

ŞEVLİ ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARIN YAPISAL DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF PIPES BURIED IN SLOPED GROUND

Hivren NAİBOĞLU¹, Selçuk BİLDİK², Mehmet Salih KESKİN³

ÖZET

Gömülü boru sistemleri, inşaat mühendisliğinin zemin yapı etkileşimini içeren en önemli altyapı unsurlarından biridir. Su, gaz, kanalizasyon ve daha birçok sistemin taşınmasında oldukça önemli bir bölümü oluştururlar. Gömülü yapılar olarak çevrelerinde bulunan zeminle olan etkileşimleri, tepkilerinin anlaşılmasında son derece önemlidir. Bu sebeple, borunun muhtemel yüklerle karşı duyarlılığının doğru bir şekilde belirlenmesi, altyapı sisteminin korunması bakımından önemlidir. Bu çalışmada, şevli zemin içerisine gömülü bir borunun, şev tepesine olan mesafesinin ve gömülme derinliğinin, farklı şev açılarında, boruda oluşan deplasmana, eksenel kuvvete ve eğilme momentine etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizler iki boyutlu PLAXIS sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, şevli zemin içerisine gömülü boruda oluşan deplasman, eksenel kuvvet ve eğilme momenti değerlerinin, gömülme derinliği ve şev açısının artmasına bağlı olarak azaldığı, yükün şev tepesine olan mesafesinin artmasıyla ise arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: şev, yüzeysel temel, gömülü boru, sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

Buried pipe systems are one of the most important infrastructure elements of civil engineering that involve soil-structure interaction. They form a very important part in the transportation of water, gas, sewage and many other systems. As buried structures, their interaction with the surrounding soil is extremely important in understanding their reactions. For this reason, accurately determining the sensitivity of the pipe to possible loads is important for protecting the infrastructure system. In this study, the effects of the distance from the top of the slope and the depth of burial of a pipe buried in a sloped soil on the displacement, axial force and bending moment in the pipe at different slope angles were analyzed numerically. Analyzes were carried out using the two-dimensional PLAXIS finite element program. According to the results obtained at the end of the study, it was observed that the displacement, axial force and bending moment values in the pipe buried in the sloped soil decreased as the depth of burial and slope angle increased, and increased as the distance of the load from the top of the slope increased.

Keywords: slope, shallow footing, buried pipe, finite element method

¹ Öğr. Gör., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, hivrennaiboglu@yyu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Nişantaşı Üniversitesi, selcuk.bildik@nisantasi.edu.tr

³ Prof. Dr., Dicle Üniversitesi, mskeskin@dicle.edu.tr

1. GİRİŞ

Su, gaz, kanalizasyon ve daha birçok sistemin taşınmasında oldukça önemli bir bölümü oluşturan gömülü boru sistemleri, inşaat mühendisliğinin zemin yapı etkileşimini içeren en önemli altyapı unsurlarından biridir. Boruların en iyi şekilde tasarımı, zemin örtüsünün ve uygulanan yüzey basıncının yapısal tepkileri üzerindeki etkilerine ilave olarak, önemli ölçüde zemin-boru etkileşiminin irdelenmesine bağlıdır (Mooser and Folkman, 2008). Gömülü boruların malzeme özellikleri, yük altındaki deformasyon davranışları, tasarım ve boyutlandırılması, ile ilgili literatürde bir çok çalışma bulunmaktadır. Marston ve Anderson (1913) tarafından, zemin-boru etkileşimini irdellemek için gerçekleştirilen çalışmalar, gömülü borular konusundaki ilk çalışmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Konu ile ilgili sonraki yıllarda gerçekleştirilen teorik çalışmalar mevcuttur (Watkins ve Spangler, 1958; Greenwood ve Lang, 1990; McGrath, 1998; Sargand vd. 2005) Bildik ve Laman (2015), kumlu zeminlerde gömülü boruların konumunun şerit temelin taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmadaki değişkenler arasında zeminin sıklığı, borunun gömme derinliği ve borunun temele olan yatay mesafesi bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, borunun gömme derinliği ve borunun temele olan yatay mesafesi arttırıldığında taşıma kapasitelerinde önemli bir artış oluşmaktadır. Deney sonuçlarına dayanarak, boruların konumu ve zemin sıklığının şerit temelin taşıma kapasitesini etkileyen ana parametreler olduğu belirlenmiştir. Allard ve El-Naggar (2016), hendek geometrisinin, borunun gömme derinliğinin ve zemin sıklığının sert dairesel boruların yapısal tepkisi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, gömme derinliğindeki artış, mevcut ve dolgu zemin malzemelerinin sıklığının boruda oluşan deplasmanlarda, eğilme momentlerinde ve eksenel ve kayma kuvvetlerinde azalmaya yol açtığını belirtmişlerdir. Talesnick ve Frydman (2018), gömülü yüksek yoğunluklu polietilen boru etrafındaki meydana gelen gerilmeleri ve maruz kaldığı trafik yüküne yapısal tepkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada yol inşaatı esnasındaki üstte kalan zeminin sıkışması ve ağır inşaat ekipmanının çalışmalarından dolayı boruda önemli derecede deplasmanlar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bildik ve Laman (2019), gömme derinliğinin ve üzerindeki temelin konumunun gömülü bir borunun yapısal tepkisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, gömülü boruda gelişen gerilmelerin, boru ve üstteki yüzey temelleri arasındaki dikey ve yatay mesafeler arttıkça büyük ölçüde azaldığını göstermektedir. Zemin-boru etkileşimi üzerine literatürde yapılmış bir çok çalışma mevcuttur. (Cheuk vd.2008; Talesnick vd., 2011; Alzabeebe vd., 2018).

Literatürde mevcut çalışmaların büyük bir bölümü, düz zemin yüzeyi altına gömülü boruların davranışı ile ilgilidir. Şevli zemine gömülü borular konusunda yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Şevli bir arazide zemin-boru etkileşiminin irdelenmesi, gömülü boruların yapısal bütünlüğünü korumak için oldukça önemlidir. Şevli zemin ortamlarında gömülü olan borular, düz yüzeyli zeminlere gömülü borulara göre daha fazla etkiye maruz kalmaktadır. Düz zeminle karşılaştırıldığında, şevli zeminlere gömülü olan boruların yırtılmasının meydana gelme ihtimalinin daha fazla olduğu gösterilmiştir (Sweeney vd., 2005). Gömülü bir boru etrafındaki zeminin hareketi, boru deplasman ve deformasyonlarının temel nedeni olarak tanımlanmıştır. Buna göre, şevli zemine gömülü boruların etrafındaki yer hareketlerinin, 2004'den 2013'e kadar olan dönemde Avrupa gaz boru hattı kazalarının yaklaşık %13'üne neden olduğu gösterilmiştir (Wu vd., 2017). Khan ve Shukla (2020), şevli zemine gömülü bir boru hattı üzerinde yer alan yüzey temelin, yük-oturma davranışına ilişkin deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, gömülü borunun yüzey temelin oturması ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini açıklamak için analitik olarak hesaplanan zemin-boru etkileşimi sonuçlarından yararlanılmıştır.

Gömülü boruların güvenli tasarımının ve kurulumunun sağlanması için zemin-boru etkileşiminin gerçekçi olarak ortaya konması gerekmektedir. Düz zemin altına gömülü boruların güvenliği genellikle uygulanan basıncın, zemin örtüsünün ve kurulum tekniklerinin anlaşılmasına bağlıdır. Bununla birlikte, şevli zeminlere gömülü olan borular, özellikle şevli yüzeye yakın olmaları nedeniyle ek zorluklarla karşı karşıyadır. Şevli zeminlere gömülü boruların davranışının belirlenmesi ile ilgili çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, şevli zemin içerisine gömülü bir borunun, şev tepesine olan mesafesinin ve gömülme derinliğinin, farklı şev açılarında, boruda oluşan deplasmana, eksenel kuvvete ve eğilme momentine etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir.

2. SAYISAL MODEL

Bu çalışmada, zemin boru etkileşimi ile uygulanan yüzey basıncının boru üzerinde meydana getirdiği etkileri incelemek için sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan PLAXIS-2D bilgisayar programı kullanılmıştır. PLAXIS-

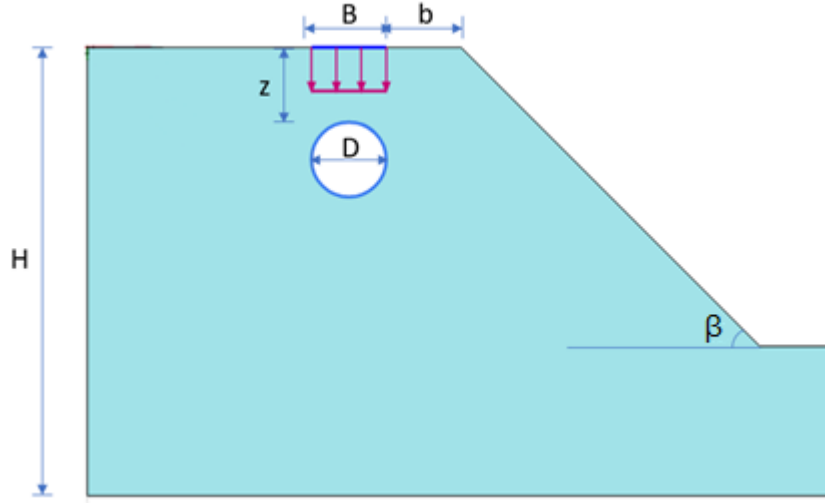
2D programı ile geometrik modelde sınır etkisinin oluşmaması için gerekli analizler yapılmış ve model oluşturulmuştur. Model, şevli dolgu zemin, yüzeysel şerit temel ve gömülü borudan oluşmaktadır. Yüzeysel temel ve gömülü boru plate elemanlarla modellenmiştir. Sayısal modelde, şev açıları $\beta = 30^\circ$, 37.5° ve 45° olarak seçilmiştir. Analizlerde, Keskin ve Laman (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kullanılan ve deneysel olarak belirlenmiş olan kum zemin parametreleri kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan kum zemin parametreleri Tablo 1’de görülmektedir. Analizlerde, kum zeminin doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için, programda mevcut Hardening Soil Model (HSM) seçilmiştir. Bu zemin modeli, kum zemin davranışını daha iyi tahmin etmek için üç farklı elastik modül değerinden yararlanan hiperbolik bir zemin modelidir. Boru malzemesi olarak polietilen (PE) boru dikkate alınmıştır. PLAXIS, bir boruyu simüle etmek için Mindlin teorisine dayanan kavisli kiriş elemanlarını kullanır. Kiriş elemanlarına ait giriş parametreleri; normal rijitlik, eğilme rijitliği, eşdeğer kalınlık, ağırlık ve Poisson oranı’dır. Analizlerde kullanılan boru elemanın malzeme özellikleri Tablo 2’de görülmektedir. Model şerit temel, $EI=163 \text{ kNm}^2/\text{m}$ eğilme rijitliği ve $EA=3.4 \times 10^5 \text{ kN/m}$ normal rijitliği olan elastik kiriş elemanları olarak modellenmiştir. Analizler, deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken “mesh” analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçların etkilenmediği sonlu elemanlar ağı seçilmiştir. Analizlerde kullanılan sonlu eleman modeli Şekil 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri (Keskin ve Laman, 2013)

Parametre	Birim	Değer
Birim hacim ağırlık, γ	kN/m^3	17.5
Üç eksenli yükleme rijitliği, E_{50}^{ref}	kN/m^2	40000
Ödometre yükleme rijitliği, E_{oed}	kN/m^2	40000
Üç eksenli boşaltma tekrar yükleme rijitliği, E_{ur}	kN/m^2	120000
Kohezyon, c	kN/m^2	0.10
İçsel sürtünme açısı, ϕ	(°)	43.5
Dilatasyon açısı, ψ	(°)	13.5
Poisson oranı, ν	-	0.25
Toprak basınç katsayısı, K_0	-	0.319

Tablo 2. Analizlerde kullanılan polietilen borunun mekanik özellikleri

Parametre	Birim	Değer
Birim hacim ağırlık, γ	kN/m^3	19.0
Eksenel rijitlik, EA	kN/m	10^5
Eğilme rijitliği, EI	$\text{kN/m}^2/\text{m}$	8333
Eşdeğer kalınlık, d_{eq}	m	0.10
Poisson oranı, ν	-	0.45



Şekil 1. Analizlerde kullanılan model geometrisi

Şekil 1'de H = model yüksekliği, β = şev açısı, D = boru çapı, B = temel genişliği, b = temelin şev tepesine olan uzaklığı, z = boru gömülme derinliği değerlerini göstermektedir.

Çalışmada, şevli zemine gömülü borunun davranışının incelenmesi amacıyla 3 grup analiz gerçekleştirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Analiz detayları

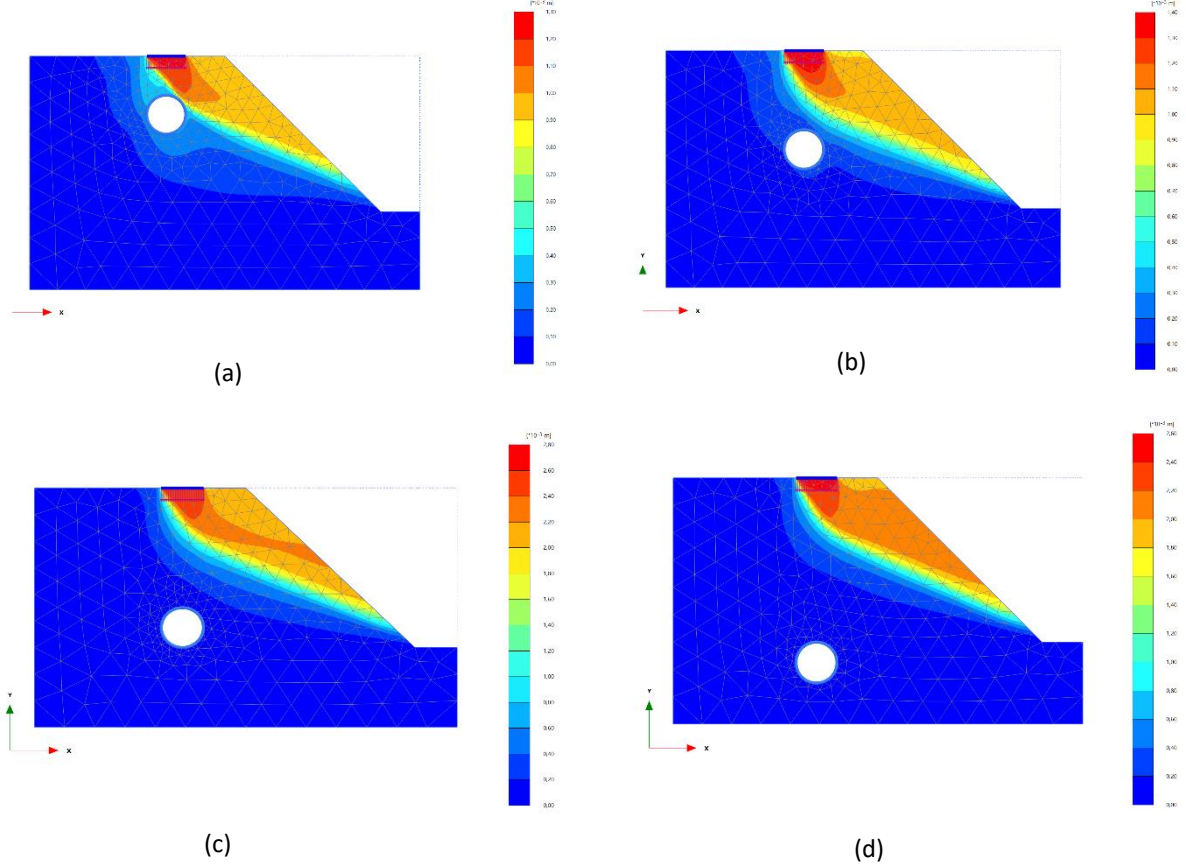
Grup	Sabit parametreler	Değişken parametreler
I	$\beta=45^\circ$, $B=0.1m$, $b=1.0B$, $D=0.1m$	$z=1.0B - 2.0B - 3.0B - 4.0B$
II	$\beta=45^\circ$, $B=0.1m$, $D=0.1m$, $z=2.0B$	$b=0B - 1.0B - 2.0B$
III	$B=0.1m$, $b=1.0B$, $D=0.1m$, $z=2.0B$	$\beta=30^\circ - 37.5^\circ - 45^\circ$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

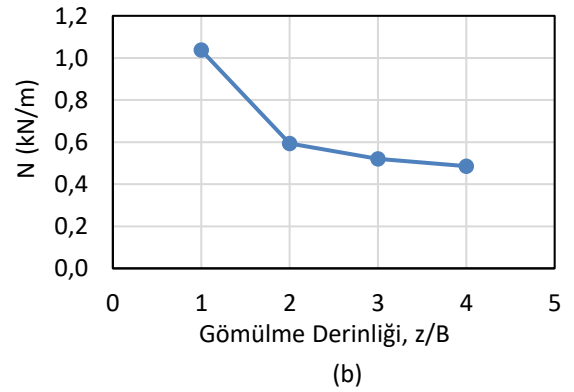
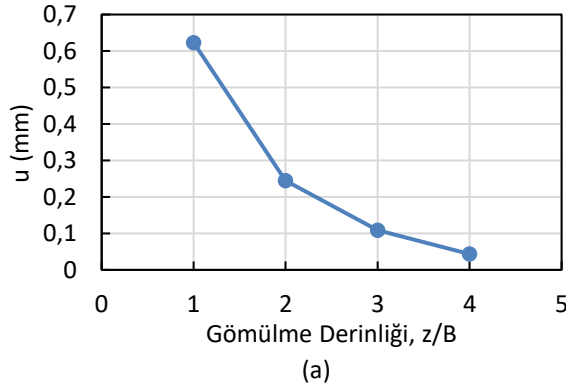
Analizlerde, şevli zemine gömülü borunun gömülme derinliği (z), uygulanan yüzey basıncının şev tepesine olan uzaklığı (b) ve şevin eğim açısının (β), borunun yapısal davranışına etkisi incelenmiştir. Etkiler, boruda meydana gelen deplasman (u), boruda oluşan aksel kuvvet (N) ve eğilme momenti (M) açısından analiz edilmiştir.

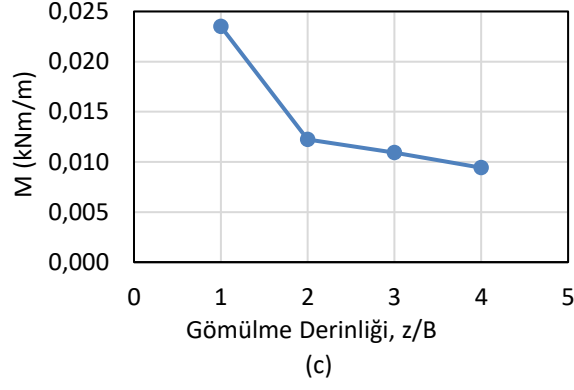
3.1. Gömülme Derinliğinin Etkisi

Bu bölümde, şevli zemine gömülü borunun yapısal davranışına, boru gömülme derinliğinin etkisi analiz edilmiştir. Analizlerde, şev açısı $\beta=45^\circ$, temelin şev tepesine mesafesi $b=1.0B$, temel genişliği $B=0.10m$ ve boru çapı $D=0.10m$ olarak sabit tutulmuştur. Borunun gömülme derinliği, $z=1.0B$, $2.0B$, $3.0B$ ve $4.0B$ olarak seçilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen toplam deplasman dağılımları Şekil 2'de görülmektedir. Gömülme derinliği arttıkça, boruda meydana gelen deplasman, aksel kuvvet ve eğilme momenti değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu durum, borunun şevin göçme düzleminden uzaklaşması ve yüzeyde uygulanan yükün boru üzerindeki etkisinin azalması ile açıklanabilir. Sonuç olarak, Şekil 3'de görüldüğü gibi, gömülme derinliği arttıkça u , N ve M değerleri azalmaktadır.



Şekil 2. I. Grup analizlerden elde edilen deplasman dağılımları (a) $z=1B$, (b) $z=2B$, (c) $z=3B$, (d) $z=4B$

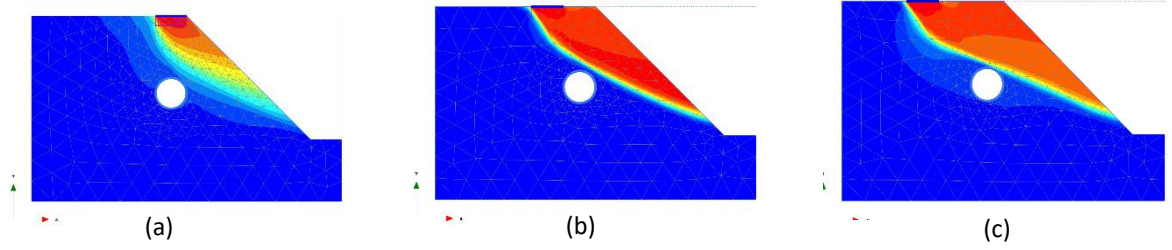




Şekil 3. I. Grup analiz sonuçları (a) z/B – u (b) z/B – N (c) z/B – M

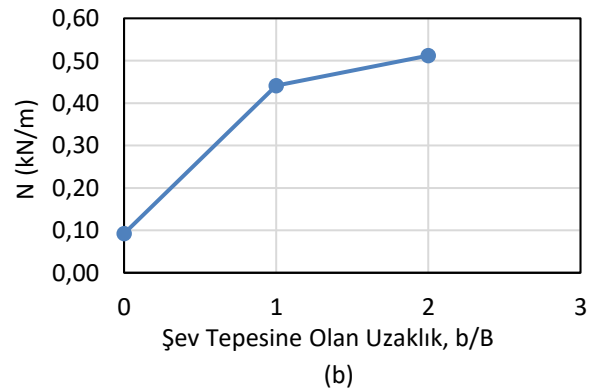
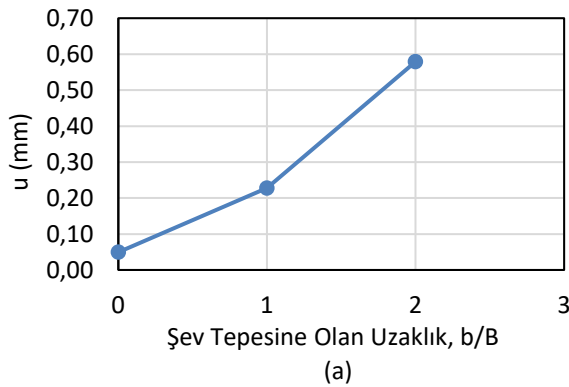
3.2. Yükün Şev Tepesine Olan Uzaklığının Etkisi

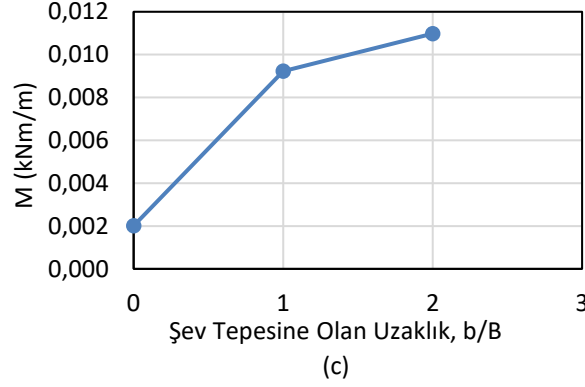
Yükün şev tepesine olan uzaklığının gömülü borunun davranışına etkisinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, şerit temelin şev tepesine olan uzaklığı $b=0B - 1B - 2B$ şeklinde seçilmiştir. Boru gömülme derinliği $z=2B$, şev açısı $\beta=45^\circ$, temel genişliği $B=0.10m$ ve boru çapı $D=0.10m$ olarak sabit tutulmuştur. Analizler sonucunda elde edilen deplasman dağılımları Şekil 4’de görülmektedir. Gömülme derinliğinin $2B$ olduğu durumda boruda deplasman (u), aksenal kuvvet (N) ve eğilme momenti (M) değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir (Şekil 5).



Şekil 4. II. Grup analizlerden elde edilen deplasman dağılımları (a) $b=0B$, (b) $b=1B$, (c) $b=2B$

Yükün şev tepesine olan uzaklığının artmasıyla, gömülü boruda elde edilen deplasman, aksenal kuvvet ve eğilme momenti değerlerinin artmasının, şerit temelin altında oluşan gerilmelerin daha geniş bir alana yayılması ve dolayısıyla boru üzerindeki etkisinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4).

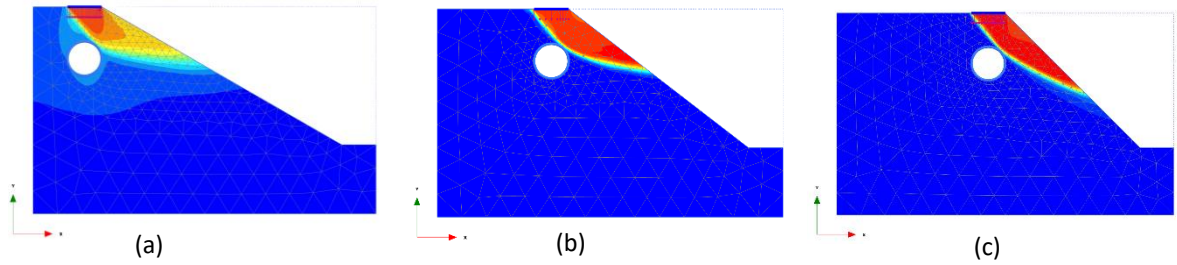




Şekil 5. II. Grup analiz sonuçları (a) b/B – u (b) b/B – N (c) b/B – M

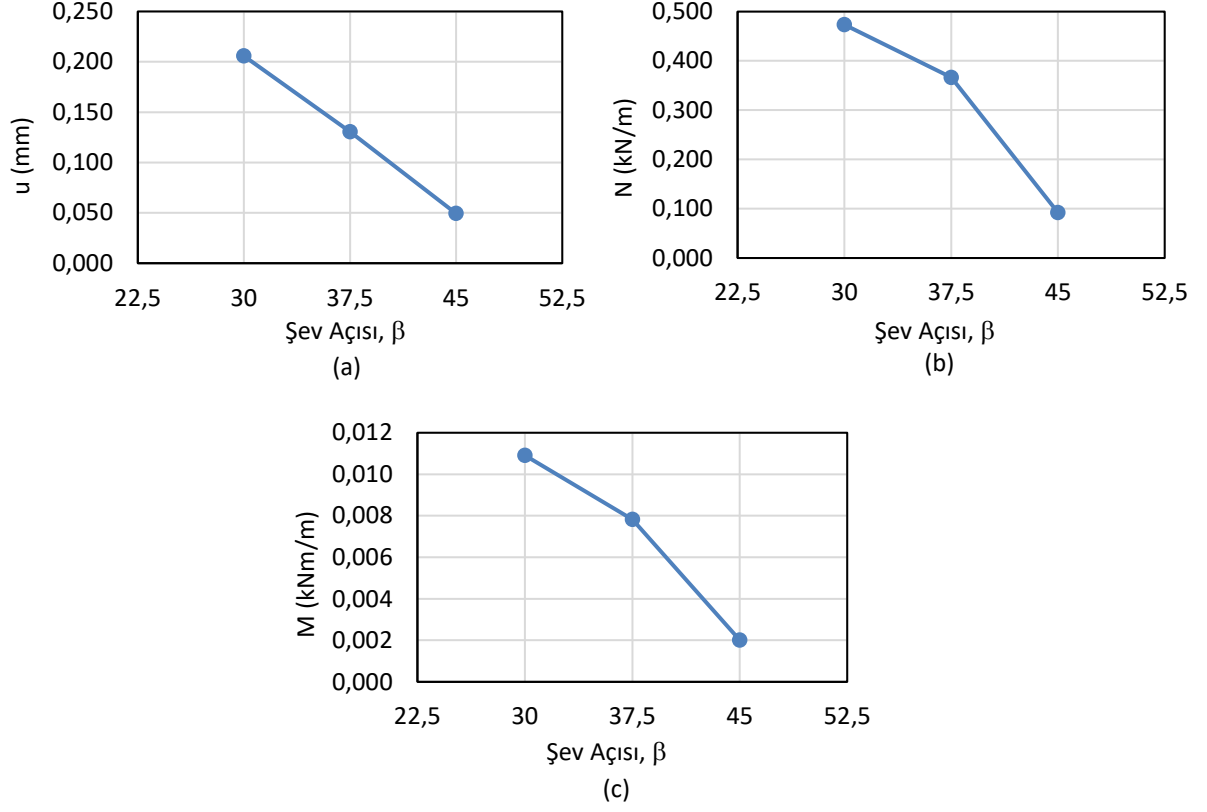
3.3. Şev Açısının Etkisi

Şev açısının, gömülü borunun davranışına etkisinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, şev açısı $\beta=30^\circ - 37.5^\circ - 45^\circ$ şeklinde seçilmiştir. Boru gömülme derinliği $z=2B$, şerit temelin şev tepesine olan uzaklığı $b=0B$, temel genişliği $B=0.10m$ ve boru çapı $D=0.10m$ olarak sabit tutulmuştur. Analizler sonucunda elde edilen deplasman dağılımları Şekil 6'da görülmektedir. Gömülü boruda, şev açısının artmasına bağlı olarak deplasman (u), aksenal kuvvet (N) ve eğilme momenti (M) değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir (Şekil 7).



Şekil 6. III. Grup analizlerden elde edilen deplasman dağılımları (a) $\beta=30^\circ$, (b) $\beta=37.5^\circ$, (c) $\beta=45^\circ$

Şev açısının artmasıyla, gömülü boruda elde edilen deplasman, aksenal kuvvet ve eğilme momenti değerlerinin azalmaktadır. Bu durum, şev dikleştikçe kayma yüzeyinin lokasyonunun değişmesi ve konumu sabit olan gömülü borunun şev açısının artmasıyla kayma yüzeyinden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 6).



Şekil 7. III. Grup analiz sonuçları (a) $\beta - u$ (b) $\beta - N$ (c) $\beta - M$

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, şevli zemin içerisine gömülü bir borunun, şev tepesine olan mesafesinin ve gömülme derinliğinin, farklı şev açılarında, boruda oluşan deplasmana, eksenel kuvvete ve eğilme momentine etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizler iki boyutlu PLAXIS sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

- Düz yüzeyli zemin durumunda temel altında simetrik bir basınç dağılımı oluşurken zeminin şevli olması durumunda basınç dağılımı asimetrik olarak oluşmaktadır. Şevli zeminlere gömülü boruların davranışı üzerinde, hem asimetrik olarak oluşan temel basınç dağılımı hem de şevin kayma düzleminin yeri ve derinliği etkili olmaktadır.
- Gömülme derinliği arttıkça, borunun şevin göçme düzleminde uzaklaşması ve yüzeyde uygulanan yükün boru üzerindeki etkisinin azalması sonucunda, boruda meydana gelen deplasman, eksenel kuvvet ve eğilme momenti değerlerinde azalma meydana gelmektedir.
- Yükün şev tepesine olan uzaklığının artmasıyla, şerit temelin altında oluşan gerilmelerin daha geniş bir alana yayılması ve boru üzerindeki etkisinin artmasından dolayı gömülü boruda elde edilen deplasman, eksenel kuvvet ve eğilme momenti değerleri artmaktadır.
- Şev açısının artmasıyla, kayma yüzeyinin lokasyonunun değişmesi ve konumu sabit olan gömülü borunun şev açısının artmasıyla kayma yüzeyinden uzaklaşmasından dolayı gömülü boruda elde edilen deplasman, eksenel kuvvet ve eğilme momenti değerleri azalmaktadır.
- Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen deplasman ve gerilme dağılımları konunun daha rahat anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Allard, E. and El Naggar, H. (2016), "Pressure Distribution around Rigid Culverts Considering Soil-Structure Interaction Effects", International Journal of Geomechanics, 16 (2), 04015056.
- Alzabeebee, S., Chapman, D. N. and Faramarzi, A. (2018), "A comparative study of the response of buried pipes under static and moving loads", Transportation Geotechnics, 15, 39-46.
- Bildik, S. and Laman, M. (2015), "Experimental Investigation of the Effects of Pipe Location on the Bearing Capacity", Geomechanics and Engineering, Vol. 8, No. 2, 221-235.
- Bildik, S. and Laman, M. (2019), "Experimental Investigation of Soil-Structure-Pipe Interaction", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 23, 3753-3763.
- Cheuk, C. Y., White, D. J. and Bolton, M. D. (2008), "Uplift mechanisms of pipes buried in sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(2), 154-163.
- Greenwood., M., E. ve Lang., D.C. (1990), "Vertical deflection of buried flexible pipes", Buried Plastic Pipe Technology, ASTM STp 1093 Philadelphia, ABD.
- Keskin, M.S. and Laman, M. (2013), "Model Studies of Bearing Capacity of Strip Footing on Sand Slope", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 4, 699-711.
- Khan, M. U. A. and Shukla, S. K. (2020), "Load-Settlement Response and Bearing Capacity of a Surface Footing Located Over a Conduit Buried Within a Soil Slope", International Journal of Geomechanics, 20 (10), 04020173.
- Marston, A. and Anderson, A. O. (1913), Bulliton No:31, Iowa Engineering Experiment Station, Ames Iowa, ABD.
- McGrath, T. J. (1998), "Design Method for Flexible Pipe", A Report to the AASHTO Flexible Culvert Liaison Committee, Simpson Gumpertz and Heger Inc.
- Moser, A. P. and Folkman, S. (2008), "Buried Pipe Design", 3rd Edition, Mc Graw- Hill Press, USA.
- Sargand, S. M., Masada, T. and Gruver, D. (2005), "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.
- Sweeney, M., Gasca, A.H., Garcia-Lopez, M. and Palmer, A.C. (2005), "Pipelines and Landslides in Rugged Terrain: A Database, Historic Risks and Pipeline Vulnerability", In Sweeney, M., ed., Terrain and Geohazard Challenges Facing Onshore Oil and Gas Pipelines, 641-660. Thomas Telford.
- Talesnick, M.L., Frydman, S. (2018), "Soil Pressure and Pipe Deformation Measurements for Characterizing Flexible Pipe-Soil Systems under Shallow Cover", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, Vol. 9, 04017028.
- Talesnick, M.L., Xia, H.W., and Moore, I.D. (2011), "Earth Pressure Measurements on Buried HDPE Pipe", Geotechnique, 61 (9), 721-732.
- Watkins, R. K and Spangler, M. G. (1958), "Some Characteristics of the Modulus of Passive Resistance of Soil: A Study of Similitude", Highway Research Board Proceedings, Vol. 37., pp. 576-583.
- Wu, J., Zhou, R., Xu, S., and Wu, Z. (2017), "Probabilistic Analysis of Natural Gas Pipeline Network Accident Based on Bayesian Network", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 46, 126-136.