

ANKRAJLI DERİN KAZI STABİLİTESİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİ İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE RELIABILITY OF AN ANCHORED DEEP EXCAVATION BY STABILITY ANALYSES

Tuba TEKE¹, Pelin ÖZENER², Mehmet M.BERİLGİN³

ÖZET

Bu bildiriye ankrajlarla desteklenen derin kazıların stabilitesinin güvenilirlik analizleri ile belirlenmesi ele alınmıştır. Bu kapsamda, kum zeminde yer alan tek sıra öngerme ankrajlı bir destekleme sisteminin güvenilirliği Monte Carlo Benzeşimi dikkate alınarak yapılan stabilite analizleri ile incelenmiştir. Stabilite analizleri Kranz Blok Göçme ve Mukavemet Azaltımı yaklaşımları ile yapılmıştır. Analizler Python Ekosistemi ile gerçekleştirilmiştir. Dört aşamada hesaplamaları gerçekleştiren bu kod, birinci aşamada öngerme ankrajlı destekleme sisteminin limit dengeye dayalı olarak boyutlandırmakta, ikinci aşamada Kranz Yöntemi ile blok göçme analizi yapmakta, üçüncü aşamada verilen bilgiler ve hesaplanan verileri Plaxis 2D yazılımına aktararak adimsal sayısal analizler gerçekleştirmesini sağlamakta ve son aşamada Monte Carlo Simülasyonu ile ikinci ve üçüncü aşamadaki hesapların yinelenmesini organize ederek sonuçları oluşturduğu database'e aktarmakta ve grafikler çizdirmektedir. Homojen kumun kayma mukavemeti açısı (ϕ) ve tanjant elastisite modülünün (E_{50}^{Ref}) olasılık dağılım fonksiyonları hesaplarda girdi olarak tanımlanmıştır. ϕ için log-normal dağılım, E_{50}^{Ref} için normal dağılım dikkate alınmıştır. Adezyon açısı (δ) kayma mukavemeti açısına, ödometre ve boşaltma modülleri (E_{oed}^{Ref} , E_{ur}^{Ref}) tanjant elastisite modüllerine bağlı olarak dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda elde edilen güvenlik sayıları ile maksimum yanal yer değiştirmeler dikkate alınarak grafikler çizdirilmiş ve güvenlik sayıları ile kazının toptan göçme olasılığı ve güvenilirlik indeksi (β) hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazı Destekleme Sistemleri, İksa Yapıları, Ankrajlı Perdeler, Güvenilirlik Analizi, Olasılık Hesapları

ABSTRACT

This paper investigates the reliability of a deep excavation supported by an anchored wall on sandy ground. Stability analyses were done using Monte Carlo Simulations for a single-row prestressed anchor. Python code was utilized for calculations in four steps. First, dimensions of the anchorage system were defined using limit equilibrium analysis. Then, block failure analysis was performed using the Kranz method. In the third step, numerical calculations were conducted with Paxis 2D using previous data. The fourth step involved Plaxis automation for stability analysis in Monte Carlo simulations, creating graphs, and storing results in the database. Probability distribution functions were used for shear strength angle (ϕ) and tangent modulus of

¹ İnşaat Y.Müh., ..Şirketi, teketuba8@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fak., İnşaat Müh. Böl.

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fak., İnşaat Müh. Böl. (Emekli)

elasticity (E_{50Ref}), with log-normal and normal distributions considered. Adhesion angle (δ) depended on the shear strength angle, while odometry and release moduli (E_{oed}^{Ref} , E_{ur}^{Ref}) were based on the tangential elastic modulus. The factor of safety and the factor of maximum lateral displacement are plotted. Estimate the general failure probability and block failure probability for excavation and calculate the (β)-reliability index.

Keywords: Excavation Support Systems, Shoring Structures, Anchored Curtains, Reliability Analysis, Probability Calculations

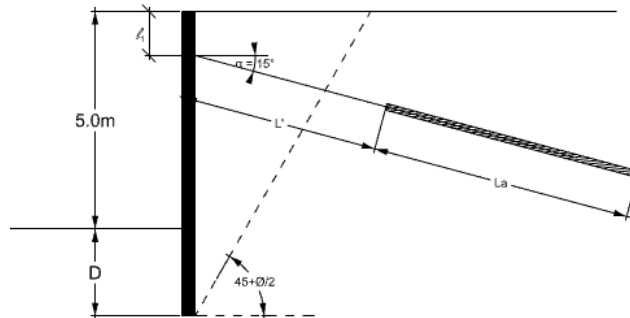
1. GİRİŞ

Derin kazıların öngermeli ankrajlarla desteklenmesi, geoteknik mühendisliğinde yaygın bir uygulamadır. Bu yönetmelik veya standartlarda yük ve jeolojik ortamdaki belirsizlikler ile uygulama hatalarının meydana getireceği olumsuzlukları önlemek için tasarımda güvenlik sayısı ve/veya yük-malzeme katsayıları kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Aynı zamanda inşaat yönetimi, hukuk ve sigorta işlemleri için risklerin rakamsal olarak ifade edilmesi gerekebilir. Gelişen bilişim olanakları, olasılığa dayalı analizlerin kullanımını artırarak Excel, MATLAB, R programming, Python gibi programlama dilleri ile kolaylıkla gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Bu sayede sonlu elemanlar yöntemi gibi nonlinear mühendislik problemlerinin olasılık veya güvenilirlik analizleri hızlı ve etkili bir şekilde yapılabilir. Schweiger ve Thurner (2007) Plaxis yazılımı ile bir konsol palplanşla desteklenen kazı ve bir tünel kazısının nümerik simülasyonu için Nokta Tahmin Yöntemi ile olasılığa dayalı sayısal analizler yaparak bu konuda geoteknik mühendisliğindeki ilk çalışmalardan birini gerçekleştirmişlerdir. Ankrajlı destekleme sistemlerinin güvenilirlik analizleri ile incelenmesi konusunda Cherubini (1999), Cushing vd. (2003), Basha ve Babu (2008), Aslay(2013), Rippi ve Teixeira (2016), Bozkurt ve Akbaş (2023), Low(2005), Schweckendiek vd. (2006), Rippi (2016), Sert vd. (2016), Sekhavatian ve Choobbasti (2018), Chai (2019), Roy ve Hazra (2019) tarafından yapılan çalışmalar dikkate değerdir.

Bu bildiri de öngörme ankrajla desteklenen bir derin kazının stabilitesinin güvenilirlik analizleri ile belirlenmesi ele alınmıştır. Bu kapsamda, kum zeminde yer alan tek sıra öngörme ankrajlı bir destekleme sisteminin güvenilirliği Monte Carlo Benzeşimi dikkate alınarak yapılan blok göçme ve sayısal analizler ile incelenmiştir. Stabilite analizleri Kranz Blok Göçme ve Mukavemet Azaltımı yaklaşımları ile yapılmıştır. Dikkate alınan öngörme ankrajlı destekleme yapısının güvenilirliğe göre tasarımı için limit dengeye dayalı olarak destekleme elemanlarının boyutlandırılması yapıldıktan sonra stabilite tahkikleri ile olası güvenlik durumu hesaplanmıştır. Stabilite tahkikleri blok göçme ve mukavemet azaltımı yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Blok göçme analizinde Kranz Yöntemi esas alınmış, mukavemet azaltımı ile stabilite analizi ise sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis ticari yazılımı ile, elasto-plastik zemin davranışı dikkate alınarak yapılmıştır. Tüm bu hesap adımları Python programlama dili ile yazılan bir kod ile yürütülmüştür. Bu kod destekleme sisteminin limit dengeye göre boyutlandırılmasını standartlara uygun şekilde iterasyonla bulduktan sonra blok göçme analizleri ve olasılık hesaplarını yapmakta ve Plaxis yazılımının otomasyonunu sağlayarak onunla bilgi alışverişi yapılabilmektedir.

2. DESTEKLEME SİSTEMİ

Dikkate alınan öngörme ankrajlı perde 5m yüksekliğinde olup bir homojen kum zeminde yer aldığı kabul edilmiştir. Destekleme sisteminin geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de verilen destekleme sistemi perdenin gömülü ucunun zemine sabit mesnetlendiği kabulü ile yapılan limit denge analizi ile boyutlandırılmıştır. Destekleme sisteminin boyutlandırılması için yapılan analizlerin ayrıntıları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 1. Dikkate alınan öngerme ankrajlı destekleme sistemi

3. MALZEME PARAMETRELERİ

Deterministik analizlerde ve güvenilirlik analizlerinde kum zemin için göz önüne alınan malzeme parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu malzeme değerleri Brinkgreve vd. (2010) ile Phoon ve Kulhawy(1999) tarafından yapılan çalışmalardan alınmıştır. Güvenilirlik analizleri için kayma mukavemeti açısı ve elastisite modüllerinin olasılık dağılım fonksiyonları dikkate alınmıştır. Sayısal analizlerde Hardening Soil Model bünye modeli kullanıldığından tanjant modülü E_{50}^{Ref} ’e bağlı olarak referans ödometre modülü ($E_{oed}^{Ref} = E_{50}^{Ref}$) ve referans boşaltma modülü ($E_{ur}^{Ref} = 3E_{50}^{Ref}$) değerleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Analizlerde dikkate alınan malzeme parametreleri

Tanım	Sembol	Birim	En Olası Değer	Standart Sapma	Olasılık dağılımı
Birim Hacim Ağırlık	γ	kN/m ³	17	-	-
Kohezyon	c	kPa	0	-	-
Kayma Mukavemeti Açısı	ϕ	°	35	2,64	log-normal
Gevşeme Açısı	ψ	°	Ø-30	-	-
Tanjant Elastisite Modülü	E_{50}^{Ref}	MN/m ²	35	7	normal
Poisson Oranı	ν	-	0,20	-	-
Arayüz Oranı	R_{inter}	-	$\tan(\frac{2}{3}\phi)/\tan\phi$	-	-

Destekleme sisteminde 50 cm kalınlığında betonarme perde ve 3 adet 0,6” öngerme halatı ile 30cm çapında enjeksiyonla oluşturulan bir ankraj kökü dikkate alınmıştır. Bu destek elemanı boyutlarına göre analizlerde kullanılan mekanik parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Destekleme elemanlarının mekanik parametreleri

Eleman	d(m)	A(m ²)	l(m ⁴)	E(MPa)
Perde	0.50	1.04e-2	2.0e4	-
Ankraj	3x0,0152	5,74e-4	-	1.9e5
Ankraj Kökü	0.15	1.77e-2	2,48e-5	2.0e4

4. DETERMİNİSTİK ANALİZLER

Deterministik analizler yukarıda anıldığı gibi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda zemine sabit mesnetlenen bir palplanş perde kabülü ile tek sıra ankrajlı destekleme sisteminin gömülme derinliği ve ankraj kuvveti belirlenmiştir. Bu analizde toprak basınçları Rankine Toprak Basıncı Teorisi’ne göre bulunmuştur. İkinci adımda ankraj serbest uzunluğu ve kök uzunluğu hesaplanmış ve birinci adımda bulunan ankraj kuvveti değeri kullanılarak ankraj aralıkları belirlenmiştir. Ankraj kök uzunluğu ve ankraj aralığı güvenlik sayısı 1.5 kabul edilerek nihai ankraj taşıma gücünden hesaplanılmaktadır (Hanna, 1982). Bu hesapta adezyon açısı kayma mukavemeti açısının 2/3 katı alınmıştır. Ankraj aralığı (s) için $1.2 < s < H/2$ kriteri göz önünde bulundurularak ankraj kök uzunluğu ve ankraj aralığı belirlenmiştir. Bu analizlerden belirlenen destekleme sistemi boyutları ve ankraj kuvveti değerleri program çıktısı olarak Şekil 2’de verilmiştir.

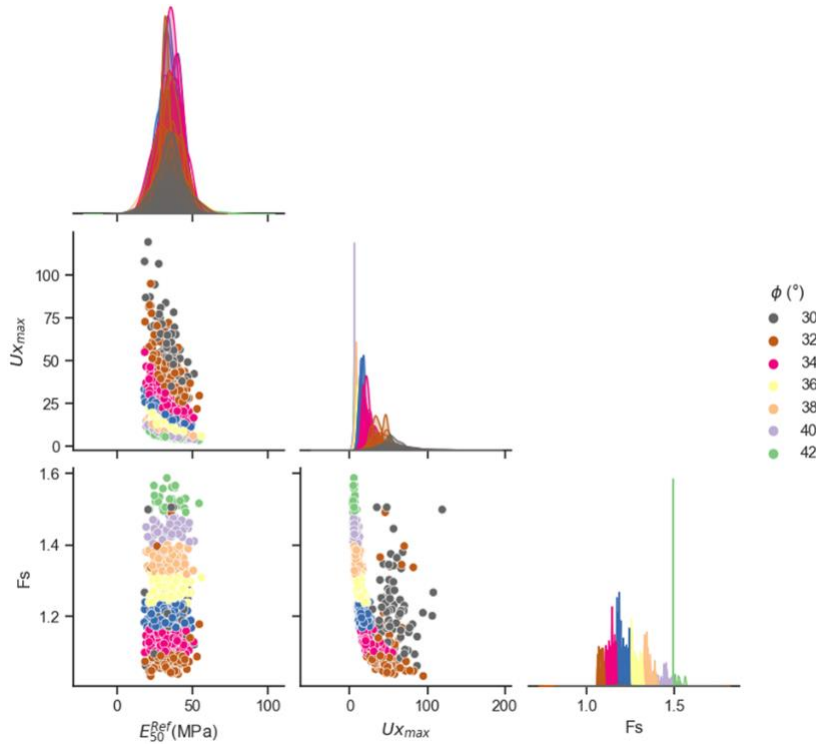
Serbest Ankraj uzunluğu= 3.14 m, Ankraj kök uzunluğu = 6 m
 Palplanş çakma derinliği= 1.24 m
 Ankraj yatay aralığı = 1.4 m
 Nihai Ankraj Kuvveti= 92.3 kN
 Toplam perde uzunluğu= 6.736 m
 s= 1.4 m Lk= 6 m

Şekil 2. Python kodundan alınan deterministik limit denge analizi sonucu

Şekil 2’de görüldüğü gibi teorik perde gömülme derinliği $D=1.24\text{m}$ hesaplanmıştır. Bu değer uygulama için 1.4 faktörü ile çarpılarak toplam perde boyu belirlenmiştir.

Deterministik analizlerin üçüncü adımında boyutları ve ankraj kuvveti belirlenen destekleme sistemi için Kranz Yöntemi (Kranz, 1953) ile blok göçme analizi yapılmıştır. Blok göçme analizi sonucunda güvenlik sayısı $F_s=1.494$ bulunmuştur.

Dördüncü adımda Plaxis yazılımı ile kazı ve inşaa adımları izlenerek nihai kazı derinliği için ankrajlı sistemin gerilme şekil değiştirme ve stabilite analizleri yapılmıştır. Yeraltı suyunun mevcut olmadığı varsayılmıştır. Sayısal analizler sonucunda maksimum yanıl yer değıştirme ve güvenlik sayısı değeri $U_x, \text{max}=6.6$ ve $F_s=1,905$ olarak bulunmuştur. Perdede hesaplanan maksimum yanıl yer değıştirme U_x, max . ve toptan göçme analizinden hesaplanan güvenlik sayısının farklı kayma mukavemeti açılarna (KMA) göre tanjant elastisite modülü ($E_{50\text{Ref}}$)ne göre değışimleri ve karşılaştırılmaları toplu olarak Şekil 3’de verilmiştir.

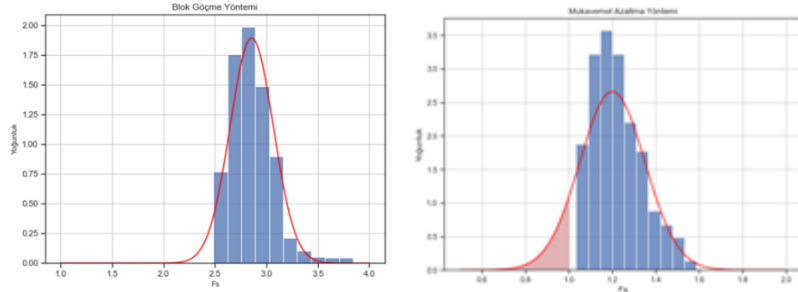


Şekil 3. Sayısal analizlerle nihai kazı durumunda hesaplanan max. yanıl yerdeğıştirme ve güvenlik sayısının farklı kayma mukavemeti açılarna için tanjant modülü $E_{50\text{Ref}}$ e göre değışimi

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi yanıl yer değıştirmeler elastisite modülü ve kayma mukavemeti açısının değışiminden önemli oranda etkilenmektedir. Yerdeğıştirmenin bu parametrelere göre değışimi nonlineer olup bu değışim kayma mukavemeti açısı değeri küçüldükçe elastisite modülüne göre değışim daha fazladır. Güvenlik sayısı beklendiği şekilde kayma mukavemeti açısına göre değışim göstermekte ve elastisite modülünden etkilenmemektedir. Güvenlik sayısının yanıl yer değıştirme ile değışimi nonlineer olup dikkate alınan düşük kayma mukavemeti açılarna (30° - 32°) saçılım göstermiştir. Bu saçılımın mukavemet azaltımı analizlerinin yeterince yakınsamamasından kaynaklanmıştır.

5. GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİ

Öngerme ankrajlı destekleme sisteminin güvenilirlik analizleri, Monte Carlo Simülasyonu ile yapılmıştır. Olasılık dağılım fonksiyonlarına uygun olarak rastgele parametrelerle analizler yapılmış ve sonuçların olasılık dağılımları elde edilmiştir. Öngerme ankrajlı destekleme sisteminde, kayma mukavemeti açısı ve elastisite modülleri için olasılık dağılım fonksiyonları kullanılmıştır. Kayma mukavemeti açısı için log-normal dağılım, elastisite modülleri için ise normal dağılım kabul edilmiştir. Kayma mukavemeti açısı 28° ile 40° arasında, tanjant elastisite modülü E_{50}^{Ref} ise 18 MPa ile 60 MPa aralığında sınırlandırılmıştır. Ödometre ve boşaltma modüllerinin rastgele değerleri, Tablo 1'de verilen tanjant modülüne göre üretilmiştir. Öngerme ankrajlı destekleme sisteminin güvenilirlik analizleri için yapılan 2000 çevrimlik Monte Carlo Simülasyonunda, Blok Göçme ve Mukavemet Azaltımı Yöntemleri'nden elde edilen güvenlik sayılarının olasılık histogramları Şekil 4a ve 4b'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Monte Carlo Simulasyonu ile elde edilen güvenlik sayıları (a) Kranz (b) Mukavemet azaltımı

Şekil 4a ve 4b'de gösterilen histogramlara göre, 1000 çevrimlik Monte Carlo Simülasyonu sonuçlarına dayanarak Kranz ve Mukavemet Azaltımı yöntemleriyle elde edilen güvenlik sayılarının ortalama ve standart sapma değerleri belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak elde edilen normal dağılımlar histogramlara yerleştirilmiştir. Her iki göçme durumu için güvenlik sayısının 1.0'dan küçük olma olasılığını veren P_f değeri kolaylıkla hesaplanabilir (Şekil 4a). P_f 'nin hesaplanması, analiz sonuçlarındaki belirsizliğin genel bir ölçüsünü sağlar. Daha kesin P_f değerleri için log-normal güvenilirlik indeksi, β_{LN} 'nin aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Duncan, 2000):

$$\beta_{LN} = \frac{\ln\left(\frac{F_{MLV}}{1+V^2}\right)}{\sqrt{\ln(1+V^2)}} \quad (1)$$

burada β_{LN} = lognormal güvenilirlik indeksi; V = güvenlik faktörünün değişim katsayısı; ve F_{MLV} = güvenlik sayısının en olası değerini göstermektedir. β_{LN} hesaplandığında, P_f değeri standart kumulatif normal dağılım fonksiyonunun tablolarından, Excel gibi bir hesap tablosu yazılımından veya Matlab, Python gibi bilişim ekosistemlerinin kütüphanelerindeki modüller yardımı ile hesaplanabilir. Burada Python'un Scipy ve Numpy modülleri kullanılmıştır.

Tablo 3. Güvenilirlik analizleri sonuçları

Yöntem	F_{MLV}	V	β_{LN}	P_f
Kranz	1,495	0,041	9.770	5,8e-16
Muk. Azaltımı	1,223	0,083	3,935	0.0257

Tablo 3'ten görüldüğü gibi Kranz Yöntemi'nde en olası güvenlik sayısı değeri 1,495, varyasyonu 0,041, güvenilirlik indeksi β_{LN} 9,77 ve göçme olasılığı P_f %0 mertebelerinde belirlenmiştir. Genel göçme durumu için

mukavemet azaltımı yönteminden elde edilen en olası güvenlik sayısı 1.223, varyasyonu 0.083, güvenilirlik indeksi 3,935 ve göçme olasılığı P_f %2.6 mertebelerinde bulunmuştur. Bu verilere göre tasarımda dikkate alınan verilere göre inceleme konusu destekleme yapısının blok göçmeye güvenilirliği %0 ve toptan göçmeye karşı güvenilirliği %97.4 olmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu bildiriye, öngermeli ankrajla desteklenen bir derin kazının stabilitesinin güvenilirlik temelinde incelenmiştir. Bu amaçla Monte Carlo Benzeşimi, Kranz Blok Göçme ve Mukavemet Azaltımı yöntemleri kullanılmıştır. Analizler, Python Ekosistem olanaklarıyla yazılan bir kod ile gerçekleştirilmiştir. Bu kod, verilen kazı derinliği ve malzeme parametreleri dikkate alınarak boyutlandırılan destekleme sisteminin blok göçme analizleri ve mukavemet azaltımı yöntemi için gerilme şekil değiştirme analizlerinin otomasyonunu sağlamış ve sonuçları grafiklere dönüştürmüştür. Ayrıca, her iki stabilite durumu için göçme olasılığı ve belirsizlik katsayısı belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmalardan şu sonuçlar çıkarılabilir:

1) Geoteknik mühendisliği pratiğinde güvenlik analizlerine genellikle ihtiyaç hissedilmese de inşaat yönetimi, hukuk ve sigorta işlerinde riskin rakamsallaştırılmasına ihtiyaç vardır. Günümüz bilişim imkanları ile bu ihtiyaç geoteknik mühendisleri tarafından kolaylıkla karşılanabilir.

2) Yönetmeliklerle belirlenen deterministik güvenlik sayıları, farklı zemin ve çevre koşullarında aynı uygulanır ve aşırı güvenli tasarımlara yol açabilir.

3)Güvenilirliğe göre tasarımda deterministik analizler yanında modellemede olasılık dağılım fonksiyonları kullanıldığı için belirsizliğin durumunu belirlemek mümkündür. Bundan dolayı güvenilirliğe göre tasarımın deterministik tasarımdan daha kapsamlıdır.

4)Model parametrelerinin mekansal ve/veya zamana bağlı değiştiği durumlarda, örneğin deniz aşırı yapılar, güvenliğe dayalı tasarımın tercih olunması daha uygun bir mühendislik yaklaşımı olduğu açıktır.

KAYNAKLAR

- Schweiger, H. F., & Thurner, R. (2007). Basic concepts and applications of point estimate methods in geotechnical engineering. In *Probabilistic methods in geotechnical engineering* (pp. 97-112). Vienna: Springer Vienna.
- Cherubini, C. (1999). Probabilistic approach to the design of anchored sheet pile walls. *Computers and Geotechnics* 26 (3), 309-330.
- Cushing, A. G., Withiam, J. L., Szwed, A., & Nowak, A. S. (2003). Reliability analysis of anchored and cantilevered flexible retaining structures. In *Limit State Design In Geotechnical Engineering Practice: (With CD-ROM)*.
- Basha, B.M. and Sivakumar Babu, G.L. (2008). Target reliability based design optimization of anchored cantilever sheet pile walls. *Canadian Geotechnical Journal* 45(4), 535-548.
- Aslay, Z. (2013). Derin Kazılara Komşu Yapılar İçin Geoteknik Risk Analizleri (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Rippi, K., & Teixeira, A. (2016). Reliability-based assessment of a retaining wall using FEM. In *Proceedings of the 25th European Young Geotechnical Engineers Conference*.
- Bozkurt, S., & Akbas, S. O. (2023). Finite element-based geotechnical risk analysis for anchor-supported deep excavations. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(8), 470.
- Low, B.K. (2005). Probabilistic design of anchored sheet pile wall. *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Vol. 4*, 2825-2828.
- Rippi, K., & Teixeira, A. (2016). Reliability-based assessment of a retaining wall using FEM. In *Proceedings of the 25th European Young Geotechnical Engineers Conference*.
- Sert, S., Luo, Z., Xiao, J., Gong, W., & Juang, C. H. (2016). Probabilistic analysis of responses of cantilever wall-supported excavations in sands considering vertical spatial variability. *Computers and Geotechnics*, 75, 182-191.

- Sekhvatian, A., & Janalizadeh Choobbasti, A. (2018). Comparison of Point Estimate and Monte Carlo probabilistic methods in stability analysis of a deep excavation. *International Journal of Geo Engineering*, 9(1), 20.
- Zheng, G., Yang, X., Zhou, H., & Chai, J. (2019). Numerical modeling of progressive failure of rigid piles under embankment load. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(1), 23-34.
- Roy, P., & Hazra, P. Probabilistic Analysis of Cantilever Sheet Pile Walls Using Copula Models.
- Hanna, A. M. (1982). Bearing capacity of foundations on a weak sand layer overlying a strong deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(3), 392-396.
- Brinkgreve, R, Engin, K. ve Engin, E., (2010) "Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands", 7th Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2010), Ed. Benz, T., Nordal, S., Trondheim, Norway
- Duncan, J.M., "Factors Of Safety And Reliability In Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 4, April 2000.
- Phoon, K-K. ve Kulhawy, F.H., (1999) "Characterization of geotechnical variability and Evaluation of geotechnical property variability", *Canadian Geotechnical Journal*; Aug 1999; 36, 4; 612-624.