

CFA KAZIKLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNE DAYALI ANALİZ SONUÇLARININ ARAZİ YÜKLEME DENEY SONUÇLARI İLE MUKAYESESİ

COMPARISON OF ANALYSIS RESULTS OF CFA PILES BASED ON FINITE ELEMENT METHOD WITH FIELD LOADING TEST

Sümeyye ARHAN¹

Evren SEYREK²

ÖZET

CFA (Continuous flight auger) sistemi 1950'lerde yüksek yeraltı suyu seviyesi bulunan zayıf ve kohezyonsuz zeminlerde, muhafaza ve foraj sıvısı kullanılmadan kazık imalatı için kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise kontrollü uygulama imkânı sağlaması, görece düşük titreşim oluşumu ve tork kapasitesi ile daha yaygın kullanım alanı elde etmiştir. CFA yönteminde içi boşluklu helezonik auger (kanat) ile derinlik boyunca kazıklar monoblok olarak imal edilir. Foraj işlemi sonrası, auger içindeki boşluktan basınçlı beton ile kuyu tabanından yukarı doğru doldurulur. Donatılı imalat yapılması durumunda, betonlama sonrası donatı kafesi yukarıdan kuyu içine indirilir.

Bu çalışma kapsamında, derin temel sistemi olarak CFA kolonlarının kullanıldığı bir vaka çalışması incelenmiştir. CFA kolon tasarımı sonlu elemanlar programı PLAXIS 2D ile üç farklı malzeme modeli üzerinde tasarlanmış olup, elde edilen analiz sonuçları yükleme deneyleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda, saha koşullarına bağlı olarak hangi modelin nümerik analizlerde seçilmesinin daha uygun olacağı tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin temeller, CFA kolon, zemin modelleri

ABSTRACT

The CFA (Continuous flight auger) system started to be used in the 1950s for the production of piles on weak and uncohesive soils with high groundwater levels, without the use of casing and forage fluids. Today, it has gained more widespread use with its controlled application opportunity, relatively low vibration generation and torque capacity. In the CFA method, piles along the depth are manufactured as monoblocks with hollow spiral auger (wing). After the forage process, it is filled upwards from the bottom of the well with pressurized concrete through the gap in the auger. In the case of reinforced manufacturing, after concreting, the reinforcement cage is lowered from above into the well.

Within the scope of this study, a case study using CFA columns as a deep foundation system was examined. CFA column design finite element program was designed on three different material models with PLAXIS 2D and the results of the obtained analysis were compared with loading experiments. As a result of the study, it was discussed which model would be more appropriate to choose in numerical analyzes depending on the field conditions.

Keywords: Deep foundation, CFA pile, soil models

¹ İnşaat Mühendisi, Moment Proje, sumeyyearhan@momentproje.com (Sorumlu Yazar)

² Doç.Dr., Dumlupınar Üniversitesi, evren.seyrek@dpu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ve yapılaşma nedeni ile arazi temininde problemler yaşanmaktadır. İhtiyaçları karşılamak için yüksek katlı yapılar, büyük hacimli baraj gövdeleri, geniş açıklıklı karayolları v.b. yapılar tasarlanmaktadır. Bu tür tasarımlar üstyapıdan gelen yüklerin artmasını beraberinde getirmektedir. Bu durumun çeşitli temel uygulamaları vasıtasıyla güvenli şekilde zeminlere taşınması, Geoteknik Mühendisliği açısından son derece önemlidir. Temeller üst yapıdan aktarılan çeşitli yükleri, zeminde taşıma gücü ve/veya oturma problemleri oluşturmadan taşıyabilmelidir. Temellerin genişletilmesi ve derinleştirilmesi gibi geleneksel yöntemlerle bu kriterlerin ikisinin birden sağlanamadığı durumlarda, zemin ıslah teknikleri veya derin temel uygulamaları kullanılmaktadır. Derin temeller genel olarak, derinliği, plan görünümündeki genişliğinin iki buçuk mislinden daha fazla olan bir temeli ifade etmek için kullanılır ve kazıklı temeller, kesonlar veya derin ayak temellerini kapsar. Bunların içinde en yaygın olarak kullanılanı kazıklı temellerdir (Birand, 2007). Kazıklar aksel yükleri, deprem ve rüzgâr gibi etkiler sonucu meydana gelen yatay yükleri, zeminin derininde bulunan sağlam tabakalara aktararak, göçme veya aşırı oturmalara yol açmadan taşıyabilmelidir.

Kazıklarda oturma analizleri yeterince yaygınlaşmamış olup, genel olarak kazık taşıma güçleri hesaplanmaktadır. Taşıma gücü kriterinin sağlanması halinde kazık tasarımının doğru olduğu kabul edilir. Güvenli ve ekonomik bir kazık tasarımında ise taşıma gücü hesaplarına ek olarak oturma analizleri de yapılmalıdır.

Bahadır ve diğ. (2017) tarafından Plaxis programı ile gerçek bir uygulama üzerinde modelleme çalışması yapılmıştır. Üç farklı zemin modeli için analizler yapılarak, saha ölçümleri ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, saha koşullarına bağlı olarak hangi modelin nümerik analizlerde seçilmesinin daha uygun olacağı ortaya konulmuştur.

Holko ve diğ. (2014) CFA kazıkların sayısal analizlerini ANSYS ve PLAXIS yazılımlarını kullanarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, arayüz modellemesi yöntemi ile zemin malzeme modellerinin karşılaştırıldığı ve analiz edildiği parametrik bir çalışma şeklinde hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, CFA kazıklarda hangi yazılımın kullanılmasının daha uygun olacağı ve modellemede hangi parametrelerin seçilmesinin daha doğru olacağı ortaya konulmuştur.

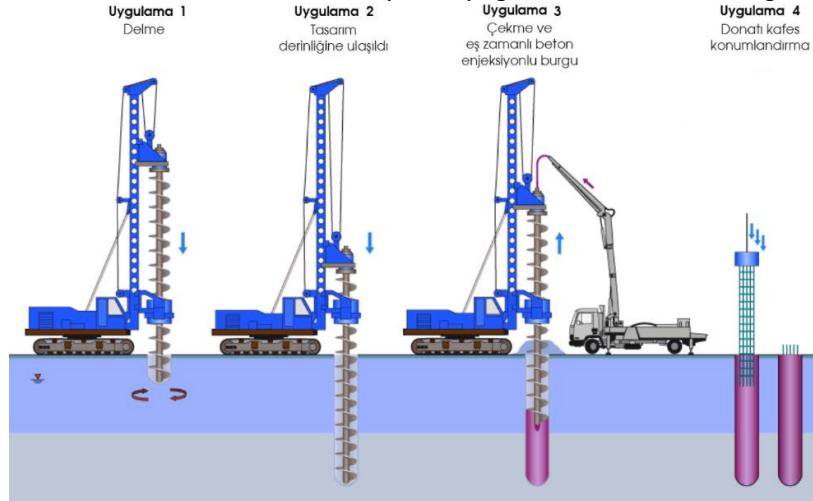
Bu çalışmada CFA kazıklarda farklı tipte modellemelerin karşılaştırılması amacıyla, sonlu elemanlar programı ile analiz imkânı sağlayan PLAXIS 2D programı kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda oldukça sık kullanılan Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HS_{ss}) ileri düzey malzeme modelleri ile tekil bir CFA kolonunun yüklenme durum analizleri yapılmıştır. Elde olunan sonuçlar, arazide tatbik edilen yüklenme deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve saha koşullarına bağlı olarak farklı zemin modellerinin performansları araştırılmıştır.

2. CFA SİSTEMİ

Şu anda dünya üzerinde kullanılan 100'den fazla kazıklı temel tipi olduğu bilinmekte olup, literatürde kazıklar çeşitli kriterlere göre ayrılmaktadır. Kazıklar, malzemesine, imalat şekline ve çalışma prensibine göre sınıflandırılmaktadır.

Fore kazık imalat tipi olan CFA (Continuous Flight Auger) sistemi ilk olarak 1950'lerde ABD'de yüksek yeraltı suyu seviyesi bulunan zayıf ve kohezyonsuz zeminlerde, muhafaza ve foraj sıvısı kullanılmadan kazık imalatı için tercih edilmiş olup, 1970'lerde Avrupa'ya tanıtılmıştır. CFA uygulamasında, özel olarak tasarlanmış fore kazık makineleri kullanılmaktadır. Kazık delgisi için, kazık boyundan daha uzun helezonik bir auger (kanat) sürekli olarak aynı yönde dönerek kazık alt ucuna kadar zemin içine sokulur. Bu şekilde, kazılan zeminin bir kısmı yüzeye çıkarılırken diğer bir kısmı da kazık çeperlerine doğru itilerek deplase edilmektedir. Delgi işlemi

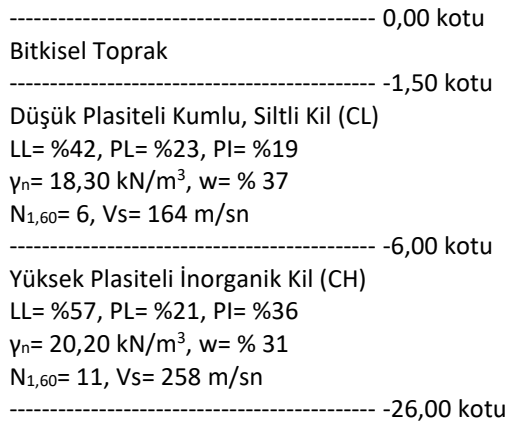
tamamlandıktan sonra, özel CFA boru matkabının ortasındaki boşluktan basınçlı olarak beton kuyu içine pompalanır. Bu süreçte kullanılan beton, mıcır çapları küçük tutularak özel olarak hazırlanmaktadır. Delgi yapılan bölge, çalışma platformunun yüzeyine kadar betonla doldurulduktan sonra dışarıda önceden hazırlanan donatı kafesi bir vibratör kullanılarak veya kullanılmadan taze beton içine yerleştirilir (Şekil 1). Bu yöntemin, uygun zemin koşullarında hızlı bir şekilde inşa edilmesi, diğer kazık yöntemlerine göre daha az ses ve titreşim oluşturması ve ekonomik olması nedeniyle dünya genelinde kullanım alanı giderek artmaktadır.



Şekil 1. CFA kolonu imalat aşama görünümü

3. ZEMİN PROFİLİ

İnceleme alanında zemin incelemesi amacıyla gerçekleştirilen sondaj ve laboratuvar çalışmalarında elde olunan zemin profili Şekil 2’de görülmektedir. Arazideki CFA sisteminin kazık boyu 16,00 m ve kazık çapı 80 cm olarak tasarlanmıştır.



Şekil 2. Zemin profili

4. ANALİZ METODLARI

Bu çalışma kapsamında, PLAXIS 2D programı malzeme kütüphanesindeki Mohr Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HS_ss) malzeme modelleri kullanılmıştır.

4.1. Mohr-Coulomb Model (MC)

Mohr Coulomb modeli zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin birinci bölgesinde elastik, ikinci bölgesinde ise mükemmel plastik bir malzeme olduğu varsayımına göre oluşur. Bu modelde, zemin katmanlarının rijitliklerinin derinlikle değişmediği ve ortalama bir rijitlik parametresi kullanılması sebebiyle nispeten hızlı

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE CFA KAZIK MODELLEMELERİNİN SAHA YÜKLEME DENEY SONUÇLARINA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

analizler gerçekleştirilebilir. Yükleme-boşaltma durumları için bir ayırım yapılamadığından, kazı problemlerinde genelde önerilmemektedir. Daha çok limit analiz problemlerinde yani toprak dolgu barajların, dolguların, şevlerin, istinat duvarlarının stabilite çözümlerinde (güvenlik analizi) ve yüzeysel temel projelerinin taşıma gücü hesaplarında kullanılması uygundur. Mohr-Coulomb modelde zemin, Elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ'), kohezyon (c') ve dilatasyon açısı (ψ) elastik ve/veya plastik parametreleriyle ifade edilir.

4.2. Hardening Soil Model (HS)

Pekleşen zemin modeli Mohr Coulomb modelin bir üst versiyonudur. Hiperbolik modelden farkı elastik teori yerine plastik teoriyi kullanarak elde olunan plastik şekil değiştirmeler çoklu yüzey (multi surface) akış kriterine göre hesaplanmaktadır. Yumuşak ve sert zemin için önerilen model gerilmeye bağlı rijitlik değerlerini dikkate almaktadır ki bu durum, artan basınçla birlikte tüm rijitliklerin de artması demektir. Zeminde göçme durumu tanımlanmakta, hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde uygun sonuçlara ulaşılmaktadır. Ancak çok aşırı konsolide killerin davranışını modellemede dikkatli davranılmalıdır. Çünkü bu türden zeminlerin davranışı çok karmaşık ve davranışı etkileyen birçok faktör vardır (Brinkgreve, 2002). HS modelde, Mohr-Coulomb parametrelerine ek olarak drenajlı üç eksenli deneylerle elde edilen sekant rijitliği (E_{50}^{ref}), drenajlı odömetre deneyleriyle elde edilen tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref}) ve Elastik yükleme/boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref}) kullanılmaktadır.

4.3. Hardening Soil Small Strain Model (HS_ss)

Bu model küçük birim deformasyon rijitliğinde zeminin artan rijitliğini de dikkate almaktadır. Hardening soil model için belirlenen tüm parametreler, hardening soil small strain (pekleşen zemin küçük birim şekil deformasyon rijitliği) modelinde de geçerlidir. Bununla birlikte, HS_ss modelde başlangıç birim deformasyon geçmişi modülü, küçük birim deformasyon kayma modülü (G_o^{ref}) ve kayma modülünün %70 azalması durumundaki birim deformasyon seviyesi ($\gamma_{0.7}$) kullanılarak hesaplanır.

5. MODELLEME DEĞERLENDİRİLMESİ

Analizlerde kullanılan elastisite ve kayma modülleri düşük deformasyon genliklerinde değerlendirme imkanı sunan sismik veriler ve aşağıdaki yaklaşımlar kullanılarak elde edilmiştir.

$$G = \gamma V_s^2 \quad (1)$$

$$\gamma = 0,23(3,28V_p)^{0,25} \quad (2)$$

$$E = 2G(1+\nu) \quad (3)$$

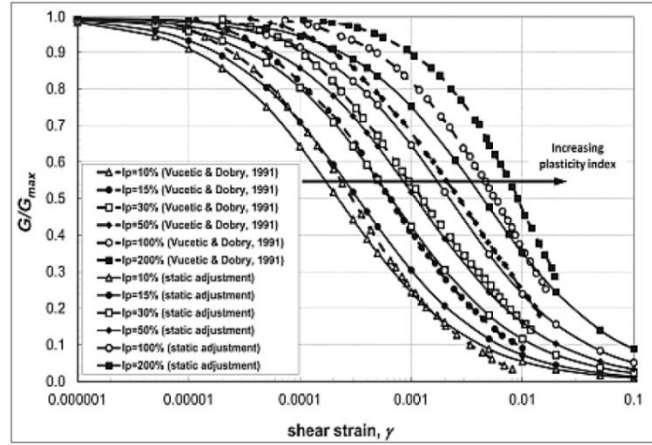
Hardening soil modelinde kullanılan odeometrik modülü (E_{oed}) konsolidasyon deneyinden elde olunan ve Şekil 3'te verilen yük-oturma grafiği yardımıyla belirlenmiştir. Bu grafikte $p^{ref}=100$ kPa referans gerilmesine karşılık gelen teğetin eğimi E_{oed} olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, sekant modülü E_{50} , E_{oed} değerine eşit kabul edilmiştir (Plaxis). Yükleme-boşaltma modülü E_{ur} , literatürde belirtildiği üzere sekant modülünün 3 katı olarak dikkate alınmıştır (Plaxis).



Şekil 3. Konsolidasyon deneyi gerilme-deformasyon grafiği

HS_{ss} modellemesinde, zemin parametreleri hardening soil modeline benzer şekilde kullanılmıştır. İlave olarak istenen G_0^{ref} referans başlangıç kayma modülü için formül (1) tercih edilmiştir. Kayma modülünün %70 değerine düştüğü durumdaki deformasyon değeri ($\gamma_{0,7}$), zemin tabakalarının plastisite indislerine göre Şekil 4 yardımıyla elde edilmiştir.

Yukarıda aktarılan yaklaşımlar sonucu hesaplanan ve analizlerde kullanılan parametreler modelleme tiplerine göre Tablo 1'de toplu olarak aktarılmaktadır. Hesaplamalarda dikkate alınan kazık yapısal özellikleri ise Tablo 2'de özetlenmektedir.



Şekil 4. Azalım modülü-kayma şekil değiştirme ilişkisi (Vardanega ve Bolton, 2013)

Tablo 1. Analize esas zemin parametreleri

Modelleme Tipi					
Mohr-Coulomb (MC)		Hardening Soil (HS) (MC modele ek olarak)		Hardening Soil Model Small Strain (HS _{ss}) (HS modele ek olarak)	
CL	CH	CL	CH	CL	CH
E= 63726 kPa	E= 63726 kPa	E ₅₀ = 4074 kPa	E ₅₀ = 9230 kPa	G ₀ ^{ref} = 43239 kPa	G ₀ ^{ref} = 116855 kPa
v=0,40	v=0,40	E _{ur} = 12222 kPa	E _{ur} = 270 kPa	γ _{0,7} = 0,00013	γ _{0,7} = 0,00025
φ'= 31°	φ'= 27°	E _{oed} = 4074 kPa	E _{oed} = 9230 kPa		
c'=5 kPa	c'=8 kPa				
ψ= -	ψ= -				
R _{int} =0,85	R _{int} =0,85				

Tablo 2. Kazık yapısal özellikleri

Tanım	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]
Kazık 80	1,51E7	6,03E5

6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmada aktarılan modellemeler sahada uygulanan kazık yükleme deneyinde uygulanan yükleme değerlerine göre kademeli olarak tasarlanmıştır. Bu bildiriye göre sayfa sınırlamasından dolayı kazık yükleme deney sonuçları ve plaxis analiz sonuçları ayrıntılı olarak verilememiş olup, yük-oturma değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 3'te özetlenmektedir. Buna göre, 1. döngüdeki tasarım yükleme değeri 108,40 ton altında elde edilen oturma değerlerinin yükleme deney sonuçlarına oranları sırasıyla; Mohr-Coulomb (MC) modeli için %41,39; Hardening Soil (HS) modeli için %2,17 ve Hardening Soil Small Strain (HS_{ss}) modeli için %16,00 olarak bulunmuştur. 2. döngüdeki tasarım yükleme değerinde ise bu oranlar; %74,14, %3,87 ve %28,67 olarak hesaplanmıştır. Son olarak nihai yükleme değeri olan 162,60 ton altında oturma oranları; MC için %83,70; HS için %3,67 ve HS_{ss} için %22,25'tir.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE CFA KAZIK MODELLEMELERİNİN SAHA YÜKLEME DENEY SONUÇLARINA
GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 3. Modelleme ve yükleme deneylerinde elde edilen yük-oturma değerleri

Yükleme (ton)	Oturma (cm)			
	Yükleme Deneyi	MC Model	HS Model	HS_ss Model
54,20 ⁽¹⁾	0,02	0,15	2,47	0,20
108,40 ⁽¹⁾	0,12	0,29	5,52	0,75
54,20 ⁽²⁾	0,09	0,16	4,28	0,42
108,40 ⁽²⁾	0,22	0,29	5,55	0,75
162,60	0,39	0,46	10,47	1,73

Yukarıda özetlenen analiz sonuçları değerlendirildiğinde, yük-oturma analizlerinde en yakın sonuca Mohr-Coulomb (MC) yöntemi ile ulaşıldığı görülmektedir. İkinci olarak en yakın sonuçlara Hardening Soil Small Strain (HS_ss) modelinde ulaşılmış olup, Hardening Soil (HS) modelinde elde olunan sonuçların oldukça düşük oranda yakınsamaya sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu durumun, gerek CFA kazık uygulamasında gerekse de tasarım yükü altında zeminde oldukça düşük deformasyonların oluşmasından kaynaklandığı öngörülmektedir. Oluşan bu düşük deformasyon değerleri altında zeminin elastik ortam parametrelerinin hakim olduğu değerlendirilmektedir. Bu sebeple, modellemelerde zeminin elastik koşullarını dikkate alan Mohr-Coulomb (MC) yöntemiyle en yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Zeminin nihai taşıma gerilmesinin yarısı kadar yükleme altındaki durumunu dikkate alan sekant modülüne göre analiz gerçekleştiren hardening soil modelinde ise, tekil kazık oturmalarının, yükleme deney sonuçlarına göre oldukça yüksek hesaplandığı görülmektedir. Bu durum, hardening soil modellemesinin küçük deformasyon rijitliğinde değerlendirme imkanı sunan HS_ss modellemesinde bir miktar daha düzelse de, parametrelerin görece büyük şekil değiştirmeler altındaki konsolidasyon deneylerinden hesaplanması nedeniyle yakınsamalar sınırlı düzeyde kalmaktadır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, CFA kazıklarda farklı tipte modellemelerin karşılaştırılması amacıyla, PLAXIS 2D programı kullanılarak, Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HS_ss) modelleri ile tekil kolonunun yükleme sonuçları kıyaslanmıştır. Mohr-Coulomb (MC) modeli oturma sonuçları ile yükleme deneyinden elde olunan değerlerin ortalaması, 1. Döngü için tasarım yükü altında %41,39; 2. döngüde tasarım yükü altında %74,14 ve nihai yükleme altında %83,70 olarak hesaplanmıştır. Hardening Soil (HS) modelinde bu değerler sırasıyla, %2,17, %3,87 ve %3,67 olup; Hardening Soil Small Strain (HS_ss) modelinde ise, %16,00, %28,67 ve %22,25 olarak elde edilmiştir.

Yük-oturma analizlerinde, tekil kazık yükleme deneyi sonuçlarına en yakın sonuçlara Mohr-Coulomb (MC) yöntemi ile ulaşıldığı görülmektedir. Hardening Soil Small Strain (HS_ss) modellemesinde nispeten oturma değerlerine bir miktar yakınsama görülse de, Hardening Soil (HS) yönteminden elde edilen değerlerin yükleme sonuçlarından oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.

En yakın sonuçlara zeminin elastik ortam parametrelerine göre analiz gerçekleştiren MC modellemesiyle ulaşılmasının nedeni olarak, CFA kazık uygulaması ve tekil kazık yükleme deneyi esnasında zeminde deformasyonların oldukça düşük miktarda kalması gösterilebilir. Diğer taraftan, HS ve HS_ss yöntemleri için kullanılan parametrelerin görece yüksek deformasyonlar altında tatbik edilen deneylerden temin edilmesinden dolayı yükleme deney sonuçları ile uyumluluğunun sınır düzeyde kaldığı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Bahadır, A.A., Onur, M.İ. (2017), "Derin Kazı Destek Sistemi Tasarımında Zemin Modeli Seçimi: Bir Vaka Analizi", İstanbul
- Bahadır, A.A., Onur, M.İ. (2018), "Derin Kazı Analizlerinde Küçük Şekil Değiştirme Rijitliğinin Etkisi", Ankara
- Bahadır, A.A., (2018), "Derin Kazı Destek Sistemlerinde Malzeme Modeli Etkisi", Bilecik
- Birand, A. A., (2007), "Kazıklı Temeller", Teknik Yayınevi.
- Brinkgreve, R.B.J. (2002), "PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analysis-Version 8". Balkema, Rotterdam
- Kabaca, H., (2018), "Kazıkların Taşıma Gücü Ve Oturma Parametrelerinin İncelenmesi, Taşıma Gücü İçin Yeni Bir Metot Önerisi", Sakarya

- Holko, M., Stacho, J. (2014), "Comparison Of Numerical Analyses With A Static Load Test Of A Continuous Flight Auger Pile"
- Vardanega, P.J., Bolton, M.D., "Stiffness of Clays and Silts: Normalizing Shear Modulus and Shear Strain", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2013,1943-5606.0000887.
- PLAXIS 2D. "Reference Manual", Retrieved from <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-2-Reference.pdf>,