

KİLLİ ŞEVLERİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILAN BETONARME KAZIKLARIN ELASTOPLASTİK MODELLENMESİ

ELASTOPLASTIC MODELING OF REINFORCED CONCRETE PILES USED IN STABILIZATION OF CLAYEY SLOPES

Emre TEKDEMİR¹, Irem Zeynep YILDIRIM²

ÖZET

Bu çalışma, yük altındaki killi şevleri stabilize etmekte kullanılan betonarme kazıkları elastoplastik modellemenin şevin deformasyon ve stabilite analizleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Yük aktarma mekanizmalarını ve zemin kemerlenme etkilerini görebilmek için üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Analizlerde, kazıklar lineer elastik betonarme, elastoplastik beton, elastoplastik betonarme ve elastoplastik makroskopik betonarme olmak üzere dört farklı yaklaşımla modellenmiştir. Elastoplastik betonarme yaklaşımda, betonarme kazığın davranışını simüle etmek için boyuna donatılar modele giriş elemanları olarak eklenmiştir. Elastoplastik makroskopik betonarme yaklaşımda ise literatürde yer alan ve donatıları giriş elemanları olarak eklemeyen betonarme davranışı simüle eden bir yaklaşım benimsenmiştir. Elastoplastik modelleme yaklaşımlarında pratiklik açısından Mohr-Coulomb göçme kriteri ve kalibre edilen mukavemet parametreleri kullanılmıştır. Sonuçlar, kazık kesit tesirleri, güvenlik katsayıları ve bütünlük kazık-şev göçme mekanizmaları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, lineer elastik kazık modelleme yaklaşımı kullanıldığında, kazıklar yapısal olarak göçmediği için, makul olmayan göçme mekanizmalarının ve yüksek güvenlik katsayılarının elde edildiğini göstermektedir. Elastoplastik beton yaklaşımı kullanıldığında boyuna donatıların eksikliği, yükleme aşamasında plastik mesnet oluşumlarının başlamasına neden olmuş, bu da kazık yük kapasitesini önemli ölçüde azaltmış ve hem deformasyon hem de stabilite analizlerinde ekonomik olmayan sonuçlara yol açmıştır. Elastoplastik betonarme yaklaşımı, boyuna donatı detaylarının dahil edilmesi sonucunda makul kazık kesit tesirleri ve güvenlik faktörleri sağlamıştır, ancak bu iyileşme sayısal hesaplama süresinde artışa sebep olmuştur. Elastoplastik makroskopik betonarme yaklaşımı, modelleme açısından kolaylık sağlamasıyla beraber elastoplastik betonarme yaklaşımı ile benzer sonuçları görece çok daha kısa hesaplama süresi sonunda sağlamıştır. Sonuçlar, incelenen kazıklarla stabilize edilmiş şev örneğinde elastoplastik kazık modelleme yaklaşımları kullanmanın önemini ve elastoplastik makroskopik betonarme yaklaşımının avantajlarını vurgulamaktadır.

¹ Araştırma Görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, emre.tekdemir@bogazici.edu.tr

² Dr. Öğretim Üyesi, Boğaziçi Üniversitesi, zyildirim@bogazici.edu.tr (Sorumlu yazar)



Anahtar Kelimeler: şev stabilitesi, kazıklarla stabilizasyon, elastoplastik kazık modelleme, sonlu elemanlar metodu, üç boyutlu analiz

ABSTRACT

This study examines the influence of modeling the reinforced concrete stabilizing piles using elastoplastic approaches on the deformation and stability analysis of loaded clayey slopes. Three-dimensional finite element analysis was utilized to simulate load transfer mechanisms and soil arching effects. In the analysis, piles were modeled with four different approaches, namely: linear elastic reinforced concrete, elastoplastic concrete, elastoplastic reinforced concrete, and elastoplastic macroscopic reinforced concrete. In the elastoplastic reinforced concrete approach, longitudinal steel reinforcements were introduced as beam elements to simulate the response of reinforced concrete piles. An innovative macroscopic method from the literature that eliminates the use of beam elements was adopted in the elastoplastic macroscopic reinforced concrete approach. All elastoplastic modeling approaches applied the Mohr-Coulomb failure criterion and the calibrated strength parameters. The results were evaluated comparatively based on pile internal forces, factors of safety, and coupled pile-slope failure mechanisms. The results show that use of linear-elastic pile modeling cannot simulate structural pile failures and reasonable failure mechanisms, leading to high factor of safety values. The use of elastoplastic concrete approach, caused premature plastic hinge formation during the loading phase mainly due to a lack of longitudinal reinforcements, significantly reducing the load carrying capacity of the piles and leading to uneconomical results in both deformation and stability analyses. The use of elastoplastic reinforced concrete approach provided more reasonable failure mechanisms and factors of safety values due to the inclusion of reinforcement details, even though this improvement came with a notable increase in the computation time. The use of the elastoplastic macroscopic model simplified the modeling process and produced results comparable to the elastoplastic reinforced concrete approach, with relatively lower computation time. The results highlight the importance of using elastoplastic modeling approaches and the advantages of the elastoplastic macroscopic approach in the studied pile-stabilized slope problem.

Keywords: slope stability, pile stabilized slopes, elastoplastic pile modeling, finite elements method, three dimensional analysis

1. GİRİŞ

Şev stabilitesini arttırmak için kullanılan temel yöntemlerinden biri şevlerin betonarme kazıklarla güçlendirilmesidir. Betonarme kazıklar, çeşitli şev geometrilerine ve saha koşullarına uyum sağlayabilme özellikleri sayesinde şev stabilizasyonu için pratik ve ekonomik çözümler sunarlar. Şeve betonarme kazıkların dahil edilmesi, şevin göçme mekanizmasını ve kritik göçme yüzeyinin yerini de değiştirmektedir. Bu sebeple, betonarme kazıkları ve şevi bütünleşik bir sistem olarak sonlu elemanlar (FE) ya da sonlu fark (FD) metotlarıyla modellemek daha verimli bir yaklaşım olmaktadır. Bu yaklaşım şev ve betonarme kazıklar arasındaki etkileşimin daha doğru modellenmesini sağlar ve bütünleşik sistem için tek bir güvenlik katsayısı (F_s) elde edilmesine olanak tanır. Kazıklarla stabilize edilmiş şevlerin bütünleşik sayısal analizlerinde, üç boyutlu (3D) FE yazılımları, özellikle iki



boyutta (2D) modellenmesi zor olan geometriler için, yaygın olarak kullanılmaktadır (Laudemen ve Chang, 2004; Pirone ve Urciuoli, 2018).

Killi şevler üzerinde sürşarj yükleri planlandığında, şevin kısa vadeli (drenajsız) stabilitesinin değerlendirilmesi gereklidir. Killi şevlerinin kısa vadeli stabilite analizinde, genellikle derinden geçen göçme yüzeyleri gözlenir. Bu tip göçmelerde betonarme kazıkların yapısal kapasitesi tasarımı yönetebilir ve bu sebeple FE analizinde kazıkların yapısal kapasitesini dikkate alan bir modelleme yaklaşımı seçilmelidir. Kazıklarla stabilize edilmiş şevlerin analizinde, literatürde 3D FE kullanılan araştırma çalışmalarının çoğunda, kazıklar için lineer elastik malzeme özellikleri kullanılmıştır (Ng vd., 2001; Wei ve Cheng, 2009; Ellis vd., 2010; Kanagasabai vd., 2011; Liang vd., 2014; Fantera vd., 2022). Bu problemin 3D analizlerinde elastoplastik kazık malzeme modeli kullanan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır (Kourkolis vd., 2011; Jiang vd., 2022). Ayrıca, literatürdeki çalışmalar betonarme hacim kazıkları için kullanılan elastoplastik malzeme parametrelerini sunmamaktadır. Kazık modelleme yaklaşımının (kazık malzeme modelinin seçiminin) betonarme kazıklarla stabilize edilmiş şevlerin 3D FE analiz sonuçları üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması araştırma ve uygulama alanında çalışan tüm mühendisler için gereklidir. Bu sebeple, bu çalışmada betonarme kazıklar kullanılarak stabilize edilmiş killi şevlerin deformasyon ve stabilite analizlerinde kazıkların elastoplastik modellenmesinin sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Zemin kemerlenme etkilerinin ve yük aktarım mekanizmasının daha ayrıntılı değerlendirilmesine olanak tanıdığı için, bu çalışmada sadece 3D FE analizleri yapılmıştır. Sonuçlar kazık kesit tesirleri, göçme mekanizmaları ve F_s değerleri üzerinden tartışılmıştır.

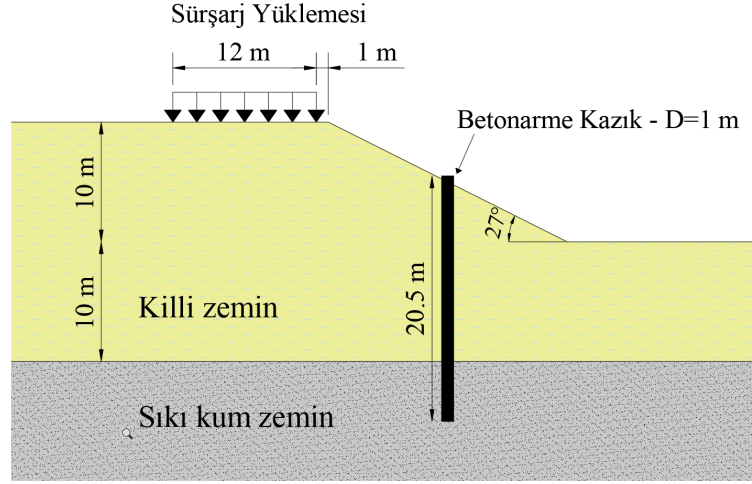
2. YÖNTEM

Bu çalışmada, 2H:1V eğimli, 10 m yüksekliğinde ve killi zeminden oluşan bir şev ele alınmıştır. Şev stabilitesini arttırmak için kullanılan betonarme kazıklar şev topuğundan 10 m aşağıda bulunan sıkı kum tabakasına soketlenmiştir. İncelenen kazıklarla stabilize edilmiş yüklü şev modeli Şekil 1'de görülmektedir. Analizlerde, şevin tepe kısmı yakınına yerleştirilen iki sürşarj yüklemesi: 100 kPa ve 130 kPa dikkate alınmıştır. Temel amaç kazıkları elastoplastik modellemenin etkisini çalışmak olduğu için, 3D modelde sürşarj yükünün şev boyunca devam ettiği varsayılmış ve şev bir dilim olarak modellenmiştir. İncelenen problemin analizleri, 3D FE yazılımı Plaxis 3D kullanılarak tamamlanmıştır (Brinkgreve vd., 2021). Stabilite analizi için Plaxis 3D'deki mukavemet azaltma tekniği kullanılmıştır. Mukavemet azaltma metodunda zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri kademeli olarak azaltılarak göçme durumu simüle edilmekte ve F_s değerleri göçme durumundaki azaltılmış mukavemet parametreleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Kum ve kil malzemeler için pekleşen zemin küçük birim deformasyon (HSS) bünye modeli kullanılmıştır. Kullanılan zemin parametreleri Tablo 1'de özetlenmektedir.

Öncelikle, kazıklarla stabilizasyon sağlanmadan önceki şevin yüksüz ve sürşarj yüklü durumları için 3D FE kullanılarak stabilite analizi yapılmıştır. Elde edilen F_s değerleri, sürşarj yükü uygulamadan önce şevin stabilizasyonun arttırılması gerektiğini göstermiştir. Bu sebeple, stabilizeyi arttırmak için 1 m çapa (D) sahip betonarme kazıklar modele eklenmiştir. Zemin kemerlenme etkilerinden faydalanmak ve daha ekonomik bir tasarım elde etmek için kazıklar, merkezleri arasında kazık çapının üç (3) katı mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kazıklar hacim eleman olarak modellenmiş ve kazık başlarının serbest şekilde hareket



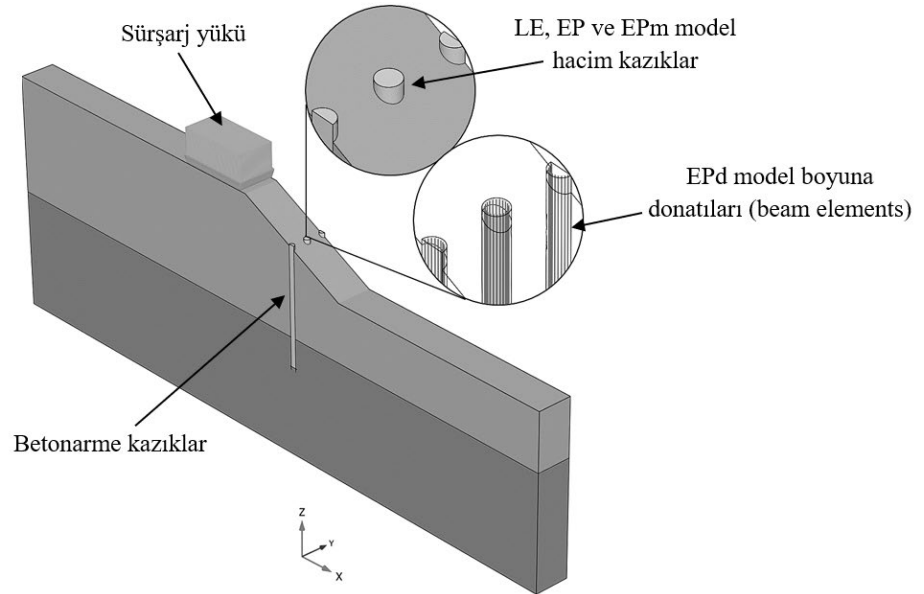
etmesine izin verilmiştir. Kazıkların modellenmesinde bir lineer elastik betonarme (LE) yaklaşım ve üç farklı elastoplastik yaklaşım: elastoplastik beton (EP), elastoplastik betonarme (EPd), ve elastoplastik makroskopik betonarme (Epm) değerlendirilmiştir. Kullanılan 3D FE dilim şev modeli ve kazık modelleme yaklaşımlarına ait ayrıntılar Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1. İncelenen kazıklarla stabilize edilmiş yüklü şev modeli

Tablo 1. FE modelinde kullanılan zemin özellikleri

Zemin	Drenaj koşulu	γ (kN/m^3)	S_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)	E_{50}^{ref} (kPa)	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kPa)	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kPa)
Orta katı kil	Drenajsız (Undrained B)	16	50	-	-	12000	12000	36000
Sıkı kum	Drenajlı (Drained)	18	-	1	42	70000	70000	210000



Şekil 2. 3D FE modeli ve kazıkların boyuna donatı detayları



PLAXIS 3D kullanılarak deformasyon ve stabilite analizleri aşamalı olarak tamamlanmıştır. İlk aşamada, modeldeki gerilme ve boşluk suyu basınçları hesaplanmıştır. Bu aşamada çevre koşullarında oluşan gerilmeleri hesaplamak için, modellenen geometrinin ağırlığını kullanarak kuvvetlerin dengesini hesaplayan yerçekimi yüklemesi seçeneği kullanılmıştır. İlk aşamanın sonunda, bu aşamada hesaplanan yer değiştirmeler sıfırlanmıştır. İkinci aşamada, ilk aşamadan kaynaklanabilecek dengesiz kuvvetleri dengelemek için modelde herhangi bir değişiklik yapılmadan plastik deformasyon analizi yapılmıştır. Üçüncü aşamada, ise modeldeki hacim kazıklar ve arayüz elemanları etkinleştirilmiştir. Dördüncü aşamada sürşarj yükü etkinleştirilmiştir. Son aşamada ise Plaxis 3D yazılımının içinde olan mukavemet azaltma yöntemi kullanılarak stabilite analizi yapılmıştır. Bütün aşamalarda orta katı kil zemin drenajsız (Undrained B), sıkı kum zemin drenajlı (drained), hacim kazıklar ise geçirimsiz (non-porous) drenaj koşulu ile analiz edilmiştir.

Geoteknik analizlerde beton elemanların elastoplastik modellemesi için genellikle Mohr-Coulomb göçme kriteri kullanılır. Ancak, beton malzeme için önerilen Mohr-Coulomb mukavemet parametreleri geniş bir aralıkta değişmektedir (Kazakov vd., 2020). Ardiaca (2009) literatürde ve yönetmeliklerde sunulan çeşitli yöntemleri kullanarak, C25 betonun kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) değerlerinin sırasıyla 500 kPa - 1186 kPa ve 9° - 54.9° aralıklarında değişebildiğini göstermiştir. Bu sebeple, 3D FE analizinde beton elemanların elastoplastik mukavemet parametrelerinin doğru seçimi önem taşımaktadır. Bu çalışmada EP ve EPd yaklaşımlarında Maatkamp (2016) tarafından önerilen, C30 betona karşılık gelen Mohr-Coulomb mukavemet parametreleri kullanılmıştır. EPd modelinde, boyuna donatılar, hacim kazıkların içine kiriş elemanlar (beam elements) olarak eklenmiştir. Donatıların kiriş elemanlar olarak modele eklenmesi hem modelleme için gereken eforu hem de analiz süresini ciddi ölçüde arttırmaktadır. EPm yaklaşımında, Gerolyos vd. (2014) tarafından önerilen makroskopik betonarme kazık modeli yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, donatı detayları ve beton hacimleri tek bir bütün eleman olarak kabul edilmektedir. EPm yaklaşımı, aksel yönde kuvvet dengesi ve kazık kesitinin merkezinde moment dengesini denklemlerini dikkate almaktadır. Bu denge denklemleri, eğilme momentleri ve aksel kuvvetler etkisi altında yapısal göçme koşullarına dayanarak Mohr-Coulomb mukavemet parametrelerini türetmek için kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan tüm yaklaşımlarda, betonun elastisite modülü (E) 30 gPa ve poisson oranı 0.2 alınmıştır. Kazık kesitinde, beton alanının toplam boyuna donatı alanına oranı olarak tanımlanan donatı oranı (R_f), EPd ve EPm yaklaşımlarında %1.5 seçilmiştir. Her bir kazık modelleme yaklaşımında kullanılan malzeme özelliklerinin özeti Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. FE modelinde kullanılan kazık parametreleri

Kazık modelleme yaklaşımı	c (kPa)	φ ($^\circ$)	$\sigma_t^{(3)}$ (kPa)	$f_{yk}^{(4)}$ (mPa)	$R_f^{(5)}$ (%)	E (gPa)
Lineer elastik betonarme (LE)	-	-	-	-	-	30
Elastoplastik beton (EP) ⁽¹⁾	7808.5	35	2000	-	-	30
Elastoplastik betonarme (EPd) ⁽¹⁾	7808.5	35	2000	420	1.5	30
Makroskopik elastoplastik betonarme (EPm) ⁽²⁾	15262	0	7534	-	1.5	30

Not: ⁽¹⁾ EP ve EPd model parametreleri Maatkamp 2016'dan uyarlanmıştır. ⁽²⁾ EPm model parametreleri Gerolyos vd. 2014'den uyarlanmıştır. ⁽³⁾ σ_t : Limit çekme gerilmesi ⁽⁴⁾ f_{yk} : Donatı akma dayanımı ⁽⁵⁾ R_f : Donatı oranı.



Lineer-elastik yaklaşımlarla modellenen kazıklar, stabilite analizinde kullanılan mukavemet azaltma yönteminden doğrudan etkilenmemektedir. Ancak zemine uygulanan mukavemet azaltma yöntemi sebebiyle (zeminde ve yapısal elemanlarda) oluşan yer değiştirmeler ve yer değiştirmeler sonucunda oluşan ilave yükler, yapısal elemanların da mukavemet azaltma yönteminden dolayı olarak etkilenmesine yol açmaktadır. Elastoplastik yaklaşımlarda da benzer şekilde, yapı elemanlarının mukavemet parametreleri stabilite analizinde kullanılan mukavemet azaltma yöntemi sırasında sabit tutulmuştur.

Kazık kesit tesitleri, yükleme aşamasında elde edilen deformasyon analizi sonuçlarına dayanarak değerlendirilirken, F_s ve göçme mekanizmaları ise stabilite analizinin sonuçları üzerinden değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı yükleme koşulları için, kazıklarla stabilize edilmemiş şevin F_s değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Yükleme durumlarında F_s değerinde ciddi düşüş gözlenmekte ve sürşarj yükü uygulamadan önce şevin stabilizasyonun artırılması gerektiği görülmektedir. Kazık modelleme yaklaşımları karşılaştırılırken 100 kPa yükleme durumu kullanılmıştır. 130 kPa yükleme durumu, deformasyon analizinde daha kritik ($F_s \cong 1$) bir yükleme durumu oluşturmak ve LE yaklaşımının seçilmesinin kazık iç kuvvetleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için analiz edilmiştir.

Tablo 3. Kazıklarla stabilizasyon öncesi F_s değerleri

Yükleme durumu	F_s
Yüksüz (doğal) şev	1.793
Birinci yükleme - $q=100$ kPa	1.144
İkinci yükleme - $q=130$ kPa	1.018

3.1. Göçme Sınır Durumu - Stabilite Analizi

Stabilite analizinden elde edilen kazık göçme mekanizmaları Şekil 3'te gösterilmektedir. 100 kPa yükleme durumu için LE ve EPm yaklaşımlarından elde edilen şev göçme mekanizmaları sırasıyla Şekil 4a ve 4b'de sunulmaktadır. Stabilite analizinden elde edilen artımsal yer değiştirme konturleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Stabilite analizinden elde edilen sonuçlar ve kazıkların etkisiyle F_s değerlerinde gözlenen artışlar (ΔF_s) Tablo 4'te özetlenmektedir. Stabilite analizlerinde F_s değerinin doğru hesaplanması için için için ΣM_{sf} 'in kararlı duruma ulaşması gerekmektedir. Bu koşulunun sağlandığı göstermek için ΣM_{sf} – Maksimum faz yer değiştirmesi eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur.

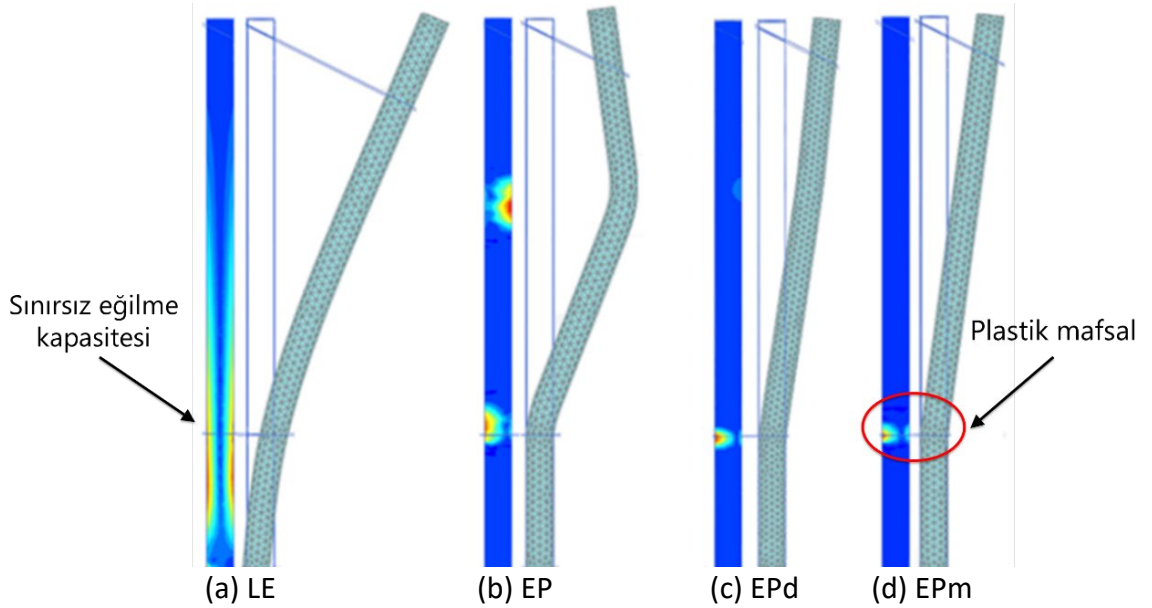
Tablo 4. Stabilite analizinden elde edilen sonuçlar

Kazık modeli	LE	EP	EPd	EPm
F_s	1.404	1.19	1.224	1.238
ΔF_s	0.29	0.076	0.11	0.124

Şekil 3a'da gösterilen LE yaklaşımında kazık tepesinde yüksek yer değiştirmeler mevcutken, kazık artımsal (inkremental) kesme deformasyonu dağılımında o bölgede özel bir



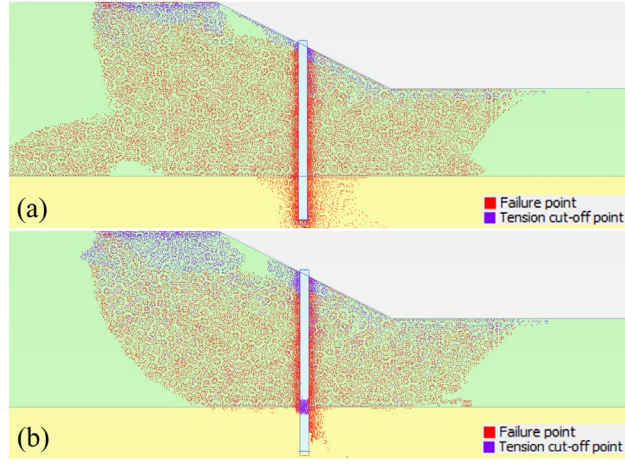
konsantrasyon görülmemiştir. Bu durum LE yaklaşımında kazıkların nihai eğilme momenti (M_{ult}) kapasitesinin sınırsız olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, Şekil 4a'da görülen şev göçme mekanizmasında kazıklar sıkı kum zemine yük aktarmaya devam etmekte ve sıkı kum zeminin daha büyük bir kısmını mobilize edebilmektedir. Bu nedenle, LE yaklaşımı diğer modellere kıyasla daha yüksek F_s değeri hesaplamıştır (bkz. Tablo 4). Ancak, Şekil 4b'de görüldüğü gibi, elastoplastik modellenen kazıkların M_{ult} kapasitelerine ulaşmalarıyla kil-sıkı kum zemin geçişinde plastik mafsall oluşması ve kum zemine yük aktarımının durması daha olasıdır. Bu sebeple, Şekil 3a'da görülen göçme mekanizması anlamlı değildir. Şekil 3b'de görülen artımsal kesme deformasyonu konsantrasyonlarından, EP yaklaşımında kazığın iki noktasında plastik mafsall oluştuğu ve bu sebeple en düşük F_s değerinin hesaplandığı anlaşılmaktadır. EP yaklaşımında boyuna donatılar hesaba katılmadığı için bu model yaklaşımlar içinde en düşük M_{ult} kapasitesi sahiptir ve bu sebeple en düşük F_s değerini hesaplaması makuldür. Şekil 3c'de görülen EPd yaklaşımı kullanıldığında ise, kazığın kum zemine soketlendiği derinlikte tek bir plastik mafsall oluşmuştur ve boyuna donatılar sayesinde EP modeli kullanarak elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek bir F_s değeri hesaplanmıştır. Donatıyı dikkate alan EPd ve EPm yaklaşımları kullanıldığında benzer göçme mekanizmaları (bkz. Şekil 3c ve 3d) ve karşılaştırılabilir F_s değerleri (bkz. Tablo 4) gözlenmiştir. EPd ve EPm yaklaşımlarının, kazıkların M_{ult} kapasitelerine ulaşmalarıyla kil-sıkı kum zemin geçişinde plastik mafsall oluşumuna olanak sağladığı gözlenmiştir. Bu iki yaklaşımın, kazığın göçmesini de göz önünde bulunduran en kritik göçme modunu modelleyebildikleri görülmektedir.



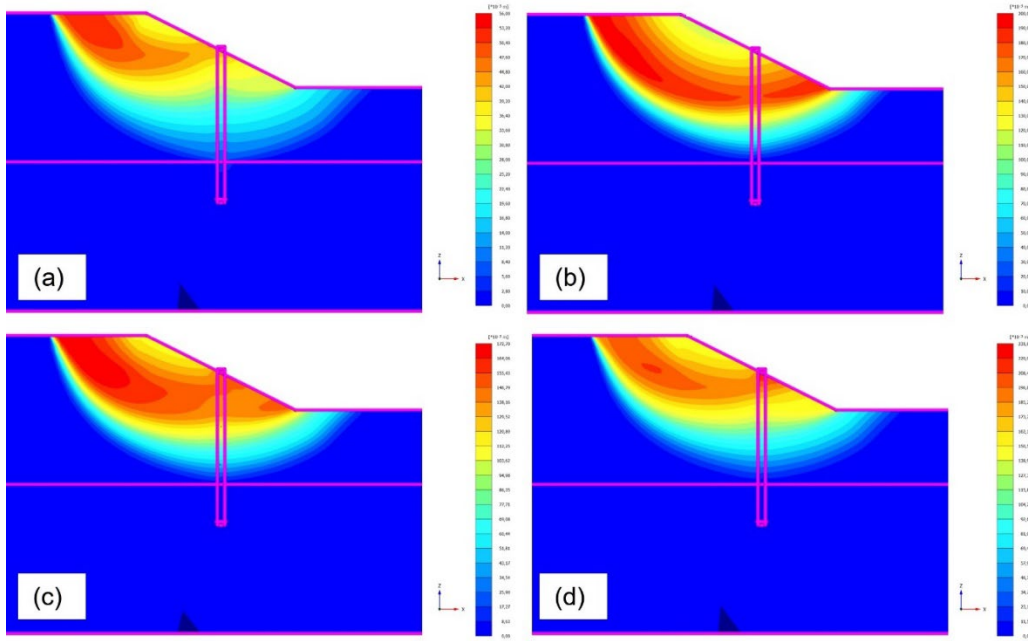
Şekil 3. Stabilite analizinden elde edilen kazık artımsal kesme deformasyonu konturleri (solda) ve deformasyon mekanizmaları (sağda): (a) LE, (b) EP, (c) EPd, (d) EPm

Şev kazık sisteminin bütünleşik göçme mekanizması artımsal yer değiştirme konturleri üzerinden de incelenebilir. Şekil 5a incelendiğinde LE yaklaşımının Şekil 3a'daki davranışı sebebiyle göçmenin kazık ile şev tepesindeki yükleme arasında daha etkin olduğu görülmektedir. Şekil 5b'de görülen göçmede, EP kazıkların sisteme sağladığı stabilite etkisinin az olması sebebiyle göçme şev topuğuna kadar uzanmaktadır. Donatının katkısını

da göz önüne alan EPd ve EPM modellerinde ise (bknz. Şekil 5c ve 5d), EP yaklaşımına kıyasla daha elverişli göçme mekanizmaları gözlenmiştir.

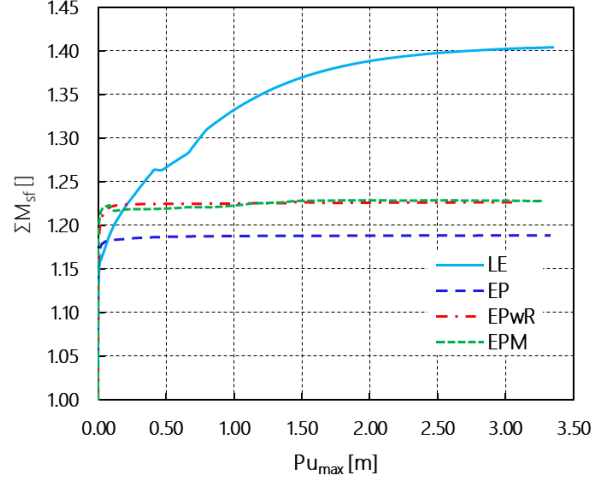


Şekil 4. Stabilite analizinden elde edilen göçme mekanizmaları: (a) LE, (b) EPM



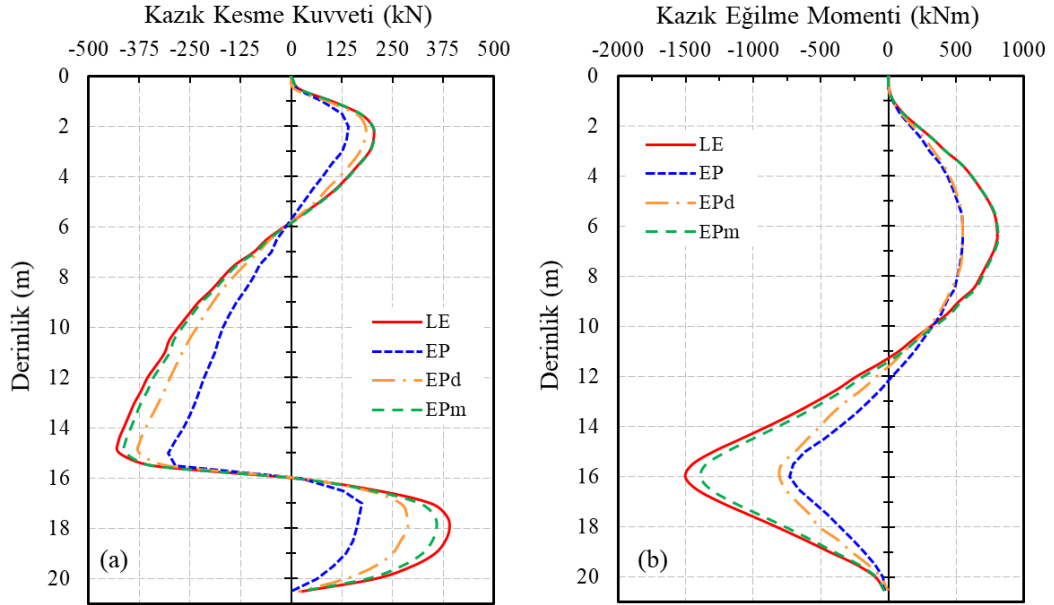
Şekil 5. Stabilite analizinden elde edilen artımsal yer değiştirme konturleri: (a) LE, (b) EP, (c) EPd, (d) EPM

Ayrıca, LE yaklaşımında, göçme durumunda kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti (M_{max}) değeri 16444 kNm olarak hesaplanmıştır. EPM yaklaşımında ise bu değer 2176 kNm'dir. LE yaklaşımında hesaplanan M_{max} değerinin, Gerolymos vd. (2014) tarafından yaklaşık 2200 kNm olarak hesaplanan M_{ult} değerinin çok üstünde olduğu görülmektedir. Hiçbir elastoplastik model, M_{ult} kapasitesini aşmamış ve sayısal olarak hesaplanan M_{max} değeri, M_{ult} değerine yaklaştığında EPM modelindeki F_s artışının durduğu teyit edilmiştir. Sonuçlar, kazıklarla stabilize edilmiş şevlerin analizinde kazıkları lineer elastik parametrelerle modellemenin makul olmayan F_s değerlerine yol açabileceğini vurgulamaktadır.

Şekil 6. ΣM_{sf} – Maksimum faz yer değıştirmesi eğrileri

3.2. Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu - Deformasyon Analizi

Yükleme sonucunda oluşan yer değıştirmelerin ve kazık iç kuvvetlerinin, hizmet görebilirlik sınır durumu kriterlerini karşılayıp karşılamadığının kontrol edilmesi önem taşımaktadır. 100 kPa yüklemesi durumu için, çeşitli kazık modelleme yaklaşımları kullanılarak deformasyon analizlerinden elde edilen kazık kesme kuvveti ve eğilme momenti değeri sırasıyla Şekil 7a ve Şekil 7b'de sunulmaktadır.



Şekil 7. Birinci yüklemesi durumunda hizmet görebilirlik sınır durumu için kazık iç kuvvetleri: (a) kesme kuvveti, (b) eğilme momenti

Şekil 7'de görüldüğü gibi, tüm yaklaşımlarda kazık kesit tesirleri benzer şekil ve davranış göstermektedir. Özellikle LE ve EPm yaklaşımlarının sonucunda benzer kazık kesit tesirleri hesaplandığı gözlenmiştir. Bu benzerlik, şevnin stabilize edilmeden önceki F_s değeri göçme durumuna kritik derecede yakın olmamasından ($F_s=1.144$) kaynaklanmaktadır. 100



kPa yükleme durumunda sisteme kazıkların dahil edilmesi, yükleme nedeniyle killi şevde oluşan kuvvetlerin bir kısmının kazıklar aracılığıyla sıkı kum katmanına etkin bir şekilde aktarılmasına olanak sağlamıştır. Bu aktarım, kazıkların M_{ult} kapasitelerine yaklaşımdan şevin stabilitesini artırmıştır. Kazıklar, M_{ult} kapasitelerinin altında yüklemeye maruz kaldığı için (LE modeli için sınırsız ve EPm modeli için yaklaşık 2200 kNm), oluşan deformasyonlar lineer elastik bölgede kalmıştır ve bu da kazıkların yüksek plastik deformasyonlara maruz kalmadan bu eğilme momentlerini taşımalarını sağlamıştır. EP ve EPd yaklaşımları kullanıldığında ise aynı yükleme koşulunda LE ve EPm yaklaşımlarına kıyasla daha küçük kesit tesirleri hesaplanmıştır. EP yaklaşımında, deformasyon analizi sırasında plastik mafsalların oluşmaya başladığı gözlenmiş ve bu da kazıkların daha fazla yüklenmesini durdurmuştur. Sonuçlar, EP yaklaşımında olduğu gibi boyuna donatıyı dikkate almadan sadece betonun mukavemet parametrelerine dayalı olarak kazıkların modellenmesinin, ekonomik olmayan bir tasarıma yol açacağını göstermektedir. EPd yaklaşımı kullanılarak elde edilen kesit tesirleri, boyuna donatıların (kiriş elemanların) dahil edilmesi nedeniyle biraz daha artış göstermiştir. Ancak EPd kullanıldığında gözlenen genel kazık davranışı EP yaklaşımı kullanıldığında elde edilenle benzerlik göstermektedir. Sonuçlar, EPd yaklaşımının, bütünleşik betonarme kazık davranışını modelleyemediğini göstermektedir. Bu sebeple elastoplastik yaklaşımlar arasında, EPm yaklaşımının incelenen problemdeki bütünleşik betonarme kazık davranışını daha iyi simüle ettiği görülmüştür. Sürşarj büyüklüğünün yükleme aşamasında kazık kesit tesirleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, 130 kPa yükleme durumu analiz edilmiştir. Bu yükleme sonucunda, kazıklarla stabilizasyon öncesi şevin F_s değeri 1.018 olarak hesaplanmıştır. Bu durumdaki F_s değerinin kritik göçme durumuna ($F_s \cong 1$) çok yakın olması sebebiyle, kazıkların deformasyon analizinde M_{ult} kapasitelerine yaklaşımları beklenmektedir. 100 kPa ve 130 kPa yükleme durumları için deformasyon analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 5'te özetlenmektedir. Tablo 5'te görüldüğü gibi, kazıkların M_{ult} kapasitelerine daha yakın yüklendiği durumda, LE ve EPm yaklaşımları kullanılarak farklı kesit tesirleri ve y_{max} değerleri hesaplanmıştır. LE yaklaşımında hesaplanan M_{max} değerinin, kazığın M_{ult} kapasitesinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, hizmet görebilirlik sınır durumunda LE modelinin kullanılmasının makul olmayan değerlerle yol açabileceğini göstermektedir. EPm yaklaşımı kullanıldığında ise, LE yaklaşımı kullanıldığında elde edilenden daha yüksek y_{max} değerleri elde edilirken, M_{max} değeri M_{ult} 'tan daha düşüktür. EPm yaklaşımının, incelenen örnek bağlamında gerçekleştirilen deformasyon ve stabilite analizlerinde en avantajlı yaklaşım olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Hizmet görebilirlik sınır durumu için kazık kesit tesirleri ve yer değiştirmeleri

Yükleme durumu	q=100 kPa		q=130 kPa	
Kazık modelleme yaklaşımı	LE	EPm	LE	EPm
$M_{max}^{(1)}$ (kNm)	1541	1436	2987	1982
$T_{max}^{(2)}$ (kN)	429	418	772	589
$y_{max}^{(3)}$ (cm)	8.4	8.5	20.2	21.6

Not: ⁽¹⁾ M_{max} : Maksimum eğilme momenti ⁽²⁾ T_{max} : Maksimum kesme kuvveti ⁽³⁾ y_{max} : Maksimum yanıl kazık başı yer değiştirmesi



4. SONUÇLAR

Bu çalışma, betonarme kazıklarla stabilize edilmiş şevlerin deformasyon ve stabilite analizlerinde, kazıkları elastoplastik modellemenin sonuçlar üzerindeki etkisini göstermeyi amaçlamaktadır. Drenajsız yükleme koşulları altında kazıklarla stabilize edilmiş killi bir şev örneğinde yapılan bu analizlerin sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:

- Mevcut yükleme koşulları altında kazıklar yapısal kapasitelerine yaklaşmadığı sürece LE yaklaşımının deformasyon analizinde makul kesit tesirleri hesaplayabildiği görülmüştür. Kritik yükleme durumlarında ise kazıklar yapısal kapasitelerine yaklaşmakta ve LE yaklaşımı deformasyon analizinde güvenilir olmayan kazık kesit tesirleri ve yer değiştirme değerleri hesaplanmaktadır.
- LE yaklaşımı, stabilite analizinde kazıkların yapısal olarak göçmesine izin vermediği için betonarme kazık davranışını etkili bir şekilde simüle edememekte ve bu sebeple yüksek F_s değerleri hesaplanmaktadır.
- Donatıları hesaba katmayan EP yaklaşımında, deformasyon analizi sırasında plastik mafsalların erken gelişimi kazıkların daha fazla yüklenmesini engellemiştir. Bu sebeple, EP yaklaşımının deformasyon ve stabilite analizlerinde ekonomik olmayan sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Donatıların kiriş eleman olarak eklendiği EPd yaklaşımında boyuna donatıların hesaba katılması kazık kapasitesinde kısmi artışa neden olmakta ve EP yaklaşımına kıyasla daha yüksek F_s değerlerinin hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Ancak, boyuna donatıların modele eklenmesi modelleme eforunu ve sayısal hesaplama süresini oldukça arttırmaktadır.
- Donatıları kiriş eleman olarak eklemeyen, betonarme yapıyı simüle eden Epm yaklaşımının deformasyon ve stabilite analizlerinde makul kazık kesit tesirleri hesapladığı görülmüştür. EPd yaklaşımına göre, modellemede kolaylık sağlayan Epm yaklaşımı, daha kısa sayısal hesaplama süresine de sahiptir. Epm yaklaşımı, kazıkların yapısal olarak göçmesini de göze alan en kritik şev göçme modunu yansıtabilmektedir. Bu sayede, kazıkların yapısal olarak göçmesini dikkate almayan yaklaşımlara göre daha düşük ve güvenilir F_s değerleri hesaplanabilmektedir. Sonuçlar, betonarme kazıkların modellenmesinde kullanılan Epm yaklaşımının bu çalışmada incelenen kazıklarla stabilize edilmiş şev problemi için değerlendirilen diğer yaklaşımlara göre daha uygun olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) 19855 numaralı proje kapsamında destekleyen Boğaziçi Üniversitesi'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Ardiaca, D. H. (2009), Mohr-Coulomb Parameters for Modelling of Concrete Structures, Plaxis Bull 25:12-15 20.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Fonseca, F., Ragi Manoj, N., Zampich, L., ve Zalamea, N. (2021), PLAXIS 3D 2021 Reference Manual, PLAXIS bv. Delft, The Netherlands.



- Ellis, E., Durrani, I., ve Reddish, D. (2010), "Numerical Modelling of Discrete Pile Rows for Slope Stability and Generic Guidance for Design", *Geotechnique*, 60(3), 185-195.
- Fantera, L., Lirer, S., Desideri, A., ve Rampello, S. (2022), "Efficiency of Piles Stabilizing Slopes in Fine-grained Soils", *International Journal of Geomechanics*, 22(9).
- Gerolymos, N., Papakyriakopoulos, O., ve Brinkgreve, RBJ. (2014), "Macroelement Modeling of Piles in Cohesive Soil Subjected to Combined Lateral and Axial Loading", In *Proceedings of the 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 373-378, Delft, Netherlands.
- Jiang, J., Huang, X., Shu, X., Ning, X., Qu, Y., ve Xiong, W. (2022), "Application of a Damage Constitutive Model to Pile-Slope Stability Analysis", *Frontiers in Materials*, 9.
- Kanagasabai, S., Smethurst, J. A., ve Powrie, W. (2011), "Three-dimensional Numerical Modelling of Discrete Piles used to Stabilize Landslides", *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1393-1411.
- Kazakov, K., Mihova, L., ve Partov, D. (2020), "Constitutive Models for FE Analysis of Pile Founded Buried Arch Bridge", In *Proceedings of the 11th International Conference on Civil Engineering Design and Construction*, 10-12, Varna, Bulgaria.
- Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I., ve Gazetas, G. (2011), "Slope Stabilizing Piles and Pile-Groups: Parametric Study and Design Insights", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(7), 663-677.
- Laudemen, S., ve Chang, N. (2004), "Finite Element Analysis of Slope Stabilization Using Piles", In *Proceedings of the Geotechnical Engineering for Transportation Projects Conference*, 126, Los Angeles, California, USA.
- Liang, R. Y., Joorabchi, A., ve Li, L. (2014), "Analysis and Design Method for Slope Stabilization Using a Row of Drilled Shafts", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5).
- Maatkamp, T.W.P. (2016), *The Capabilities of The Plaxis Shotcrete Material Model for Designing Laterally Loaded Reinforced Concrete Structures in The Subsurface*. MSc Thesis, Delft University of Technology.
- Ng, C. W. W., Zhang, L., ve Ho, K. (2001), "Influence of Laterally Loaded Sleeved Piles and Pile Groups on Slope Stability", *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 553-566.
- Pirone, M., ve Urciuoli, G. (2018), "Analysis of Slope-stabilising Piles with The Shear Strength Reduction Technique", *Computers and Geotechnics*, 102, 238-251.
- Wei, W. I., ve Cheng, Y. (2009), "Strength Reduction Analysis for Slope Reinforced with One Row of Piles", *Computers and Geotechnics*, 36(7), 1176-1185.

