

ÇEKME KAZIKLARININ “GÖMÜLÜ KAZIK” ELEMENLARIYLA MODELLENMESİ

H. Kürşat ENGİN
hkengin@metu.edu.tr
ODTÜ Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Ankara/TÜRKİYE

ABSTRACT

Embedded pile model is a numerical model developed for Plaxis 3D Foundation software which simply, but efficiently describes non-linear pile-soil interaction. In this model, pile is a beam element which can cross soil volume in any inclination and orientation. Pile-soil interaction is described by embedded interface elements at skin and non-linear spring elements at pile tip. In this study, embedded pile behaviour is verified by an idealized soil model. Finally, embedded pile model is validated by various field tension tests on piles.

Key words: Numerical modelling, pile tension test, finite element method.

ÖZET

Gömülü kazık (Embedded Pile) modeli Plaxis 3D Foundation programında geliştirilmiş, doğrusal olmayan kazık-zemin etkileşimini tasvir eden basit ve etkin bir numerik modeldir. Bu modelde kazık, bir kiriş elemanıdır ve zemini herhangi bir açı ve oryantasyon ile kesebilmektedir. Kazık ve çevresindeki zemin arasındaki etkileşim gömülü arayüz elemanlarıyla, kazık ucundaki zemin direnci ise doğrusal olmayan yay elemanlarıyla modellenmiştir. Bu çalışmada gömülü kazık elemanlarının davranışı, önce idealize edilmiş bir zemin modeliyle test edilmiştir. Son olarak çeşitli arazi kazık çekme deneyleri, gömülü kazık elemanlarıyla modellerenerek incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nümerik modelleme, kazık çekme deneyi, sonlu elemanlar yöntemi.

GİRİŞ

Bir zemin – kazık – yapı etkileşimi sisteminde, başarılı bir analiz için etkin bir zemin – kazık etkileşim modeli önemli noktalardan birisidir (El-Mossallamy, 1997). Küçük deplasman durumlarında, kazığın zeminle birlikte hareket ettiği varsayımı çözüm için yeterli olabilir. Ancak, genel olarak kazığın zemin içindeki görelî hareketini uygun bir şekilde incelemek için daha ileri kazık-zemin etkileşimi modelleri gerekebilir. Alışlagelmiş sonlu elemanlar (SE) yönteminde, kazık hacim elemanlarıyla modellenenmektedir. Kazık – zemin etkileşimi, kazık çeperinde ve ucunda kullanılan arayüz elemanlarıyla modellenmektedir. Hassas çözümler için, bu yöntem kazık etrafında çok küçük zemin elemanları gerektirmekte ve dolayısıyla çözüm süresini arttırmaktadır. Plaxis 3D Foundation programında halen geliştirilmekte olan “gömülü kazık” yaklaşımında, kazık narin bir yapı elemanı (hacim elemanı yerine bir çizgi elemanı) olarak varsayılmıştır. Kazık – zemin etkileşimi, kazık ile zemin düğüm noktaları arasındaki görelî deplasman ile modellenmiştir. Kazık ile zemin düğüm noktaları, kazık çeperinde özel arayüz elemanları (Sadek ve Shahrour (2004) modeli benzeri), ucunda ise doğrusal olmayan yay elemanlarıyla (Septanika, 2005) birbirine bağlanmıştır. Bu modelde, ayrıca, kazık kapasitesi yüzey sürtünmesi ve uç direnci olarak tanımlanabilmektedir.

Gömülü kazıkların düşey veya eğik kazıkların modellenmesindeki etkinliği önceki çalışmalarda gösterilmiştir (Septanika (2005), Engin ve diğerleri (2007)). Bu çalışmada, gömülü kazık elemanlarının, çekme kazıkların modellenmesinde kullanımı araştırılmıştır. Modelin doğrulaması için basit bir tek tabaka zemin modeli kullanılmıştır. Çeşitli eğimlerde yerleştirilen ve kapasitesi önceden tanımlanan kazık, çekme ve basma yükleme durumları için incelenmiştir.

Sağlama içinse, çeşitli arazi yükleme deneyleri (Ismael et al., 2001 and Ismael, 1994) modellenmiş, gerçek sonuçlarla kıyaslanmış ve başarılı yük–deplasman davranışları elde edilmiştir.

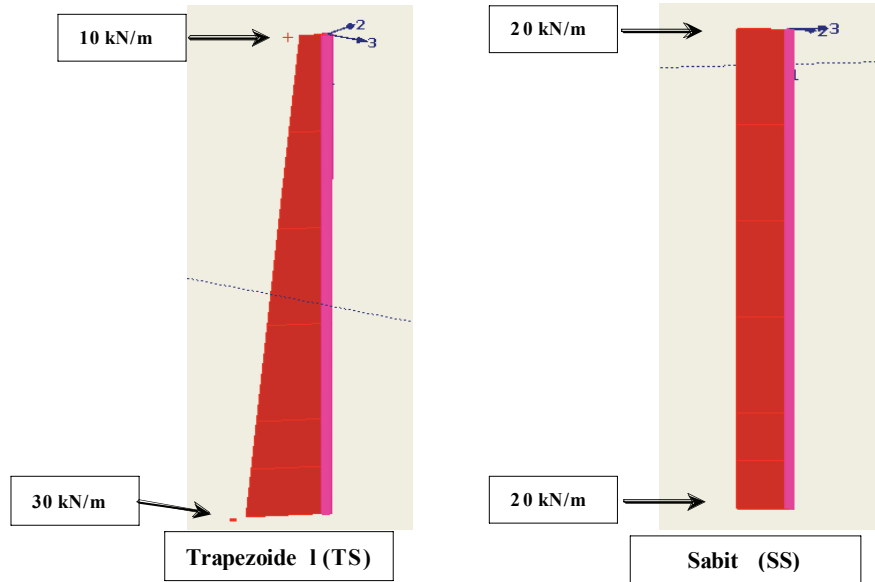
AMAÇ

Bu çalışmanın ilk kısmında gömülü kazıkların çekme altındaki davranışı, çekme ve basma yükleme durumlarında benzer davranışlarını (kapasite ve mutlak deplasmanlar) incelemek amacıyla idealize bir zemin modeli kullanılmıştır. İkinci kısımda ise Kuveyt’te, çeşitli

sahalarda yapılmış, fore kazıkların çekme deneyleri (Ismael et al., 1994) modellenmiştir. Kazık kapasiteleri arazi deney sonuçlarına uygun olarak tanımlanmıştır. Yük – deplasman davranışları gerçek sonuçlarla karşılaştırılmak suretiyle gömülü kazık modelinin çekme kazıkların modellenmesindeki kullanımının etkinliği araştırılmıştır.

GÖMÜLÜ KAZIK MODELİ

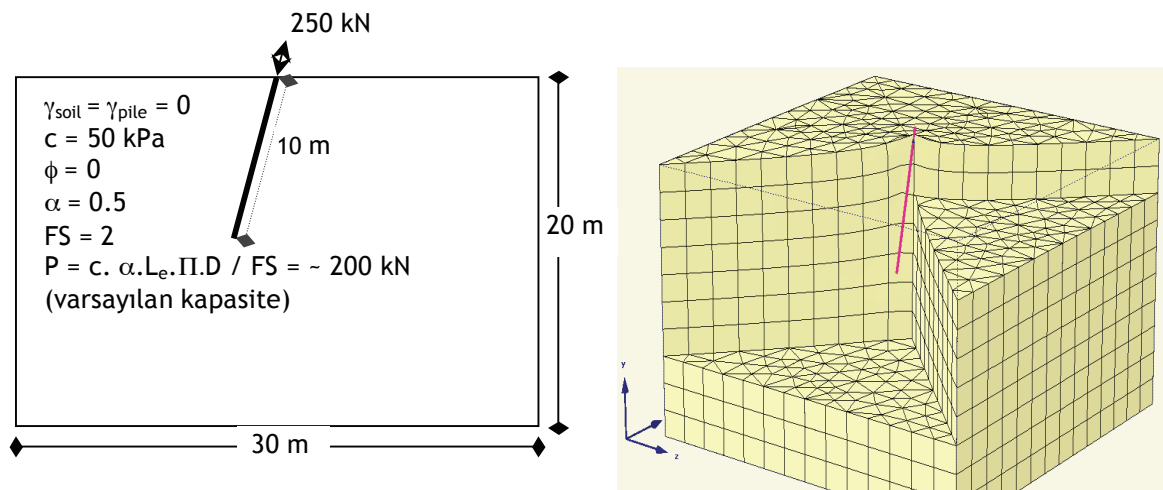
Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programında son birkaç yıl içinde geliştirilmiş olan “gömülü kazık” yaklaşımında, kazık narin bir yapı elemanı (hacim elemanı yerine bir çizgi elemanı) olarak varsayılmıştır. Bu modelde, kazık çizgisel elemanlardan oluşmakta ve zemini herhangi bir eğim ve oryantasyonda kesebilmektedir. Kazık – zemin etkileşimi, kazık ile zemin düğüm noktaları arasındaki göreceli deplasman ile modellenmiştir. Kazık ile zemin düğüm noktaları, kazık çevresinde özel arayüz elemanları (Sadek ve Shahrour (2004) modeli benzeri), ucunda ise doğrusal olmayan yay elemanlarıyla (Septanika, 2005) birbirine bağlanmıştır. Bu modelde, kazık kapasitesi yüzey sürtünmesi ve uç direnci olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Kullanılan kazık kapasite modelleri.

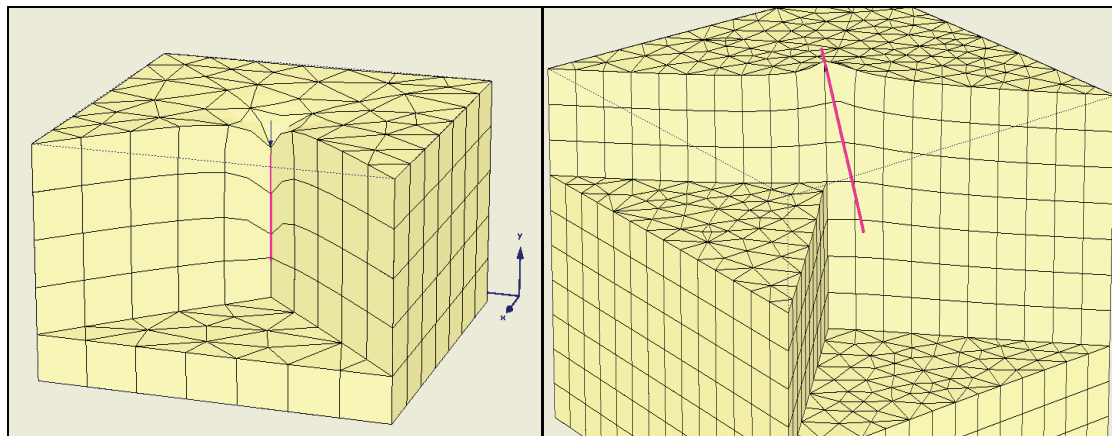
HİPOTETİK ZEMİN MODELİYLE GÖMÜLÜ KAZIKLARIN İNCELENMESİ

Bu kısımda gömülü kazıkların çekme altındaki davranışı, kohezyonlu ($c = 50$ kPa), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve birim ağırlığı (γ) sıfır olan hipotetik bir zemin modeli kullanılarak incelenmiştir (Şekil 2). Buradaki amaç, eksenel çekme ve basınç yükleme durumlarında benzer davranışlar (kapasite ve mutlak deplasmanlar) elde etmektir (Şekil 3). Dolayısıyla, sadece sürtünme direnci kapasiteleri girilmiş, çekme ve basma durumlarının birbiriyle karşılaştırılabilmesi amacıyla uç dirençleri yok varsayılmıştır.



Şekil 2. 15 derece eğimli kazık durumu ve sonlu elemanlar modeli

Aynı zemin ve kazık modeli 15 derece eğik kazık durumunun yanısıra, dikey ve 30 derece eğik kazık durumları için de incelenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Basma ve çekme durumlarında deforme olmuş sonlu elemanlar modelleri
(Düşey ve 30 derece eğimli kazık durumları).

ARAZİ YÜKLEME DENEYLERİNİN GÖMÜLÜ KAZIKLARLA MODELLENMESİ – MODEL DOĞRULAMA DENEYLERİ

Çimentolaşmış Çöl Kumunda Fore Kazıklar Üzerinde Yapılan Çekme Deneyleri

Bu kısımda, Kuveyt'te (Güney Surra ve Umr Gudayr deney sahaları) fore (yerinde dökme) kazıklar üzerinde yapılan çekme deneyleri (Ismael ve diğerleri, 1994), Plaxis 3D Foundation programıyla gömülü kazık elemanlarıyla modellenmiştir.

Orta sıkı, çimentolaşmış kumlarda, fore kazıkların zemin yük transferleri iki ayrı sahada incelenmiştir. Deney sahalarının ve numerik modellerin detayları ayrı ayrı verilmiştir.

Güney Surra Deney Sahası

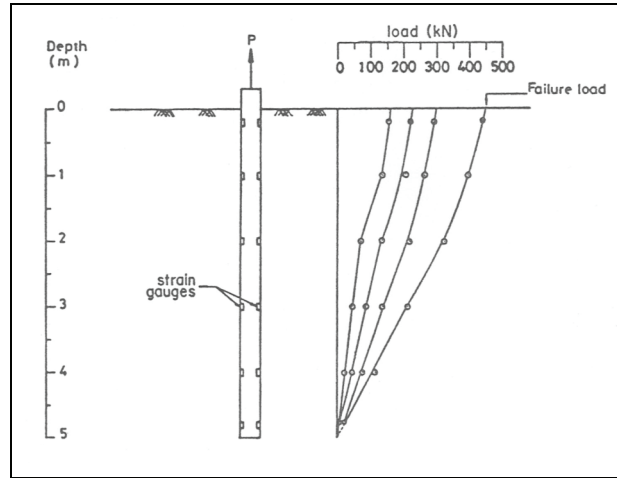
Bu saha, orta - sıkı ve çok - sıkı az çimentolaşmış kalkerli kum zemin profiline sahiptir (Şekil 4). Zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu sahada, 0.3m çapında 3.3m ve 5.3m uzunluklarında iki kısa fore kazık çekme kapasitelerine kadar yüklenmiştir. 5.3 m boyundaki kazık, her yükleme kademesindeki eksenel yük dağılımlarını ölçmek amacıyla birim şekil değiştirme ölçerleriyle donatılmıştır (Şekil 5).

SOIL DESCRIPTION	SPT N (Blows/0.3m)	w (%)	γ_b (kN/m ³)	LL (%)	PI (%)	SL (%)	SOIL COMPOSITION (% of TOTAL)
							0 50 100
MEDIUM-DENSE CEMENTED SILTY SAND (S M)	13	1.4	17.75	30.5	7.0	22.5	SAND
	24	2.7	17.95	25.2	4.0	17.7	
	26	3.8	18.34	26.0	4.5	18	
	21	3.9	17.65	None	N P	—	
	60	3.1	18.63	None	N P	—	
MEDIUM-DENSE TO VERY-DENSE SILTY SAND WITH CEMENTED LUMPS (S M)	90	4.4	19.52	None	N P	—	
END OF HOLE							

Şekil 4. Güney Surra zemin profili, w, su içeriği; γ_b , birim ağırlık; LL, likit limit; PI, plastisite indisi; SL, rötre limiti; NP, plastik-olmayan (Ismael ve diğerleri, 1994).

Tablo 1. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.

Parametre	Birim	Orta Sıkı, Çimentolaşmış Siltli Kum	Orta - Çok Sıkı, Siltli Kum
Malzeme Modeli	-	HS	HS
Analiz Şekli	-	Drenajlı	Drenajsız
γ_{dry}	kN/m ³	18.0	18.5
γ_{sat}	kN/m ³	19.5	20.0
E_{50}^{ref}	kN/m ²	1.500 E+04	3.500 E+04
E_{oed}	kN/m ²	1.500 E+04	3.448 E+04
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	3.500 E+04	1.000 E+05
M	-	0.5	0.5
ν_{ur}	-	0.2	0.2
c'	kN/m ²	20	1.0 E-03
ϕ'	°	35	40
ψ	°	5	8
K_{onc}	-	0.426	0.400
OCR	-	1	1
POP	kN/m ²	0	0
R_{int}	-	1.0	1.0

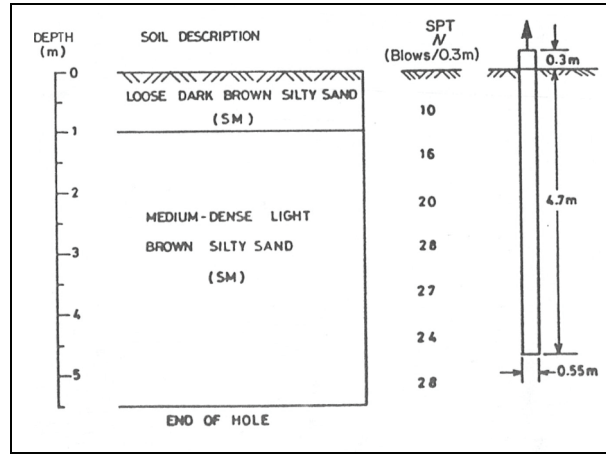


Şekil 5. Çimentolaşmış kumda çekme deneyi esnasındaki eksenel yük dağılımları.

P, eksenel çekme yükü. (Ismael ve diğerleri, 1994).

Umr Gudayr Deney Sahası

Bu deney sahasındaki kazık çekme deneyi çimentolaşmamış kohezyonsuz kum içinde gerçekleştirilmiştir. Bu sahadaki zemin durumu ve penetrasyon direnci ilk sahadakiyle benzerdir. (Şekil 6). Tek önemli fark kumun çimentolaşmamış olmasıdır.



Şekil 6. Umr Gudayr zemin profili

Tablo 2. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.

Parametre	Birim	Gevşek Kahverengi Kum	Koyu Siltli	Orta – Çok Sıkı Açık Kahverengi Kum	Siltli
Malzeme Modeli	-	HS		HS	
Analiz Şekli	-	Drenajlı		Drenajsız	
γ_{dry}	kN/m ³	17.0		18.5	
γ_{sat}	kN/m ³	17.0		18.5	
E_{50}^{ref}	kN/m ²	5000		15000	
E_{oed}	kN/m ²	5000		15000	
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	15000		35000	
m	-	0.7		0.5	
ν_{ur}	-	0.2		0.2	
c'	kN/m ²	1.0 E-04		1.0 E-04	
ϕ'	°	27		35	
ψ	°	0		5	
K_{onc}	-	0.546		0.426	
OCR	-	1		1	
POP	kN/m ²	0		0	
R_{int}	-	1.0		1.0	

SONUÇLAR

Genel Bakış

Çekme kazıklar uç dirençlerinin olmamasının yanısıra daha düşük yüzey sürtünme kapasitelerine sahip olmaları nedeniyle basınç kazıklarından farklıdır. Sürtünme direncindeki azalma, çekme kuvvetinden kaynaklanan, kazık çevresinde gerilme azalması ve dolayısıyla sarmal gerilmelerin düşmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu nedenle çekme kazıkların modellenmesinde elastik parametrelerin, özellikle çekme kazık davranışı üzerinde etkin olan

boşaltma – tekrar yükleme modülü E_{ur} parametresinin seçiminde dikkatli olunması gerekmektedir.

Hipotetik zemin modelinde (kohezyonlu , $\phi = 0$ ve $\gamma = 0$) kazığın mutlak deplasmanının analitik olarak, basınç ve çekme yüklemelerinde birebir aynı olması beklenmektedir. Bu davranış nümerik olarak da Plaxis Foundation 3D programı gömülü kazık modeliyle doğrulanmıştır. Değişik eğimli kazıklarda küçük farklılıklar olmasına rağmen gömülü kazıkların çekme kazıklarının modellenmesinde büyük bir potansiyeli olduğu söylenebilir.

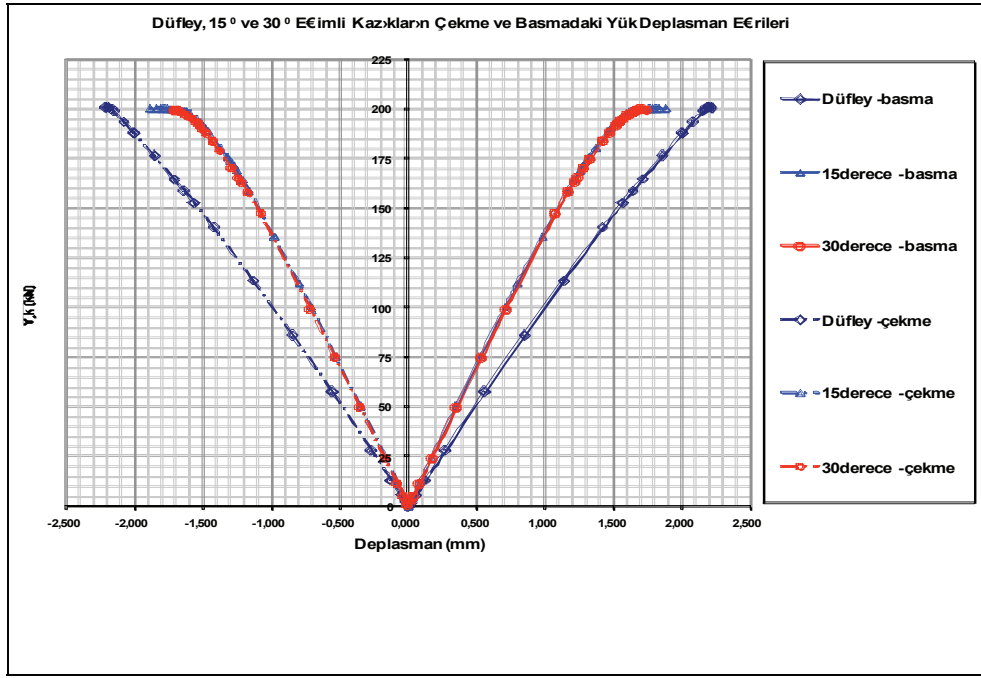
Çeşitli arazi deneyleri (Güney Surra ve Umr Gudayr kazık çekme deneyleri) de modellenmiş ve gayet başarılı yük-deplasman davranışları elde edilmiştir.

Öte yandan gömülü kazıkların yük-deplasman davranışlarının SE ağ sıklığına büyük oranda bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yük-deplasman davranışında yumuşama özellikle küçük çaplı kazıklarda belirgin şekilde görülmektedir. Buna kazık arayüz elemanına yakın düşen Gauss noktalarında yüksek oranda gerilim birikmesinin neden olduğu düşünülebilir.

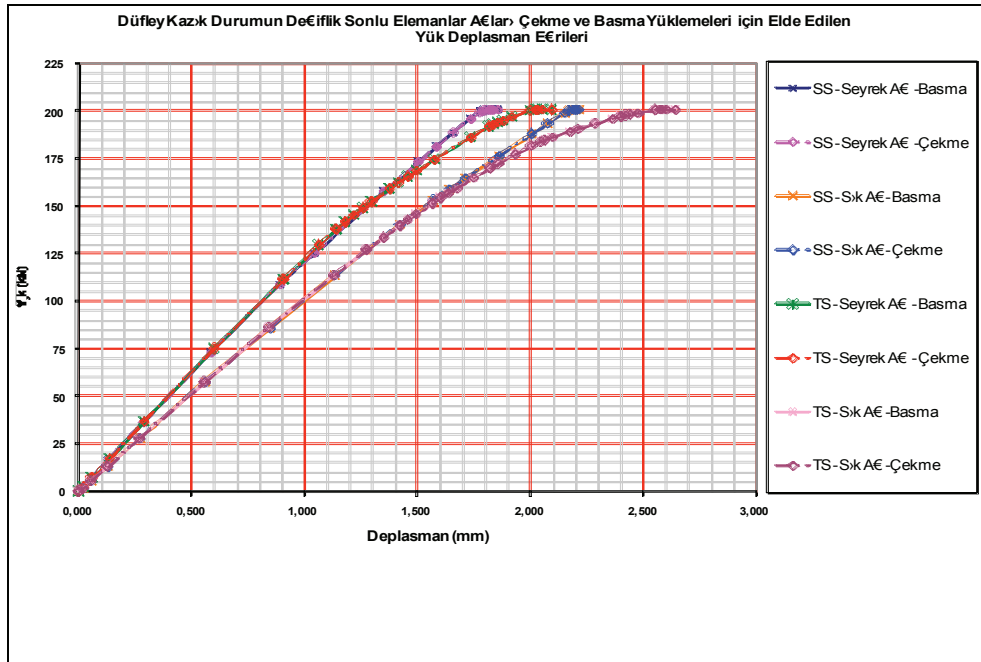
İdealize Zemin Modeliyle Çekme Kazıklarının İncelenmesi

Gömülü kazıkların eksenel çekme ve basınç yüklemelerindeki davranışları Şekil 7’de verilmiştir. Bu şekilde aynı eğimdeki kazıkların çekme ve basmadaki mutlak deplasman miktarları ve eğrilerinin birebir uyumlu olduğu görülebilir. Şekil 8’de düşey kazık modelinin çeşitli durumları (ör. Sonlu elemanlar (SE) ağ sıklığı, yüzey sürtünme tanımları (Sabit ve Trapezoidal)) için yük– mutlak deplasman eğrileri verilmiştir. Gömülü kazık davranışlarında SE ağ sıklığı ve değişik kazık eğimleri için küçük farklılıklar elde edilmiştir. Bu farklılıkların nümerik çözümden kaynaklandığını söylemek mümkündür.

Şekil 7’de 15 ve 30 derece eğimli kazıkların yük – deplasman davranışlarının çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca bu davranış düşey kazık durumundan daha katıdır. Bunun nedeni gömülü kazık elemanının zemin hacim elemanlarının içinden geçerken bu zemin elemanlarının Gauss noktalarına olan uzaklıklarıyla, dolayısıyla bu noktaların gerilmelerinin arttırım oranıyla ilgilidir.



Şekil 7. Gömülü kazıkların çekme ve basınç yüklemelerindeki davranışları

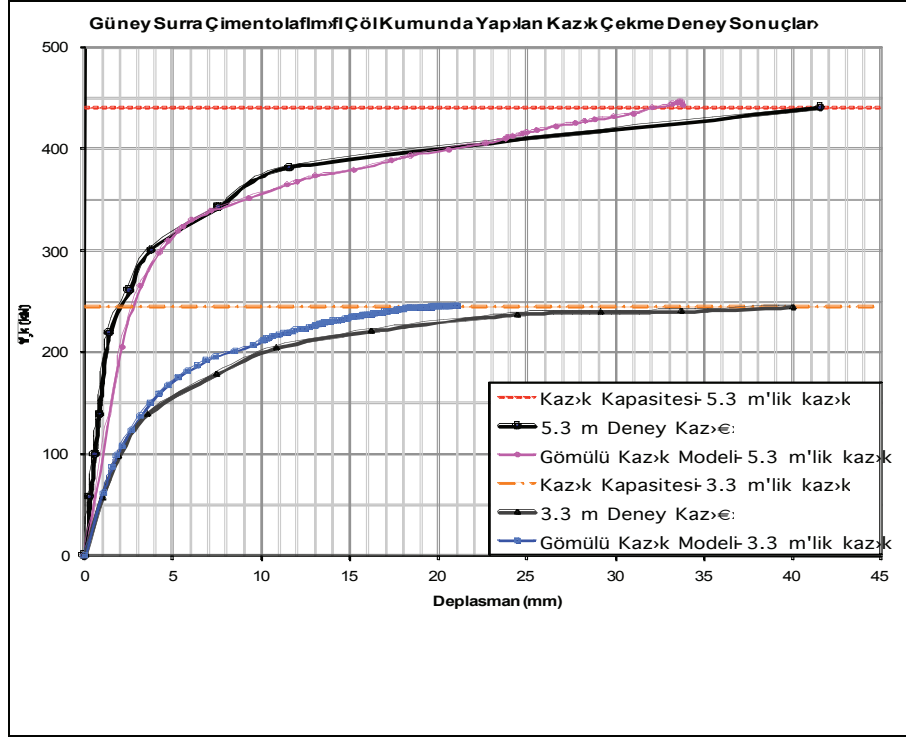


Şekil 8. Düşey gömülü kazıkların farklı SE ağırları, çekme ve basınç yüklemelerindeki davranışları

Arazi Yükleme Deneylerinin Gömülü Kazıklarla Modellenmesi

Güney Surra Sahası Deneyleri

Güney Surra sahası deney kazıkları ve gömülü kazık (SE) modellerinin yük – deplasman eğrileri Şekil 9’da verilmiştir. 5.3m’lik kazığın arazi deney sonuçlarıyla SE modelinin gayet uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 3.3m’lik kazık için gömülü kazık modelinin arazi deney sonuçlarını yakalayabildiği söylenebilir.

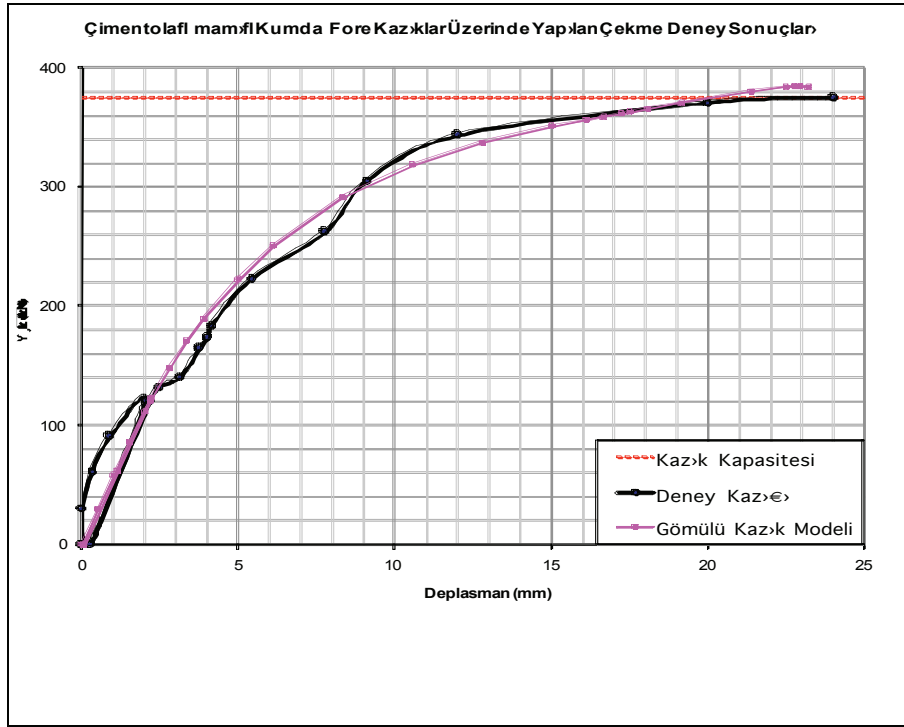


Şekil 9. Güney Surra Çimentolaşmış Kumunda Yapılan Çekme Deneyinin Arazi ve Gömülü Kazık Model Sonuçları

Umr Gundayr Sahası Deneyleri

Umr Gundayr sahası deney kazığı ve gömülü kazık (SE) modelinin yük – deplasman eğrileri Şekil 10’da verilmiştir. Gömülü kazık modelinin 5.0 m uzunluğundaki (4.7 m gömülü kısım) deney kazığının sonuçlarıyla gayet uyumlu bir sonuç verdiği görülmektedir.

Yük boşaltımı ve tekrar yükleme kısmındaki gömülü kazık davranışı bu modelde elastik bölgeye düştüğünden gerçek sonuçla uyumlu olamamıştır.



Şekil 10. Umr Gudayr Çöl Kumunda Yapılan Çekme Deneyinin Arazi ve Gömülü Kazık Model Sonuçları

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada yol gösterici ve destekleyici olduğu için öncelikle Dr. Ronald Brinkgreve'ye; programla ilgili tüm sorunlarımda yardımcı olduğu için Dr. Erick Septanika'ya; çalışma esnasında her türlü sorularımı yanıtsız bırakmayan Dr. Sadık Bakır'a; son olarak çekme kazık davranışı hakkında değerli tecrübe ve bilgilerini aldığım Dr. Ufuk Ergun ve Dr. Orhan Erol'a en içten teşekkürlerimi iletmeyi borç bilirim.

SEMBOLLER

α	: Kazık sürtünme direnci azaltma faktörü
D	: Kazık çapı
FS	: Güvenlik katsayısı
γ_{dry}	: Kuru birim hacim ağırlığı
γ_{sat}	: Doygun birim hacim ağırlığı
E_{ref}^{50}	: Zemin sekant modülü

E_{oed}	: Zemin ödometre modülü
E_{ref}^{ur}	: Zemin yükleme-boşaltma modülü
m	: Zemin sertleşme değişkeni (hardening parameter)
ν_{ur}	: Yükleme-boşaltma poisson oranı
c'	: Efektif kohezyon
ϕ'	: Efektif içsel sürtünme açısı
ψ	: Hacimsel genleşme açısı
K_0^{nc}	: Normal konsolide durum için sükunette toprak basıncı katsayısı
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
POP	: Geçmişteki toplam düşey gerilme
R_{int}	: Arayüz azaltma katsayısı

KAYNAKLAR

Bathe, K.-J. Finite element procedures, Prentice Hall. 1996.

El-Mossallamy, Y. “Load-settlement behaviour of large diameter bored piles in over-consolidated clay”. Proc. of the 7th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics – NUMOG VII, September, 1999, Rotterdam: Balkema, pp. 443-450.

Engin, H.K., Septanika, E.G. and Brinkgreve, R.B.J.. “Improved Embedded Beam Elements for the Modelling of Piles”. Proc. of the 10th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics – NUMOG X, Taylor&Francis, April, 2007, pp. 475 - 480.

Ismael, N.F, Al-Sanad, H.A. and Al-Otaibi, F. “Tension tests on bored piles in cemented desert sands”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, No.4, August,1994, pp.597-603.

Ismael, N.F. “Axial load tests on bored piles and pile groups in cemented sands”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.127, No.9, September, 2001, pp.766-773.

Triantafyllidis, T. Numerical modelling of construction processes in geotechnical engineering for urban environment : proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, Bochum, Germany, Taylor & Francis, March, 2006,

Sadek, M. & Shahrour, I. “A three dimensional embedded beam element for reinforced geomaterials”, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, August, 2004, Vol.28, pp. 931–946.

Septanika, E. G. “A finite element description of the embedded pile model”, Plaxis internal report, 2005.