

PASİF KAZIKLARIN ŞEV STABİLİTESİNDE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF PASSIVE PILES IN SLOPE STABILITY

Enes ŞİRİN¹, Havvanur KILIÇ²

ÖZET

Şev stabilitesinin pasif kazıklarla sağlanması, kolay uygulanabilirlik ve etkili performansı ile öne çıkarak günümüzde sıkça kullanılan güvenilir yöntemlerden biri haline gelmiştir. Limit denge analizleriyle incelenen problemler bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişmesiyle yerini, sonlu elemanlar gibi yöntemlere bırakmıştır. Sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar her ne kadar güvenilir sonuçlar verse de analizi yapılmak istenilen problemin doğru modellenmesi kritik bir noktadır, hatalı bir modellemenin doğru bir sonuç vermesi mümkün değildir. Bu çalışmada yanıl yük etkisi altında kazıkların davranışı, kazıklar arasındaki mesafenin şev stabilitesine ne derecede katkı sağladığı ve analizlerde kullanılan farklı modelleme yöntemlerinin sonuçlara olan etkisi sayısal analizlerle incelenmiştir. Bu kapsamda günümüzde geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis programı kullanılmıştır. Plaxis programının limit denge (V21), iki (2024.1) ve üç (2024.1) boyutlu modüllerinde analizler yapılarak kazıkların farklı yöntemlerle modellenmesinin sonuçlara olan etkisi ve elde edilen sonuçların daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, pasif kazıklar, sonlu elemanlar yöntemi, plaxis

ABSTRACT

Providing slope stability with passive piles has become one of the reliable methods frequently used today, standing out with its easy applicability and effective performance. Problems examined with limit equilibrium analyses have been replaced by methods such as finite elements with the development of computer and software technology. Although studies using finite element methods provide reliable results, correct modeling of the problem to be analyzed is a critical point, it is not possible for an incorrect modeling to give correct results. In this study, the behavior of piles under the effect of lateral load, the extent to which the distance between piles contributes to slope stability and the effect of different modeling methods used in the analyses on the results were examined with numerical analyses. In this context, the Plaxis program, which performs analysis with the finite element method widely used in geotechnical engineering today, was used. Analyses were

¹ İnşaat Mühendisi, sirin.enes@outlook.com.tr (Yazışma yapılacak yazar)

² Prof. Dr., kilichavvanur@gmail.com, Yıldız Teknik Üniversitesi (Sorumlu yazar)



made in the limit equilibrium (V21), two (2024.1) and three (2024.1) dimensional modules of the Plaxis program, and the effect of modeling piles with different methods on the results and the comparison of the obtained results with previous studies were made.

Keywords: Slope stability, passive piles, finite element method, plaxis

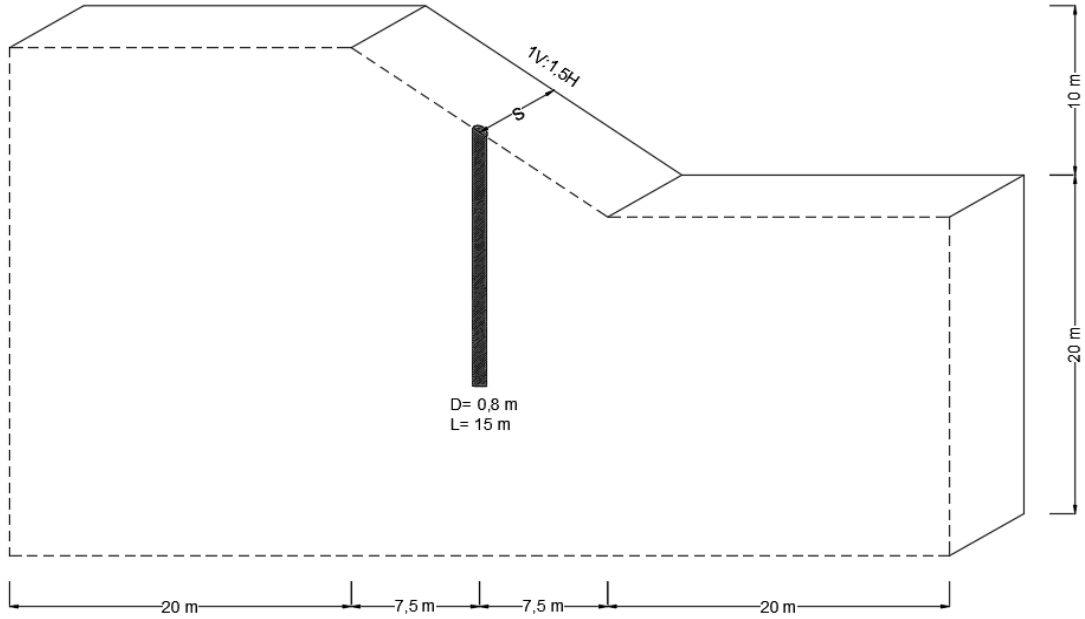
1. GİRİŞ

Pasif kazıkların geçmişte ve günümüzde yapılan birçok numerik ve deneysel araştırma sonucunda şev stabilitesinin sağlanması amacıyla başarılı bir şekilde kullanılabileceği bilinmektedir. Kazıkların stabiliteyi arttırıcı eleman olarak kullanılacak olması beraberinde farklı soruları ortaya çıkarmıştır. Kazıkların şevin hangi bölgesinde konumlanacağı, derinliği, kazıklar arası optimum mesafe, kemerlenme etkisi, kazık başlarının tutulu ve serbest olmasının etkisi ve tüm bu etkilerin granüler ve kohezyonlu zeminler arasında ne gibi farklı sonuçlara ulaşılacağı soruları pasif kazıkların şev stabilitesinde analizi konusunu oluşturmaktadır. Bishop (1955) tarafından kazıkların şevin başında konumlandırılması sonucunda en olumlu etkiyi yapacağı söylenilmişse de yapılan çalışmalar göstermektedir ki kazıkların şev ortasında konumlandırılması sonucu en yüksek güvenlik sayıları elde edilmiştir. Kazıklar arasındaki mesafe azaldıkça kazıklar tarafından karşılanacak kuvvetin büyüklüğünün artacağı bilinmektedir. Kazıklar arasındaki optimum mesafe yapılacak analizler sonucu ortaya koyulacak olsa da kemerlenme etkisinin oluşabilmesi için kazıklar arası mesafenin çapına oranının 4 katından büyük olmaması gerekmektedir (Kourkoulis, 2011). Adachi ve diğ. (1989) çalışmaları sonucu zeminin harekete geçtiği ve kemerlenme maksimum düzeye ulaştığı zaman, zeminde deformasyon devam etse bile kemerlenmenin maksimuma ulaştığı için sabit kaldığı sonucu elde edilmiştir. Kazıkların derinlikleri kayma yüzeyinin altına ulaşmalı, stabilite tahkiklerinde yeterli sonuç vermeli ve kazıklar arası mesafe direnç kuvvetlerinin oluşmasına izin verecek mertebede olmalıdır (Poulos, 1995). Kourkoulis (2011) pratik olarak kullanılabilecek kazık soket uzunluğunun H, kayma yüzeyi derinliği olmak üzere kayaya soketlenen durumlarda 0.7H, zayıf zeminde ise 1.5H olması gerektiğini belirtmiştir. Günümüzde iksa ve temel altı kazıklarda soket boyu için kazık çapının 3 katı derinliğinde olmasının yeterli olduğu kabul edilmektedir. Zemin türünün stabilite analizlerinde etkisi de farklı çalışmalarda incelenmiş ve tespitler yapılmıştır. Bossher ve Gray (1986) çalışması sonucu gevşek kumda kemerlenme etkisinin sıkı kuma göre daha fazla olduğunu ve zeminde gerilme aktarımında kritik parametrenin boşluk oranı olduğu ortaya koyulmuştur. Plastik deformasyon sırasında kayma yüzeyinde sıkı kumda gevşeme dolayısıyla granüler kenetlenmede azalmanın gerçekleştiğini, gevşek kumda ise sıkılaştırmanın dolayısıyla kenetlenmenin artacağını savunmaktadır. Granüler zeminlerde yüksek sürtünme açısı sebebiyle daha fazla kemerlenme etkisinin oluştuğu Liang ve Zeng (2002) tarafından ortaya konulmuştur. Yanal yük etkisi altındaki kazıkların taşıyabilecekleri yanal yükler de incelenmesi gereken bir diğer konudur. Kazıkların uzun, kısa, granüler veya kohezyonlu zeminlere göre farklı analizleri de taşıma gücü ve yatay deplasman yöntemleri kullanılarak Broms (1964), Brinch Hansen (1961), Reese Metlock (1956) ve Paulos (1997) tarafından çalışmalar yapılmıştır.



2. MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Pasif kazıkların şev stabilitesine etkisinin incelenmesi amacıyla daha önce birçok çalışma tarafından referans olarak alınan ve Cai ve Ugai (2000) çalışmasında kullanılan geometri ve malzeme parametreleri karşılaştırma yapabilmek amacıyla bu çalışmada da kullanılmıştır. Şekil 1'de şev geometrisi ve şevin ortasında maksimum etkiyi sağlayacağı bilinen $D=0,8$ m çapında ve $L=15$ m boyunda kazık görülebilmektedir. Modellenen geometride kazıklar arası mesafe (s), 2D, 3D, 4D, 5D ve 6D olarak yerleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Şev geometrisi (Cai ve Ugai, 2000)

Plaxis programında modellenen zemin ve kazık parametreleri Tablo 1'de yer almaktadır. Cai ve Ugai (2000) çalışmasında tutulu ve serbest başlı kazıkların farklı mesafelerle yerleştirilmesi durumları için güvenlik sayıları ve kazıklara etkiyen tesir kuvvetleri incelenmiştir. Bu çalışmada, serbest başlı kazıkların Plaxis yazılım programı yardımıyla limit denge, 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Malzeme parametreleri (Cai ve Ugai, 2000)

Parametreler	Zemin	Kazık
Malzeme Modeli	Mohr Coulomb	Elastik
Elastisite modülü, E (mPa)	200	60000
Poisson oranı, ν	0,25	0,2
Birim hariç ağırlık, γ (kN/m ³)	20	-
Efektif kohezyon, c' (kPa)	10	-
Efektif içsel Sürtünme açısı, ϕ' (°)	20	-



2D	1,431	156,3
3D	1,353	104,2
4D	1,314	78,1
5D	1,290	62,5
6D	1,274	52,1

2.2. Plaxis 2D Analizleri

iki boyutlu Plaxis analizlerinde yanal yüklü kazıkların modellenmesi geçmişten günümüze yazılım sektöründeki ilerlemelere paralel olarak gelişmektedir. Plaxis 2D'de daha önceki versiyonlarında gömülü sıralı kiriş (embedded beam row) özelliğinin bulunmamasından dolayı kazıklar düz bir levha (plate) gibi geoteknik mühendisleri tarafından modellenerek kaba bir sonuca ulaşılmıştır. Güncel Plaxis 2D (2024.1) yazılımında gömülü sıralı kiriş özelliğinden faydalanılarak modelleme ile analizler yapmak mümkündür. Plaxis 2D ve 3D, Materials Model (2024) kitabında program yazılımcıları tarafından modellemelerde kullanılması tavsiye edilen yaklaşımlar hakkında bilgiler verilmektedir. Bu çalışma kapsamında yanal yüklü zemin hareketi incelendiğinden dolayı yalnızca bu hususlara değinilecektir. Program yazılımcıları tarafından yanal yüklü zemin hareketinde kazık analizlerinin en doğru şekilde modellenebilmesi için iki ve üç boyutlu modüllerinde farklı modelleme yaklaşımları benimsenmiştir. İki boyutlu analizlerde kazık modellemesi için levha (plate) eleman kullanılması analizler için kaba bir yöntem olarak görülmektedir. Gömülü sıralı kiriş (embedded beam row) elemanlar ise modelleme için makul yöntem olarak benimsenmiş ve analizlerde kullanılması tavsiye edilmiştir. Hacimsel (völüm element) ve düğümden düğüme bağlantı (node to node anchor) elemanlarının kullanılması ise önerilmemektedir. Bu durum üç boyutlu analizler yapılırken farklılık göstermektedir. Üç boyutlu kazık modellemesinin hacimsel eleman kullanarak yapılmasının en iyi yöntem olduğu, gömülü kiriş eleman kullanarak modellenmesinin ise makul bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Levha ve düğümden düğüme bağlantı eleman kullanarak modelleme yapılması ise önerilmemiştir. Bu çalışmada iki boyutlu kazıkların modellenmesi hem levha hem de gömülü sıralı kiriş kullanılarak yapılmıştır. Modellemesi yapılan elemanlarda da rijitlik azaltılması 3/4 oranında yapılmış olup kazık-zemin etkileşiminin gerçek duruma daha uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Levha eleman modellemesi yapılırken eş değer duvar yöntemi kullanılarak duvar rijitliği (EI_w), kazıklar arası mesafelerle doğru orantılı olarak düşürülerek kazık modellemesine yaklaşılmaya çalışılmıştır. Tablo 3'te yer alan d_{hesap} değerleri, azaltılmış duvar rijitlikleri girildikten sonra elde edilen levha kalınlığı değerleridir.

Tablo 3. Plaxis 2D (2024.1) plate modellemesi analiz sonuçları

s	$(EI)_w$ (kNm ²)	d_{hesap} (m)	Güvenlik Sayısı (FS)
Kazıksız Durum	-	-	1,102
2D	603.186	0,490	1,405
3D	402.124	0,400	1,384
4D	301.593	0,346	1,366
5D	241.274	0,310	1,369
6D	201.062	0,283	1,342



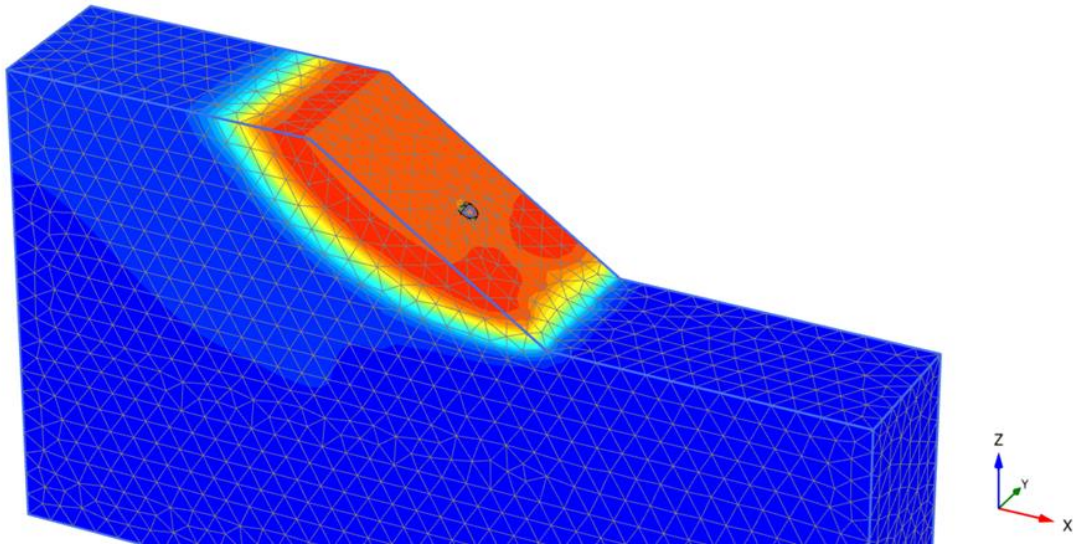
Tablo 3'te özetlenmiş olan levha eleman kullanılarak yapılan analizler, kazıklar arasındaki mesafenin artmasıyla elde edilen güvenlik sayısının azaldığı sonucunu vermektedir. Bu durum kazıklar arası mesafenin kazık çapına oranının 5 olduğu durumda geçerli değildir. Şev stabilite analizleri kazıklar levha eleman olarak modellendikten sonra, gömülü sıralı kiriş olarak da modellenerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te yer almaktadır. Kazıklar arası mesafenin artmasıyla güvenlik sayısındaki beklenen düşüş gerçekleşmiştir. İki boyutlu analizde kazıkların gömülü sıralı kiriş eleman olarak modellenecek olması durumunda kazık taşıma kapasitesi ve yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Dao (2011) ve Ben van der Kwaak (2015) tarafından yapılmış olan çalışmalar göstermektedir ki yanal yük etkisi altında olan kazıkların gömülü kiriş olarak modellenmesi durumunda düşey taşıma gücü parametreleri 1×10^5 kN/m gibi yüksek bir değer girmek doğru olacaktır. Çünkü kazıklar düşey yük etkisi altında olmadıklarından dolayı asıl sınır koşulu yanal yük taşıma kapasitesi olmalıdır.

Tablo 4. Plaxis 2D (2024.1) embedded beam row modellemesi analiz sonuçları

s	Güvenlik Sayısı (FS)
Kazıksız Durum	1,102
2D	1,289
3D	1,222
4D	1,212
5D	1,198
6D	1,182

2.3. Plaxis 3D Analizleri

Yanal zemin hareketinin inceleneceği 3 boyutlu analizlerde kazık modellemesinin elastik davranış gösteren hacimsel eleman olarak yapılması sonuçların en doğru şekilde elde edilmesini sağlayacaktır. Modellenen sistem sonucu elde edilen deformasyon mertebeleri Şekil 3'te yer almaktadır.



Şekil 3. Plaxis 3D (2024.1) kritik kayma yüzeyi ve zeminde deformasyonlar



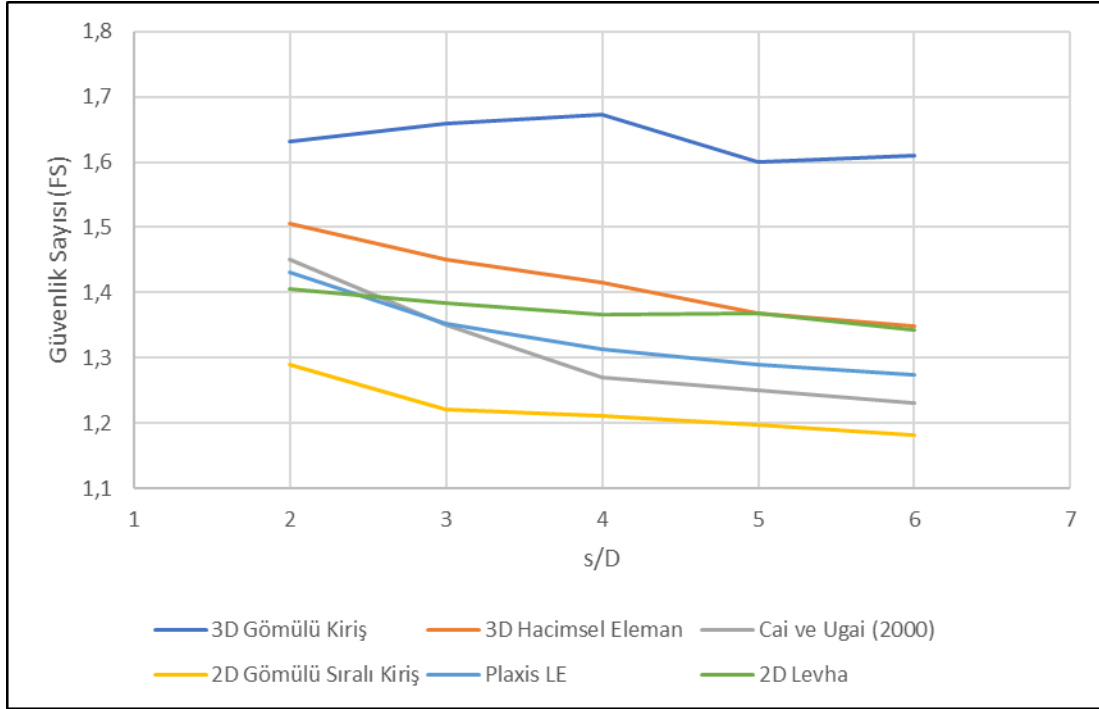
Modellemesi yapılan hacimsel elemanda rijitlik azaltılması 3/4 oranında yapılmış olup kazık-zemin etkileşiminin gerçek duruma daha uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. 3 boyutlu analizlerde şev geometrisi, sonuçlara birinci dereceden etki etmektedir. Şev genişliğinin artması ve kazıkların yan yana iki veya daha fazla modellenmesi gibi durumlarda elde edilen sonuçlar tutarsız ve güvenilir olabilmektedir. Ben van der Kwaak (2015) tarafından kazık modellemesinin hacimsel eleman olarak yapılan çalışmasında en uygun modellemenin kazıklar arası mesafenin model sınırı olarak belirlenmesi ve sınırda kazığı temsil edecek bir elemanın bulunmaması gerektiği sonucu olduğu ortaya koyulmuştur. Bu çalışma kapsamında da şev modelinin genişliği, kazıkların sayısının artması gibi varyasyonlar çalışılmış olup elde edilen sonuçlar Ben van der Kwaak (2015) çalışmasını destekleyici yönde olmuştur. Tablo 5'te kazıklar arasındaki mesafeye bağlı olarak kazıkların hacimsel ve gömülü kiriş eleman olarak modellenmesi sonucu elde edilen güvenlik sayıları sunulmuştur. Analizlerde hacimsel eleman olarak modellenen kazıkların kullanılması sonucu elde edilen güvenlik sayıları, kazıklar arasındaki mesafenin artmasıyla azalmaktadır. Gömülü kiriş eleman olarak modellenen kazıkların yer aldığı analizlerde ise bu durum daha farklı sonuçlanmıştır. Kazıklar arası mesafenin, kazıkların çapına oranının 2'den 4'e kadar olduğu durumda güvenlik sayısında artış elde edilmiştir. Kazıklar arası mesafenin, kazık çapına oranının 5 ve 6 olduğu durumda ise güvenlik sayısı önce azalmakta daha sonra tekrar artmaktadır. Elde edilen sonuçlar kazıklar arası mesafenin artmasıyla, azalması beklenen güvenlik sayısının azalmadığını bilakis arttığını göstermektedir. Bu durum Plaxis 3D (2024.1) programında yapılan şev stabilitesi analizlerinde modellenecek olan pasif kazıkların, gömülü kiriş eleman olarak modellenmesiyle doğru sonuç vermediğinin göstergesidir.

Tablo 5. Plaxis 3D (2024.1) iki farklı modelleme ve analiz sonuçları

s	Hacimsel Eleman Modellemesi	Gömülü Kiriş Modellemesi
	Güvenlik Sayısı (FS)	Güvenlik Sayısı (FS)
Kazıksız Durum	1,181	1,181
2	1,506	1,632
3	1,450	1,659
4	1,415	1,673
5	1,368	1,601
6	1,349	1,610

Çalışmada, Cai ve Ugai (2000)'de kullanılan geometri ve malzeme parametreleri dikkate alınarak Plaxis programında limit denge (LE), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucu kazıklar arası mesafeye göre (s/D) elde edilen güvenlik sayıları Şekil 4'te yer almaktadır.





Şekil 4. Plaxis ile yapılan analizlerde belirlenen güvenlik sayılarının kazıklar arası mesafeye göre değişimi

3. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında yapılan analizlerin tüm analiz sonuçları Şekil 4'te özetlenmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde limit denge analizlerinin Cai ve Ugai (2000) çalışmasında elde edilen sonuçlarla büyük benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. İki boyutlu analizlerde kazık modellenmesi levha eleman olarak yapıldığında elde edilen güvenlik sayısı, kazıklar arası mesafenin kazık çapına oranının 5 olduğu durumda beklenen değişimi gösterememiştir. Bölüm 2.2.'de de belirtildiği gibi levha elemanların yanıl yüklü kazık modellenmesinde kullanılmasının ne kadar güvenilir olduğu tartışma konusudur. 2 ve 3 boyutlu analizlerde kullanılan gömülü kiriş elemanın, yanıl yük taşıma kapasitesinin ($Q_{lateral}$) Plaxis 2D (2024.1) programında kullanıcı tarafından hesaplanarak girilmesiyle, Plaxis 3D (2024.1) programında ise yazılım tarafından hesaplanmasıyla birbirinden ayrılmaktadır. 3 boyutlu analizlerde kazıkların hacimsel eleman olarak modellenmesi sonucu elde edilen değerler beklenildiği gibi olmakla birlikte gömülü kiriş eleman olarak modellenmesi sonucu elde edilen değerler tutarlı sonuç vermemektedir. Plaxis programının limit denge, iki ve üç boyutlu modüllerinde, kullanıcılar tarafından tercih edilen farklı modelleme yöntemleri bu çalışmada karşılaştırılarak incelenmiş olup elde edilen veriler ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- Adachi, T., Kimura, M. and Tada, S. (1989), "Analysis on The Preventive Mechanism of Landslide Stabilizing Piles", 3rd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, 691-698.
- Bishop, A. W. (1955), "The Use of The Slip Circle in The Stability of Slopes", Geotechnique, Vol. 5, No. 1, pp. 7-17.



- Bosscher, P.J. and Gray, D.H. (1986), "Soil Arching in Sandy Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 112, Issue 6.
- Broms, B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 90 Issue 3.
- Brinch H. J. (1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", *Bulletin No. 12*, The Danish Geotechnical Institute, Copenhagen.
- Cai, F. and Ugai, K. (2000), "Numerical Analysis of The Stability of A Slope Reinforced With Piles", *Soils Found* 40(1),73–84.
- Chen L.T. and Poulos H.G. (1997), "Piles Subjected to Lateral Soil Movements" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Volume 123, Issue 9.
- Dao, T.P.T. (2011), "Validation of PLAXIS Embedded Piles For Lateral Loading", M.S. Thesis in Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Geo-Engineering, Delft University of Technology, Netherland.
- Kourkoulis R., Gelagoti F.ve diğ. (2011), "Hybrid Method for Analysis and Design of Slope Stabilizing Piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 138 Issue 1.
- Kwaak, B.V.D. (2015), "Modelling of Dynamic Pile Behaviour During An Earthquake Using PLAXIS 2D: Embedded Beam (Row)", *Delft University of Technology*, 2015.
- Liang R. ve Zeng S. (2002), "Numerical Study of Soil Arching Mechanism in Drilled Shafts for Slope Stabilization", *Soils and Foundations* Vol.42, No.2, 83-92.
- Poulos, H. G. (1995), "Design Of Reinforcing Piles To Increase Slope Stability", *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 808–818.
- Plaxis 2D 2024.1 Material Models Manuel 2D (2023), "Modelling Embedded Structures", Seequent/Bentley Systems & Delft University of Technology, The Netherlands.
- Plaxis 3D 2024.1 Reference Manuel 3D (2023), Bentley Systems.
- Plaxis LE Help Manuel (2022), The Bentley Systems Team.
- Rahardjo H. and Fredlund D.G. (1984), "General Limit Equilibrium Method for Lateral Earth Force", *Canadian Geotechnical Journal*. 21(1): 166-175.
- Reese, L.C. and Matlock, H. (1956), "Non-dimensional Solutions for Laterally-Loaded Piles With Soil Modulus Assumed Proportional to Depth", *Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, Texas, pp.1-41.
- Sarı, C. (2020), "Şev Kazıklarında Zemin-Yapı Etkileşiminin Analizlerle İncelenmesi", *Uluslararası Marmara Fen bilimleri Kongresi, Körfez Belediyesi, Körfez Kocaeli*.

