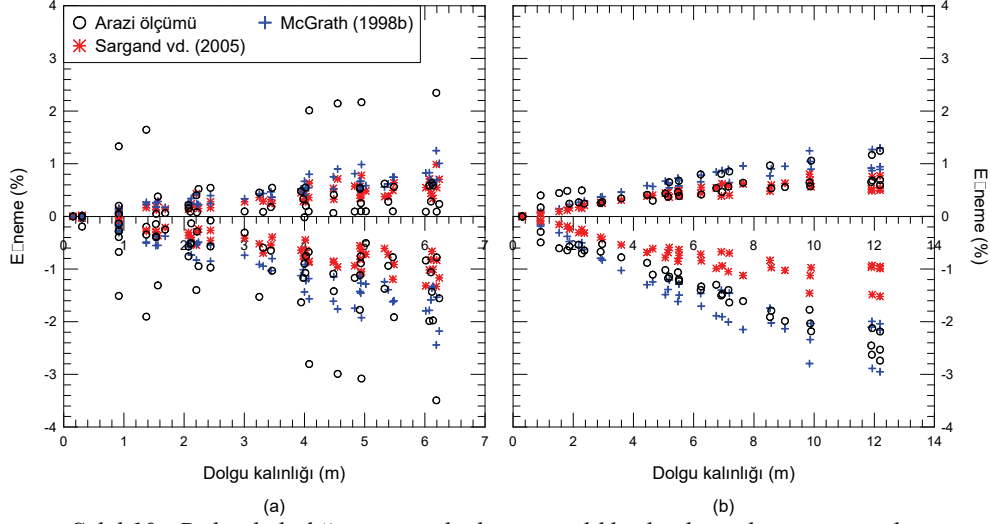
düşey esneme % -2.33 iken R.K=%96 kum malzeme kullanılarak yapılan dolgu altında ölçülen düşey esneme % -0.86'dır. Benzer şekilde yatay esneme değerleri de sırası ile %0.76 ve % 0.11 olarak ölçülmüştür. Diğer bütün koşullar aynı yalnızca dolgu malzemesi türü ve R.K değeri farklı olması durumunda ölçülen değerlerin birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür.



Şekil 8 - Kırmataş dolgu yerleşim kalitesine göre ölçülen ve hesaplanan esnemeler  
a) Kırmataş R.K=%96 b) Kırmataş R.K=%86-90 [29]



Şekil 9 - Dolgu malzemesi türüne göre ölçülen ve hesaplanan esnemeler  
a) Kum dolgu b) Kırmataş dolgu [29]



Şekil 10 - Dolgu kalınlığına göre ölçülen ve eşitliklerden hesaplanan esnemeler  
a) Dolgu kalınlığı 6.1 m b) Dolgu kalınlığı 12.2 m [29]

Çizelge 3 - Nihai dolgu kalınlığı altında ölçülen ve hesaplanan esnemeler [29]

Boru #No	Nihai dolgu kalınlığı (m)	$\Delta y/D$ (%)			$\Delta x/D$ (%)		
		Arazi ölçümü	McGrath 1998b	Sargand vd.2005	Arazi ölçümü	McGrath 1998b	Sargand vd.2005
7	6.1	-0.78	-1.53	-0.83	0.09	0.69	0.55
8	12.2	-2.53	-2.16	-0.99	0.60	0.94	0.53
9	6.1	-1.99	-1.78	-1.02	0.58	0.83	0.71
10	6.1	-3.49	-2.44	-1.33	2.35	1.25	0.99
11	12.2	-2.74	-2.04	-0.95	1.24	0.89	0.50
12	6.1	-1.43	-1.36	-0.66	0.63	0.61	0.40
13	6.1	-1.55	-2.18	-1.17	0.24	1.01	0.70
14	12.2	-2.19	-2.95	-1.52	0.69	1.30	0.77
15	6.1	-1.06	-1.59	-0.82	0.28	0.70	0.44
16	6.1	-1.98	-1.33	-1.01	0.59	0.59	0.34
18	6.1	-0.84	-1.79	-1.32	0.09	0.83	0.55

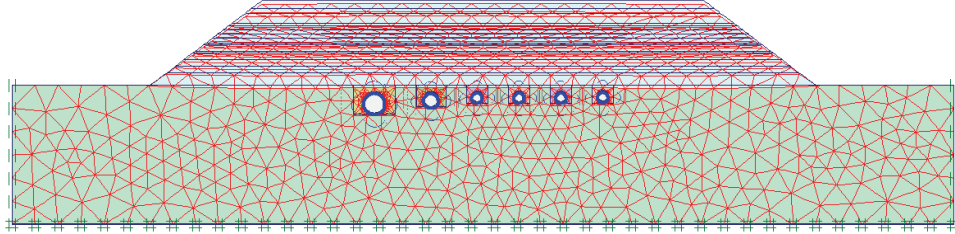
Arazide düşeyde ve yatayda sırası ile en büyük esnemeler %3.51 ve % 2.42'dir. Bu değerler esnek borular için CPPA (2006)'da [5] belirtilen %7.5 sınır değerinden oldukça düşüktür. İncelenen borular 6.1m'lik dolgu altında yaklaşık 125 kPa'lık düşey gerilme ve 12.2 m lik dolgu altında ise 250 kPa'lık düşey gerilmeye maruz kalmıştır ve bu gerilmeler altında boruda düşey ve yatay esnemeler lineer olarak artış göstermiştir. Çalışma kapsamında

incelenen bu borular oldukça yüksek düşey gerilmelere maruz kalmasına rağmen ölçülen ve hesaplanan esnemelerin %7.5 sınır esneme değerini geçmediği belirlenmiştir.

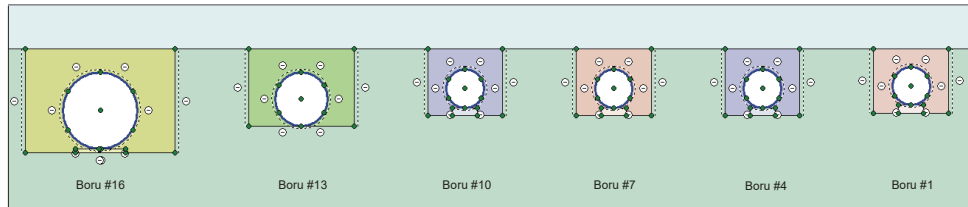
Genel olarak, McGrath (1998b) eşitliği ile hesaplanan düşey esneme değerlerinin arazi ölçümleri ile daha uyumlu olduğu, Sargand vd. (2005) eşitliği ile hesaplanan düşey esneme değerlerinin arazi ölçümlerinden daha küçük olduğu belirlenmiştir. Yatay esnemenin tahmininde ise her iki ampirik yaklaşımın da çok başarılı olmadığı görülmektedir. Bu durumun borunun düşey esnemesi ile birlikte meydana gelen pozitif kemerlenme sonucu, boru üzerine etkiyen gerilmenin yeniden bir dağılım göstermesi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Borunun düşey esnemesine bağlı olarak kemerlenme oranı değişmekte ve boru üzerinden gömlekleme dolgusuna aktarılan gerilme miktarı ve dolgunun rijitliğine bağlı olarak borunun yan duvarına pasif itki uygulamaktadır. Bunun sonucu olarak, boruda daha küçük yatay esnemeler meydana geldiği görülmektedir. Yarı-ampirik yaklaşımlar ile boru-zemin etkileşimi davranışının tam olarak iyi bir şekilde dikkate alınmadığı söylenebilir.

### 3.2. Sayısal Analizler ile Esneme Hesabı

Derin Gömü Projesi [28] kapsamında, kalın dolgular altında gömülü bulunan boruların davranışı iki boyutlu olarak sonlu elemanlar analiz yöntemine göre çözüm yapan, PLAXIS programı ile incelenmiştir [29]. Şekil 3'te gösterilen A-A', B-B' ve C-C' kesitlerinin iki boyutlu (2D) modeli oluşturularak sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 11'de A-A' kesitine ait modelin sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir. Diğer kesitler için de benzer modeller oluşturularak sayısal analizler yapılmıştır. Şekil 12'de ise A-A' kesitindeki hendeklerin yakın plan görünümü gösterilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilen kesitlerde en sağ tarafta görülen iki boru kesiti (Boru#4 ve Boru#1 PVC boru olduğundan) bu çalışma kapsamında kullanılmamıştır. A-A' ve C-C' kesitindeki dolgu yüksekliği 6.1m, B-B' kesitinde ise dolgu yüksekliği 12.2m dir.



Şekil 11 - A-A' kesiti sayısal modeli ve sonlu elemanlar ağı [29]



Şekil 12 - A-A' kesiti (hendek geometrilerinin kesit görünümü) [29]



Gömülme ortamını oluşturan zeminlerin davranışları “Hardening Soil Model” (Pekleşen Zemin Modeli-HS) kullanılarak analiz edilmiştir [30]. Oluşturulan modelde HDPE borular delme tünel (bored tunnel) seçeneği ile modellenmiştir. Geri dolgu malzemeleri ile doğal zemin arasına, ara yüzey eleman yerleştirilmiş ve azaltma faktörü için  $R_{int}=0.5$  ve  $R_{int} = 1.0$  (rijit) değerleri atanarak parametre değişiminin HDPE borularda meydana gelen esnemeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Azaltma faktörünün  $R_{int}=0.5$  olarak alındığı analizlerde HDPE borularda düşey ve yatay ekseninde meydana gelen esneme değişimlerinin %0.01 – %0.02 oranında olduğu görülmüş ve bu artışın göz ardı edilebilir boyutta olduğu düşünülerek geri dolgu malzemeleri ile doğal zeminin ara yüzeyinin rijit olduğu kabul edilmiştir. HDPE borular ile geri dolgu malzemeleri arasına da ara yüzey elemanları yerleştirilmiş ve azaltma faktörü  $R_{int}=0.67$  olarak alınmıştır [31].

Dolgu inşasına ilk aşamada 0.92m kalınlıkta dolgu serilerek başlanmış ve daha sonraki adımlarda 0.61m’lik tabakalar halinde serilerek yaklaşık 37 günde 12.2m’lik dolgu tamamlanmıştır [28]. Çizelge 4’te analizlerde kullanılan malzeme parametreleri gösterilmiştir. Sargand vd. (2002)’de geri dolgu ve dolgu malzemeleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinden belirlenen Sekant modülü ( $E_{50}$ ) değerleri HS modele göre (15) eşitliği kullanılarak referans Sekant modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri belirlenmiştir.  $E_{50}^{ref}$  referans çevre basıncına ( $p^{ref}$ ) göre belirlenen Young modülü ve m gerilme bağımlılığının miktarını belirleyen üst indistir. Genellikle  $p^{ref}=100$  kPa ve kohezyonsuz zeminler için  $m=0.5$  ve kohezyonlu zeminler için  $m=1$  ve  $E_{ur}^{ref} = 3 E_{50}^{ref}$  olarak alınabileceği belirtilmiştir [30]. (15) eşitliğinde  $\sigma_3'$  değeri üç eksenli deneyde uygulanan çevre basıncı olarak dikkate alınmıştır.

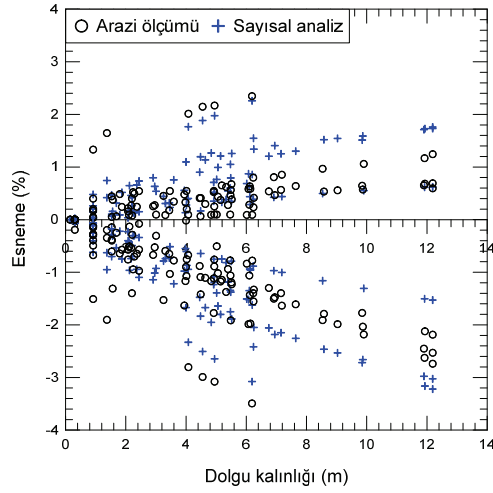
$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (15)$$

Çizelge 4 - Sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametreleri[28]

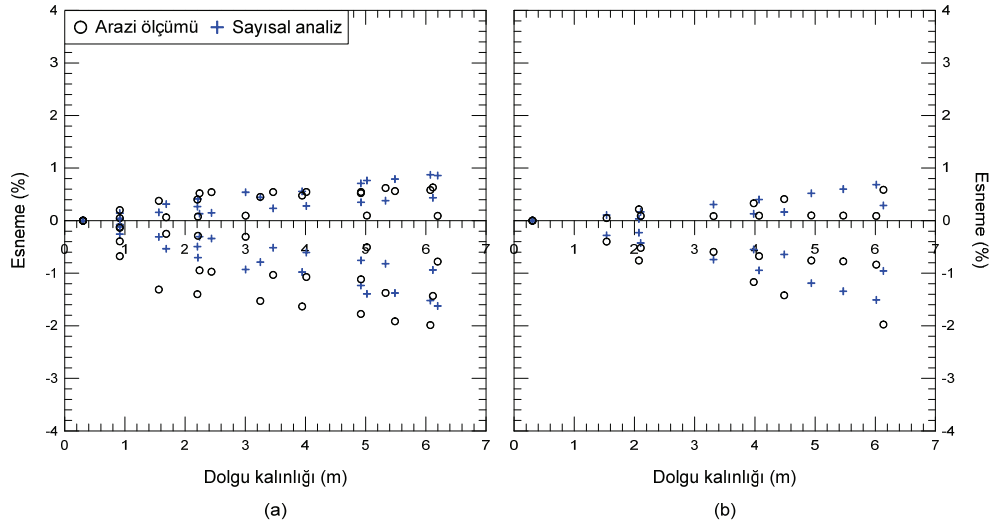
Zemin	R.K (%)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_{50}$ (kPa)	$E_{50}^{ref}$ (kPa)	c (kPa)	$\phi'$ (°)	m
Geri dolgu (Kum)	86	17.70-18.03	9700	9500	0.00	37	0.5
	90	18.90	20600	20300	0.00	41	0.5
	96	19.35-19.95	36000	35500	0.00	45	0.5
Geri dolgu (Kireçtaşı)	86	19.46-19.77	48500	48000	34.5	42	0.5
	90	20.28-20.71	70000	69500	55.2	43	0.5
	96	22.19-23.81	90000	89200	69.0	45	0.5
Kil dolgu	-	20.40	-	5210	34.5	15	1.0
Yerelzemin	-	20.40	-	5000	0.00	24	1.0

### Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi

Yapılan sayısal analizlerde Şekil 3'te gösterilen üç kesitte Çizelge 1'de özellikleri verilen HDPE borular için analiz sonuçları boru çember rijitliği, gömlekleme dolgusunun R.K değeri ve dolgu malzemesinin cinsine göre değerlendirilmiştir. Sayısal analizlerin sonuçlarına göre dolgu kalınlığına bağlı olarak elde edilen esneme değerleri sunulmuştur. Şekil 13'te bütün kesitlerdeki HDPE borularda ölçülen ve sayısal analizlerden hesaplanan esneme değerlerinin dolgu kalınlığına göre değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sayısal analiz sonuçları geniş bir aralık içinde değişim göstermekte, yaklaşık olarak arazi ölçümleri ise bu aralığın ortalarında yer almaktadır.

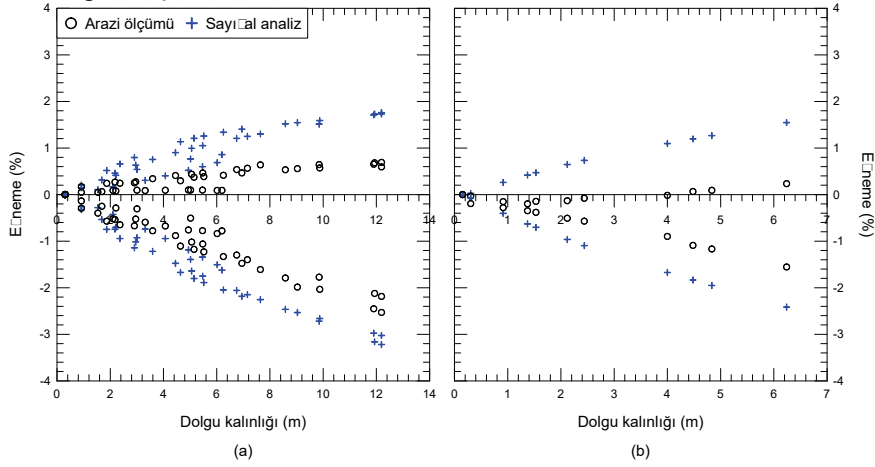


Şekil 13 - Dolgu inşası ile ölçülen ve sayısal analizlerden hesaplanan esnemeler [29]

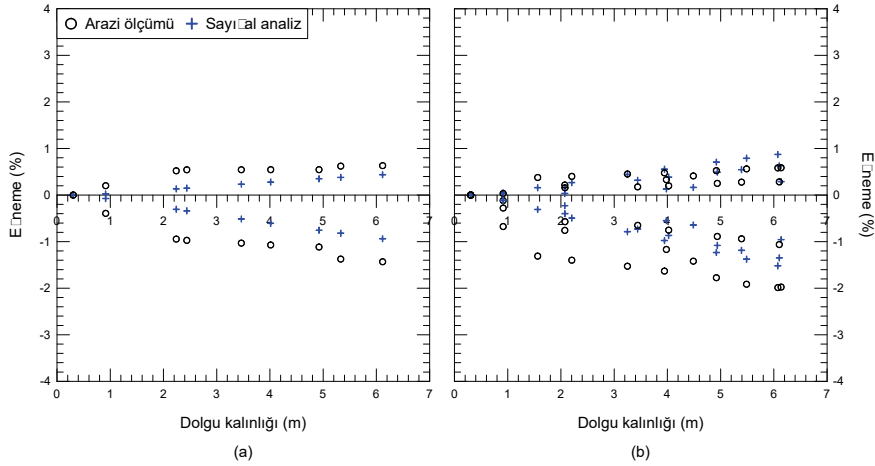


Şekil 14 - Boru çember rijitliğine göre arazide ölçülen ve sayısal analizlerden hesaplanan esnemeler a) Yüksek çember rijitliği (82.1–73.3 kPa) b) Düşük çember rijitliği (34.4 kPa)

Şekil 14’te boru çember rijitliğinin esnemelere olan etkisi değerlendirilmiştir. Çember rijitliğine göre hem yüksek hem de düşük rijitlik değerleri için yapılan karşılaştırmaların uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 15’de ise kum gömlekleme dolgusunun R.K. değerine göre karşılaştırma yapılmış ve arazi ölçümlerinin sayısal analizden hesaplanan değerlere göre oldukça küçük olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak sayısal analizlerde kum zemin için kullanılan malzeme parametrelerinin arazideki durumu tam olarak yansıtmadığı düşünülmektedir. Şekil 16’da kırmataş malzemenin R.K. değerine göre yapılan karşılaştırmalar sunulmuştur. Yerleşim kalitesi yüksek olan durum için (R.K. %96) sayısal analizlerde esnemeler küçük hesaplanmış, yerleşim kalitesi düşük olan durum için (R.K. %86-90) ise esnemeler daha uyumludur. Özellikle yatay esnemeler arazi ölçümleri ile daha uyumlu hesaplanmıştır.



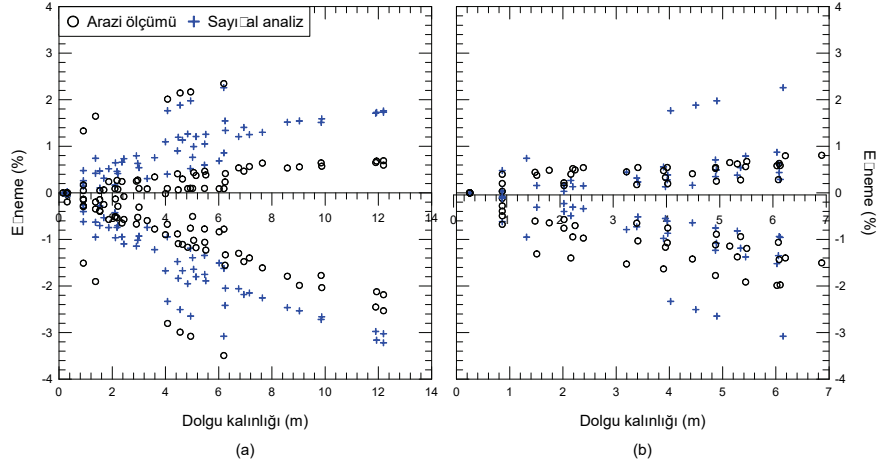
Şekil 15 - Kum dolgu yerleşim kalitesine göre ölçülen ve sayısal analizlerden hesaplanan esnemeler a)Kum zemin R.K. =%96 b) Kum zemin R.K. =%90 [29]



Şekil 16 - Kırmataş dolgu yerleşim kalitesine göre ölçülen ve sayısal analizlerden hesaplanan esnemeler a) Kırmataş R.K. =%96 b) Kırmataş R.K. =%86 - 90 [29]

### Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi

Şekil 17’de gömlekleme malzemesinin kum ve kırmataş olması durumları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi kum dolgu için elde edilen esneme değerleri oldukça büyük, kırmataş dolgu için hesaplanan değerler ise daha uyumludur. Sayısal analizlerde kum dolgu için kullanılan malzeme parametrelerinin araziyi temsil etmediği bu durum için tekrar söylenebilir.



Şekil 17 - Dolgu malzemesi türüne göre ölçülen ve sayısal analizlerden hesaplanan esnemeler a) Kum dolgu b) Kırmataş dolgu [29]

Çizelge 5 - Boru tacında ölçülen ve sayısal analizlerde hesaplanan gerilmeler [29]

Boru#No	Dolgu Kalınlığı (m)	$\sigma_y$ (kPa)		$\sigma_x$ (kPa)	
		Ölçüm	Analiz	Ölçüm	Analiz
7	6.1	53.8	76.2	44.8	127.9
8	12.2	97.2	214.1	112.4	245.6
9	6.1	51.7	61.5	65.8	123.8
10	6.1	64.8	111.4	64.8	112.0
11	12.2	81.4	144.9	126.2	281.7
12	6.1	55.2	47.5	59.3	122.5
13	6.1	58.6	87.5	77.9	129.3
14	12.2	100.0	208.1	82.7	255.2
15	6.1	55.2	43.3	63.4	126.9
16	6.1	59.3	51.1	100.7	116.4
18	6.1	41.4	74.0	37.9	138.7

Çizelge 5'te boru tacı üzerinde arazide ölçülen ve sayısal analizde hesaplanan düşey ( $\sigma_y$ ) ve yatay ( $\sigma_x$ ) gerilmeler sunulmuştur. Görüldüğü gibi hesaplanan düşey gerilmeler ölçülenler ile daha uyumlu, hesaplanan yatay gerilmeler ölçülenlerden çok farklıdır. 6.1m ve 12.2m'lik dolgular altında kalan borular üzerine sırasıyla 125 kPa ve 250 kPa'lık gerilme aktarılmaktadır.

Ölçüm sonuçları uygulanan gerilme altında boruda esneme meydana geldiğini ve pozitif kemerlenme mekanizması gelişerek düşey gerilmelerin azaldığını göstermektedir. Borunun düşey esnemesine bağlı olarak kemerlenme oranı değişmekte ve boru üzerinden yan gömlekleme dolgusuna aktarılan gerilme miktarı ve dolgunun rijitliğine bağlı olarak borunun yan duvarına pasif itki uygulanmaktadır. Böylece yükleme miktarı, boru rijitliği ve gömlekleme dolgusu rijitliğine bağlı olarak meydana gelen esneme ve pozitif kemerlenme sonucu, boru üzerine etkiyen düşey ve yatay gerilmeler yeniden bir dağılım göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Boruların tasarımında genellikle yarı-ampirik yaklaşımlar, arazi ve laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerden yararlanılabilmektedir. Gömülü boruların ve boruları çevreleyen zeminlerin davranışları zemin-yapı etkileşimi problemi olarak ele alındığından, HDPE boruların davranışı yükleme miktarı, boru rijitliği, gömlekleme dolgusu rijitliği ve yerel zemin koşullarından etkilenmektedir.

Bu çalışmada gömülü yüksek yoğunluklu polietilen borularda (HDPE) esneme davranışını etkileyen faktörlerden boru çember rijitliği, düşey gerilme, gömlekleme dolgusu relatif kompaksiyonu ve dolgu malzeme türü etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, Sargand vd, (2002) tarafından kalın dolgular altında kalan ve drenaj amaçlı kullanılan boruların davranışını incelemek için yürütülen projede 11 adet HDPE borudan alınan arazi ölçümleri kullanılmıştır [28]. Bütün borular benzer yerel zemin içinde gömüldüğünden, bu etki bütün borularda aynıdır. Ampirik hesaplamalarda, geliştirilmiş Iowa eşitliklerinden McGrath (1998b) ve Sargand vd. (2005) tarafından türetilen eşitlikler kullanılmıştır [23] [26]. Bu eşitliklerde eksenel şekil değişiminin yanı sıra çembersel kısılma da dikkate alınarak toplam şekil değişimleri tahmin edilmiştir. İki yaklaşımda da eksenel şekil değişimi hesabında zemin reaksiyon modülü olarak tek boyutlu sıkışma modülü kullanılmış, çembersel kısılma değerleri Burns & Richard (1964) Elastik Yöntemi kullanılarak geliştirilen eşitlikler ile hesaplamaya dahil edilmiştir. İki yaklaşımda da prizma yüküne göre hesaplanan düşey gerilme değerine bir düşey kemerlenme faktörü atanarak boru-zemin etkileşimi dikkate alınabilmektedir.

Yarı ampirik ve sayısal analizlerden hesaplanan esneme değerlerinin arazi ölçümlerine benzer şekilde, dolgu kalınlığı arttıkça (yük miktarı arttıkça) artış gösterdiği görülmüştür. Yapılan hesaplamalara göre gömülü HDPE boruların yük altındaki esnemesini çember rijitliği, gömlekleme dolgu türü, dolgunun rölatif kompaksiyon derecesi ve yükleme miktarının etkilediği tespit edilmiştir. Belirlenen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. Çember rijitliği düşük ve yüksek olan HDPE borular için yarı ampirik yaklaşımların düşey esnemeleri daha yakın, yatay esnemeleri ise daha büyük tahmin ettiği, sayısal analiz sonuçlarının ise yaklaşık olarak arazi ölçümlerinin ortasında yer aldığı görülmüştür.

## *Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi*

2. Kum zemin ile gömlekleme yapıldığında %96 RK'da Sargand vd. (2005) ile hesaplanan düşey esnemeler arazi ölçümlerine göre küçük, McGrath (1998) ile hesaplananlar ise büyüktür. Yatay esnemelerde ise McGrath (1998) ile arazi ölçümlerine daha yakın değerler hesaplanmıştır. %90 RK'da ise tam tersi bir durum meydana gelmiştir. Sayısal analizlerde ise her iki RK değeri için de esnemeler arazi ölçümlerinden daha büyüktür.
3. Kırmataş zemin ile gömlekleme yapıldığında %96 RK'da her iki ampirik eşitlik ile hesaplananlar arazi ölçümlerinden daha küçük, %86-90 RK'da ise daha uyumlu esnemeler hesaplanmıştır. Benzer davranış sayısal analiz sonuçlarında da görülmüştür.
4. Gömlekleme malzemesi olarak kum zemin kullanıldığında arazi ölçümlerinden daha küçük, kırmataş zemin kullanıldığında ise arazi ölçümlerine daha yakın esnemeler hesaplanmıştır.

Yapılan yarı-ampirik hesaplar ve sayısal analizlere göre gömülü HDPE boruların tasarımında esnemeler tahmin edilirken zemin-boru etkileşiminin dikkate alınması gerektiği açıktır. Hesaplanan esnemelerin arazide ölçülen değerlerle yaklaşık olarak uyumlu olduğu, çember rijitliği düşük ve yüksek olan HDPE borular için bu yaklaşımların kullanılabilmesi söylenebilir. Arazi ölçümleri ve hesaplanan esneme değerlerine göre söz konusu borular %5 - %7.5 tasarım limitine ulaşmamışlardır.

Esnek boruların tasarımı için ampirik yaklaşımlardan faydalanılmak istendiğinde, boru cinsi dikkate alınarak kullanılan ampirik eşitliklerden hesaplanan esneme değerlerinin bir aralık olarak dikkate alınması ve değerlendirmelerin bir alt ve bir üst sınıra göre yapılması önerilmektedir. Son yıllarda özellikle HDPE boruların tasarımında sayısal analizlerin de yaygın olarak kullanıldığı ve analizlerde boru-zemin etkileşimini dikkate alan bünye bağlantılarının kullanılması gerekliliği açıktır.

Bu çalışma kapsamında yapılan ampirik hesaplamalar ve sayısal analizlerin sonuçları Sargand vd, (2002)'de arazi deneyinden alınan ölçümlere göre yapılan değerlendirmeleri içermektedir. Özellikle kalın dolgular altında kalacak HDPE drenaj borularının tasarımında boru – zemin etkileşimi değerlendirilmelidir.

### **Semboller**

- A : birim uzunluk için boru kesit alanı  
B : boru orta yüksekliği düzeyinde hendek genişliği  
BR : boru rijitliği  
c : kohezyon  
D : boru çapı  
D<sub>L</sub> : gecikme faktörü (boyutsuz)  
DKF : düşey kemerlenme faktörü (boyutsuz)  
E'<sub>b</sub> : Hendek dolgusu rijitliği  
E'<sub>n</sub> : Yerel zemin rijitliği

$E_p$	: boru malzemesinin elastisite modülü
$E'$	: zemin reaksiyon modülü
$E^*$	: boru malzemesinin zamana ve sıcaklığa bağlı olarak düzeltilmiş elastisite modülü
$E_{50}$	: Sekant modülü
$E_{50}^{ref}$	: referans Sekant modülü
$F$	: paralel plaka yükleme deneyinde boruda $\Delta y$ çap değişimine neden olan düşey yük
HS	: Pekleşen Zemin Modeli
$I$	: birim uzunluktaki boru duvarı kesitinin eylemsizlik momenti
$k$	: sabit
$K$	: yatak sabiti
$m$	: gerilme bağımlılığının miktarını belirleyen üst indis
$M$	: birim uzunlukta eğilme momenti,
$M_s$	: bir boyutlu sıkışma modülü
$p^{ref}$	: referansçevre basıncı
$P$	: boru tacına etkiyen düşey gerilme
$P_{cr}$	: kritik burkulma basıncı
$P_i$	: iç basınç
$P_v$	: prizma yükü ve hareketli yük (toplam düşey yük)
$r$	: boru yarıçapı
$R_{int}$	: arayüzey azaltma katsayısı
$t$	: boru et kalınlığı
$S_H$	: Halka rijitliği parametresi (boyutsuz)
$S_B$	: Eğilme rijitliği parametresi (boyutsuz)
$T$	: sıcaklık
$t$	: zaman
$\Delta y$	: boruda düşey ekseninde meydana gelen boy kısalması
$\Delta x$	: boruda yatay ekseninde meydana gelen boy kısalması
$\Delta y/D$	: düşey esneme
$\Delta x/D$	: yatay esneme
$\varepsilon$	: Poisson çember deformasyonu

### *Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi*

$\epsilon_b$	: düşey ekseninde boru çapı değişimi nedeni ile oluşan eğilme deformasyonu
$\epsilon_c$	: boru duvarlarında düşey zemin basıncından kaynaklanan gerilme nedeni ile oluşan basınç deformasyonu
$\epsilon_p$	: boru duvarlarında iç basınçtan (vakum) kaynaklanan gerilme nedeni ile oluşan basınç deformasyonu
$\phi'$	: kayma mukavemeti açısı
$\gamma_n$	: zemin tabii birim hakim ağırlığı
$\sigma_c$	: düşey zemin basıncından kaynaklanan gerilme
$\sigma_y$	: düşey gerilme
$\sigma_x$	: yatay gerilme
$\sigma_3'$	: üç eksenli deneyde uygulanan çevre basıncı
$\nu$	: boru malzemesi Poisson oranı
$\zeta$	: zemin reaksiyon modülü azaltma faktörü

### **Kaynaklar**

- [1] Moser, A. P., Buried Pipe Design, McGraw – Hill, 2008.
- [2] Terzaghi, K., Stress Distribution in Dry and Saturated Sand Above a Yielding Trap-Door, Proceedings, 1<sup>st</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass., 35–39, 1936.
- [3] Rogers, C. D. F., Fleming, P. R. and Talby, R., Use of Visual Methods to Investigate Influence of Installation Procedure on Pipe-Soil Interaction, Tra.Res. Rec., 1541,1996.
- [4] Terzi, N. U., Gömülü Borulara Etkiyen Düşey ve Yatay Yüklerin Boru Stabilesine Olan Etkilerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Ana Bilim Dalı, 2007.
- [5] CPPA (Corrugated Polyethylene Pipe Association), Recommended Installation Practices For Corrugated Polyethylene Pipe and Fittings, CPPA Washington, DC. 25-26, 2006.
- [6] NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), Report 429: transportation research board national research council HDPE pipe:recommended material specifications and design requirements, National Academy Press, Washington, D.C., 1999.
- [7] Watkins, R. K., Szpak, E., and Allman, W. B., Structural design of polyethylene pipes Subjected to External Loads, Proc., ASTM Committee Meeting, Boston, 1973.
- [8] Spangler, M. G., The Structural Design of Flexible Pipe Culverts, Iowa Engineering Experiment Station, Bulletin 153, 1941.



- [9] Watkins, R. K. and Spangler, M. G., Some Characteristics of the Modulus of Passive Resistance of Soil: A Study of Similitude, Highway Research Board Proceedings, Vol. 37., pp. 576-583, 1958.
- [10] ASTM D 2412, Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, 2011.
- [11] Marston, A., Anderson, A.O., The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe, Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, Iowa, 1913.
- [12] Masada, T., Improved Design Approach for Buried Flexible Pipe, Proceedings to Pipeline 2009: Infrastructure's Hidden Assets, pp. 920-928, 2009.
- [13] Masada, T., Structural Performance of Profile-Wall Plastic Pipes under Relatively Shallow Soil Cover and Subjected to Large Surface Load, Ph.D. Thesis, Ohio Universitesi College of Engineering and Technology, 1996.
- [14] Howard, A. K., Modulus of Soil Reaction Values for Buried Flexible Pipe, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 103, pp. 33-43, 1977.
- [15] Howard, A. K., The Reclamation  $E'$  Table, 25 Years Later, Plastic Pipes Symposium XIII, 2006.
- [16] Hartley, J. D., Duncan, M.,  $E'$  and Its Variation with Depth, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 113, No. 5, 1987.
- [17] McGrath, T. J., Replacing  $E'$  with the Constrained Modulus in Buried Pipe Design, ASCE Pipelines in the Constructed Environment, pp. 28-40, 1998a.
- [18] Nielson, F. D., Modulus of Soil Reaction as Determined from Triaxial Shear Test, Highway Research Record No. 185, Washington, D.C: 80-90, 1987.
- [19] Stankowski, S. and Nielson, F. D., An Analytical-Experimental Study of Underground Structural Cylinder Systems, Engineering Experiment Station, New Mexico State University, Las Cruces, N. Mex., 1969.
- [20] Chambers, R. E., McGrath, T. J., Heger, F. J., Plastic Pipe for Subsurface Drainage of Transportation Facilities, NCHRP Report 225, Transportation Research Board, 1980.
- [21] Leonhardt, G., Die Erdlasten bei Überschütteten Durchlässen, Die Bautechnik, Vol. 56. No. 11, 1979.
- [22] Howard, A. K., Composite  $E'$  (Modulus of Soil Reaction), Proceedings of Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets, pp. 960-969, 2009.
- [23] McGrath, T. J., Design Method for Flexible Pipe, A Report to the AASHTO Flexible Culvert Liaison Committee, Simpson Gumpertz & Heger Inc., 1998b.
- [24] Burns J, Q. ve Richard R. M., Attenuation of stresses for buried cylinders, In Proc., Symposium on Soil-Structure Interaction, Tucson (AZ): University of Arizona Engineering Research Laboratory, 1964.

*Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi*

- [25] Masada, T., Modified Iowa Formula for Vertical Deflection of Buried Flexible Pipe, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 440-447, 2000.
- [26] Sargand, S., Masada, T., Gruver, D., Field Performance and Analysis of Large – Diameter High – Density Polyethylene Pipe under Deep Soil Fill”, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 131, No. 1, pp. 39-51, 2005.
- [27] Sargand, S. M. ve Masada, T., Long Term Monitoring of Pipe Under Deep Cover, Report No: FHWA-OH-2007/15, 2007.
- [28] Sargand, S., Masada, T., Hazen, G., Field Verification of Structural Performance of Thermoplastic Pipe under Deep Backfill Conditions, FHWA/OH – 2002/023 Final Report to Ohio Dept. of Transportation and Federal Highway Administration, 2002.
- [29] Kınay, E., Gömülü Esnek Boru Davranışının İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde Hazırlanan Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2010.
- [30] PLAXIS, Finite Element Code for Soil and Rock Analysis, Version 2012 Manual. A.A. Balkema Publishers. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2012.
- [31] Massicotte, D., Finite Element Calculations of Stresses and Deformations in Buried Flexible Pipes, MSc. Thesis, Ottawa University, Dept. of Civil Engineering, 2000.