

DETERMINATION OF PILE CAPACITY BY THE USE OF THE CONE PENETRATION TEST RESULTS

Sedat SERT
Assist.Prof.Dr.
Sakarya University
Sakarya, Turkey

Akın ÖNALP
Prof.Dr.
Istanbul Kültür University
İstanbul, Turkey

Ersin AREL
Assist.Prof.Dr.
Sakarya University
Sakarya, Turkey

ABSTRACT

This paper discusses the advantages of the various types of the cone penetration test(CPT,CPTU,SCPTU) over conventional methods and its use in designing piles. Priority is given to the LCPC method in comparing allowable pile loads. A clayey site in the Adapazari city centre was selected where a CPTU was performed and a borehole was drilled simultaneously to obtain continuous UD samples. Pile capacities calculated by the LCPC method and the conventional approaches indicated radically different tip resistance and side friction values. This result suggests a closer look at the so called “conventional” methods.

KONİ PENETRASYON DENEYİ İLE KAZIK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

Sedat SERT
Yrd.Doç.Dr.
Sakarya Üniversitesi
Sakarya, Türkiye

Akın ÖNALP
Prof.Dr.
İstanbul Kültür Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

Ersin AREL
Yrd.Doç.Dr.
Sakarya Üniversitesi
Sakarya, Türkiye

ÖZET

Kazıkların düşey kapasitesi genellikle sondajlar sırasında gerçekleştirilen standart penetrasyon deneyleri ve sondajlardan kısıtlı sayıda elde edilen numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına dayanılarak hesaplanmaktadır. Bunun yanında kazık kapasitesi kazık yükleme deneyleri, çakma analizleri veya koni penetrasyon deneyi gibi arazi deneyleri

ile de bulunabilmektedir. Koni penetrasyon deneyi ile kazık kapasitesinin hesaplanması, koni ile kazığın benzerliği nedeniyle deneyin ilk uygulama alanlarından biri olmuştur. Bu bildiride kazık kapasitesini koni penetrasyon deneyi (CPT/CPTU) verileri ile hesaplama yöntemleri üzerinde durulmakta ve Sakarya Üniversitesi Geoteknik Ana Bilim Dalı'na 1999 depreminden sonra Adapazarı kent merkezinde 300'ün üzerinde noktada gerçekleştirilen CPTU deneylerinden biri üzerinde yapılan hesaplamalar örnek olarak verilmektedir.

AMAÇ

Koni penetrasyon deneyi (CPT, CPTU, SCPTU), gelişen teknoloji ile birlikte zemin profili ve özelliklerinin yerinde, operatör müdahalesi minimum düzeyde ve sürekli olarak belirlenmesini sağlayabilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Deney; kısa zamanda istenilen sayıda tekrarlanabilmekte, zemin parametreleri numune alınmasına ve laboratuvar çalışmasına gerek duyulmadan elde edilebilmekte, deneyin yapılmasının ve sonuçların yorumlanmasının diğer yöntemlere göre daha az zaman alması işgücü ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Geleneksel zemin inceleme yöntemi olan sondajda sonuçları etkileyen faktörlerin çokluğu, uygulama ve yorum yanlışlıkları, örselenmemiş tabir edilen numunelerin laboratuvar denemelerinde doğal durumundan büyük oranda farklı durumda olduğu gerçeği koni penetrasyon deneyi gibi arazi deneylerine rağbeti artırmaktadır. Bu çalışmada koni penetrasyon deneyi verileri kullanılarak kazık kapasitesinin hesaplanması ve geleneksel yöntemlerle olan farklılıklarının ortaya konması amaçlanmıştır.

KONİ PENETRASYON DENEYİ (CPT)

Koni penetrasyon deneyi ucu koni şeklinde olan bir silindirik borunun zemine itilmesi sırasında beliren dirençlerin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 1 ve 2). Deney sırasında 1 m uzunluğundaki tijler zemine 20 ± 2 mm/sn hızla itilirken uç direnci (q_c), çevre sürtünmesi (f_s) ve boşluk suyu basıncı (u) değerleri sürekli olarak kaydedilmektedir.



Şekil 1. Koni penetrasyon deney cihazı



Şekil 2. Koni ve sürtünme gömleği

Deney Türkiye’de henüz yaygın uygulama bulamamış ise de özellikle ince aluviyal formasyonlarda ve su altındaki zeminlerde ölçüm yapma potansiyeli bu deneyin kısa zamanda geniş uygulama alanı bulacağını göstermektedir. Günümüz koşullarında, koni penetrasyon deneyi sonuçları kullanılarak zemin kesiti ve zemin sınıfları belirlenebilmekte, sıvılaşma analizi yapılabilmektedir (1). Bunlara ek olarak yumuşak killerde drenajsız kayma direnci, kumlarda efektif kayma direnci açısı, zeminlerin kayma dalgası hızları, birim hacim ağırlığı, aşırı konsolidasyon oranı, yatay toprak basıncı katsayısı (K_0), hassaslık derecesi (S_t), sıkışma modülü (M), drenajsız elastisite modülü, konsolidasyon katsayısı (c_v), geçirimsizlik katsayısı (k_h) gibi bir çok özellik hesaplanabilmektedir (2). İlerleme sırasında zeminin içinden görüntü alabilen son teknoloji ürünü sistemlerle de deneye yapılan numune alınamama eleştirisi ortadan kaldırılmış olmaktadır.

TEKİL KAZIĞIN KAPASİTESİ

Kazığın düşey kapasitesi iki bileşenden oluşur: Birincisi, çapı D olan ve $D_f=L$ derinliğe oturtulmuş bir yüzeysel temele benzer olarak ucunda uyanan taşıma gücüdür. İkinci bileşen, L boyunda bir silindir veya prizmanın çevresindeki iri daneli zeminle sürtünmesi ya da kille

yapışması (adezyon) sonucu beliren dirençtir. Olağan koşullarda kazık son taşıma gücü uç direnci ve çevre sürtünmesinden doğan dirençlerin toplamından öz ağırlığının (W_p) çıkartılması ile hesaplanır. Toplam kapasiteyi böylece

$$Q_d = Q_{uç} + Q_{çevre} = f_b A_b + \sum_0^L f_s \xi dz - W_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

olarak ifade edebiliriz. Burada f_b kazık ucunun son taşıma gücüne karşılık gerilme, A_b uç kesit alanı, f_s kazık yüzeyi ile çevresindeki zemin arasındaki etkileşimi gösteren birim gerilme, ξ ise kazığın çevresidir.

Tekil kazıkta toplam gerilmelere göre çevre sürtünme/yapışması Alfa Metodu denilen yaklaşımla hesaplanır. Kazık kapasitesinin efektif gerilmelere göre hesaplanması ise Beta Metodu olarak nitelendirilir ve özellikle kumlu ortamda daha gerçekçi yaklaşım olduğu söylenebilmektedir (3).

KONİ PENETRASYON DENEYİ İLE KAZIK KAPASİTESİ HESABI

CPT'nin kullanıldığı alanlar listelenecek olursa kazık kapasitesinin hesaplanması yukarıda sayılan geniş listede ilk sırada yer alacaktır. Koni penetrasyon deneyi, ilk kez Hollanda'da 1934'te kumların bağıl birim hacim ağırlığını ölçerek kazık hesaplaması yapılması amacıyla kullanılmıştır (3). Laboratuvar deneylerinden gelecek kısıtlı verilerin aksine sürekli ölçüm sayesinde kazık boyutlandırma ve analizinde koni penetrasyon deneyi ölçümlerinin en gerçekçi yaklaşım olacağı güvenle söylenebilir. Deneyde ölçülen koni uç direnci ve çevre sürtünmesinin ölçek etkisi nedeniyle kazığinki ile bire bir bağıntılı olmayacağı bilirse de, arada güvenilir bir ilişki bulunduğu kesindir.

Literatürde koni penetrasyon deneyi sonuçları ile kazık kapasitesinin hesaplanması için geliştirilen çok sayıda farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemler kazığın kapasitesinin “doğrudan” ve “dolaylı” olarak hesaplandığı yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğrudan hesaplama yöntemlerinde kazığın birim uç direnci (f_b), koni uç direncinden (q_c), kazığın birim çevre sürtünmesi (f_s) ise koni gömleğinde ölçülen çevre sürtünmesinden (f_s) veya koni uç direncinden (q_c) hesaplanmaktadır. Dolaylı hesaplama yöntemlerinde ise önce koni uç direnci (q_c) ve çevre sürtünmesi (f_s) değerleri ile zeminin drenajsız kayma direnci (s_u) ve kayma

direnci açısı (ϕ) elde edilmekte, daha sonra bulunan bu parametrelerle yarı ampirik/teorik yöntemlerle kazık kapasitesi hesaplanmaktadır.

Schmertmann, DeRuiter ve Beringen (Hollanda yöntemi, Avrupa yöntemi), Bustamante ve Ganeselli (LCPC/LCP, Fransız yöntemi), Tumay ve Fakhroo, Aoki ve De Alencar, Price ve Wardle, Philipponnat, Penpile, Meyerhof ve Eslami ve Fellenius yöntemleri kazık kapasitesinin “doğrudan” hesaplandığı yöntemlere örnek olarak verilebilir (4, 5). Bu yöntemlerden Eslami ve Fellenius yöntemi dışındakilerde CPT verisi ile hesap yapılırken diğerlerinden farklı olarak bu yöntemde boşluk suyu ölçümü yapılan CPTU deney verisi kullanılmaktadır.

Titi ve Abu-Farsakh, önerilmeli betonarme çakma kare kazıkların kapasitelerinin bulunmalarına yönelik çalışmalarında kazık yükleme deneyinden gelen sonuçlarla yukarıda referans verilen on yöntemden ilk sekizinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sırasında 60 kazık yükleme deneyi ve hemen yanlarında CPT deneyleri gerçekleştirilmiş, kazık yükleme deneyinden kazık kapasitelerinin bulunması için Butler-Hoy yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada uç direncine çalışan ve kazık yükleme deneyinde göçme meydana gelmeyen kazıklar dışında kalan 35 kazıktan gelen sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır. Çalışma sonunda anılan yöntemlerden DeRuiter ve Beringen yöntemi ile Bustamante ve Ganeselli (LCPC/LCP) yöntemlerinin kazık yükleme deneyinden gelen sonuçlara en yakın değerleri verdiği, Penpile yöntemi ile en düşük kazık kapasitesinin elde edildiği belirtilmiştir (4).

LCPC YÖNTEMİ İLE KAZIK KAPASİTESİ HESABI

Bu çalışmada yukarıdaki bulgudan hareketle LCPC yöntemi örnek olarak sunulmaktadır. LCPC (Fransız Yol Araştırma Laboratuvarı) metodu farklı zemin koşullarında çok çeşitli tip kazıkta yapılan 197 adet kazık yükleme deneyi sonuçlarına dayandırılmış ayrıntılı bir yaklaşım olup, kazık kapasitesini sadece uç direnci okumalarını kullanarak hesaplar. Bu yöntemde çevre yapışma/sürtünmesi kullanılmaz (6).

LCPC yönteminde kazığın birim uç direnci

$$f_b = k_b \times q_{esd} \dots\dots\dots (2)$$

Çizelge 2. LCPC Yönteminde Kazık Kategorileri

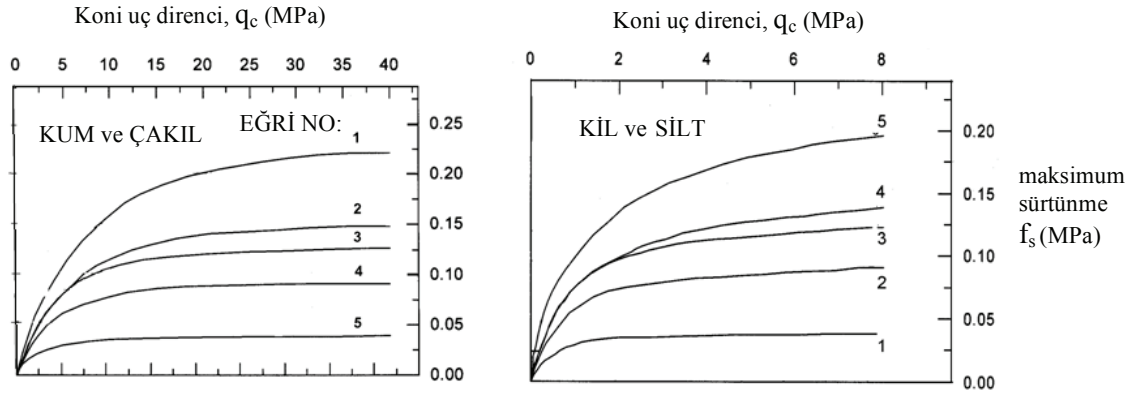
KATEGORİ	KAZIK TÜRÜ	YAPIM YÖNTEMİ
1	bentonitsiz delme şaftlı	YASS üstündeki killerde uygulanır: kuyuyu çamurla desteklemeden imal ediliyor.
2	şaftı çamurla delinen	Kuyu çamurla dolu tutulurken betonlama dipten, çamuru yukarıya ittirerek yapılıyor.
3	kaplama borulu delme	Çelik muhafaza borusunun tutucu niteliğinden yararlanılarak imal ediliyor. Beton döküldükçe boru dışarıya çekiliyor.
4	İçi boş burgu ile delinen	Uzunluğu en az kazık boyu kadar olan sürekli burgu ile imal ediliyor. Burgu dışarı alınırken ucundan beton basılıyor.
5	kuyu	Kazı elle, işçilerin kuyunun dibinde çalışmasıyla yapılıyor. Kuyu yüzeyi destekler veya kaplama borusu ile tutuluyor.
6	tip 1 mikrokazık	D<250 mm olan kaplama borulu delme kazık. Kplama borusu indirilip içi betonla doldurulduktan sonra ağız kapatılarak içeriye basınçlı hava uygulanarak boru dışarı çekilir.
7	vidalı kazık	Kohezyonsuz ve YASS altındaki zeminlerde uygulanmaz. Helezon bir uç öndüle borunun önünde yerine itilir. Uç ters çevrilip kaplama borusunu geri alırken betonlama yapılır.
8	çakma beton	150-500 mm çaplı boru, H kazıklar; 2,3,4 parça palplanstan oluşturulan kutular. Kazık profili büyük çarkla çakılırken beton çarığının yanından basılır ve bir manto oluşturur.
9	çakma hazır beton kazık	Çakılarak veya titreştirilerek indirilen betonarme veya öngermeli beton kazıklar.
10	çakma çelik	Sadece çakma çelik H, boru ve kaynakla oluşturulan çelik kazıklar.
11	öngermeli içi boş kazık	Çakmadan önce biraraya getirilen hafif donatılı içi boş, silindirik beton. Birimler 1.5-3 m boy, 700-900 mm çap, 150 mm et kalınlıklı ve ucu açık.
12	ucu tıkaçlı beton çakma kazık	Çakma uçtaki kuru beton tıkaçla yapılır. Borular dışarı çekilirken düşük çökme değerli beton dövülerek yerleştirilir.
13	çakma boru kazık	Ucu tıkaçlı boru yerine indirilir, orta çökme değerli betonla doldurulduktan sonra sadece boru çekilir.
14	içeri itilen beton kazık	Kazık çapı 300-600 mm, boyu 0.5-2.5 m olan prefabrike veya yerinde dökülen parçalardan oluşturulur. Parçalar hidrolik güçle yerine itilir.
15	içeri itilen çelik kazık	Sadece çelik kazıklar yerine hidrolik güçle itiliyor.
16	tip 2 mikrokazık	Çapı <250 mm. Donatı kafesi şafta yerleştirildikten sonra betonlama aşağıdan yukarıya yapılır.
17	yüksek basınçta enjeksiyonlu	Çapı>250 mm. Enjeksiyon sistemi yüksek basınçlar sağlayarak betonu basmalıdır.

Çizelge 3. İnce Daneli Zeminler için LCPC Parametreleri

EĞRİ No.	q _c (MPa)	KAZIK KATEGORİSİ	İMAL/YERLEŞTİRME İŞLEMİ
1	<0.7 >0.7	1→17 1,2	
2	>1.2 >1.2 >1.2 >1.2 >1.2	4,5,8,9,10,11,13,14,15 7 6 1,2 3	-Deneyim plastisitesi yüksek zeminlerdeki çelik kazıklarda q _s 1 No.lu eğriye kadar düşebilir. Daha önceden yükleme deneyi sonucu yoksa bu eğriyi; çakma beton kazıklarda kumlu veya düşük plastisiteli zeminlerde q _c >25 MPa ise 3 No.lu eğriyi kullan. -q _c <25 MPa olan ve penetrasyon hızının düşük olduğu durumlarda bunu, aksi durumda No.1 eğriyi kullan. q _c >45MPa ve penetrasyon hızı düşük ise No.3 eğriyi kullan. -Bu değerler ucunda dışı olan burguyla delgi yapılması ve hemen betonlama durumunda kullanılır. Çok sıkı temizleme ve hızlı betonlama denetimi sağlanıyorsa q _c >4.5 MPa zeminlerde no.3 eğriyi kullan. -Kuru şaftlar için kaplama borusu çekilirken betonun titreştirilmesi önerilir. YASS altında çalışmalarda pompaj gerekliyse ve muhafaza borusunun sık hareket ettirilmesi gerekiyorsa yükleme deneyi verileri yokluğunda 1 No.lu eğriyi kullan.
3	>1.2 <2	12	DTU 13.2'de belirtilen olağan uygulama durumları.
5	>0.7	16,17	Daha önce yükleme deneyinden gelen bilgiler destekliyor ve enjeksiyon düşük debide tekrarlanarak yapılıyor ise eğri No.5'i kullan.

Çizelge 4. İri Daneli Zeminler için LCPC Parametreleri

EĞRİ No.	q_c (MPa)	KAZIK KATEGORİSİ	İMAL/YERLEŞTİRME İŞLEMİ
1	<3.5	2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	
2	>3.5 >5 >5	6,7,9,11,12,13,14,15 2,3 4	-İnce kumlar için. Bu zeminlerde çelik kazıkta sürtünme küçük olacağından aksi yükleme deneyi ile bulunmamışsa eğri No.1'i kullan. - $q_c > 7.5$ MPa olan ince kumda kazıklarda 2 No.lu eğriyi kullan -Sadece ince kumlar ve boyu 30 m'den kısa delme kazıklar için. İnce kumda $L > 30$ m için fs 1 ve 2 No.lu eğriler arasında. Yükleme deneyi sonuçları yoksa No.1'i kullan. -Bir miktar kohezyon gösteren kumlar için kullanılır.
3	>7.5 >7.5	6,7,9,10,11,13,14,15,17 2,3	-İri çakıllı kum ve çakıl içindir. Beton kazıklarda yükleme deneyi ile kanıtlanıyorsa No.4 eğriyi kullan. - $L < 30$ m olan delme kazıklar ve çakıllı iri kum ve çakıllar için. - $q_c > 4$ MPa çakıllar için No.4 eğriyi kullan.
4	>7.5	8,12	- Çakıllı iri kum ve çakıl için.
5	>5	16,17	-Sonuçlar kazık taşıma deneyi sonuçlarına dayandırılmışsa No.5 eğriden daha büyük değerler kullanılabilir.



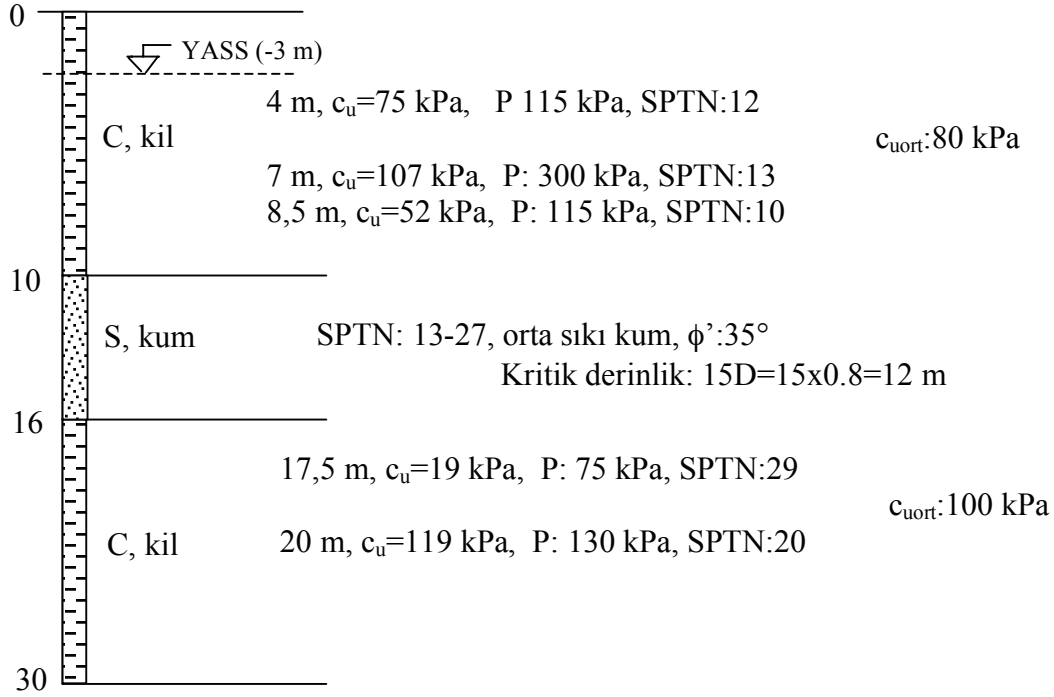
Şekil 4. LCPC yönteminde maksimum sürtünme yapışma eğrileri

ÖRNEK ÇÖZÜM

Adapazarı merkezinde yürütülen çalışmaların bazılarında sondaj ve koni penetrasyon deneyleri birlikte gerçekleştirilmiştir. Bu sitelerde yapılan sondajlardan alınan numunelerin laboratuvarda denenmesiyle elde edilen parametreler ve koni penetrasyon deneyi verileri ile kazık kapasitelerinin hesaplanıp karşılaştırma yapılması mümkün olmaktadır.

Örnek olarak Şekil 5'de gösterilen kesitte çapı (D) 80 cm, boyu (L) 14 m olan kazık için yapılan hesap sonuçları verilmektedir. Bu kesitte, kazık kapasitesi laboratuvar sonuçlarından önce Alfa yöntemiyle hesaplanmış ve sonuç koni penetrasyon deneyi sonuçlarını kullanan

LCPC yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Şekil 5’de P: UD tüpü ağzında ölçülen serbest basınç direncini ve c_u : UU üç eksenli deneyden elde edilen parametreyi ifade etmektedir.



Şekil 5. Örnek Kesit

Sondaj sonuçlarına göre yapılan hesapta ilk 10 m’de kil tabakasının özellikleri dikkate alınmakta, CPT ile hesapta ise Çizelge 5’de gösterilen aradaki kumlu tabakaların varlığı dikkate alınabilmektedir. Toplam gerilmelere göre yapılan hesapta çevre direnci 1504 kN, kazık kuma oturduğu için uç direnci 4028 kN olarak hesaplanmıştır. Buna göre kazık kapasitesi 5532 kN olarak bulunmuştur. Çizelge 5’den de görülebileceği gibi LCPC yönteminde çok ince katmanlar da dikkate alınabilmektedir. Bu yöntemde çevre direnci 2408 kN, uç direnci ise 750 kN olarak hesaplanmıştır, toplam kapasite ise 3158 kN çıkmaktadır.

Kumlu tabakaların sondajda belirtilmemesi, alttaki kum için kayma direnci açısının SPTN değerine bağlı olarak bulunması, SPT deneyinin hatalara son derece açık olması vb. sebepler sondaj sonuçlarına göre yapılan hesaplamaların sorgulanmasına neden olmaktadır.

Çizelge 5. LCPC Yöntemi ile Çevre Sürtünmesi/Yapışması Hesabı

Derinlik (m)	q_{cort} (MPa)	Zemin Gurubu		$F_{\text{smaks.}}$	Kalınlık (m)
0-1.0	1.0	İnce daneli	Katkı ihmal	-	-
1.0-2.5	3.0	Kum	3 MPa<3.5 MPa ise eğri no: 1	0.080 MPa	1.5
2.5-5.7	1.0	İnce daneli	1 MPa $\approx$ 0.7 MPa ise eğri no: 1	0.030 MPa	3.2
5.7-6.3	2.5	Kum	2.5 MPa<3.5 MPa ise eğri no: 1	0.065 MPa	0.6
6.3-7.7	1.2	İnce daneli	1.2 MPa=1.2 MPa ise eğri no: 1	0.065 MPa	1.4
7.7-8.3	2.5	Kum	2.5 MPa<3.5 MPa ise eğri no: 1	0.065 MPa	0.6
8.3-9.0	1.3	İnce daneli	1.3 MPa>1.2 MPa ise eğri no: 2	0.068 MPa	0.7
9.0-16.0	10.0	Kum	10 MPa>7.5 MPa ise eğri no: 3	0.105 MPa	6.0

SONUÇ

Bu çalışmada mevcut CPT verilerinden seçilen kesit üzerinde 80 cm çaplı ve 14 m boyunda bir kazığın kapasitesi klasik yöntem ve CPT verileri kullanılarak hesap yapan LCPC yöntemiyle elde edilmiştir. Hesap sonuçlarına bakıldığında, CPT verileriyle hesaplanan kazık kapasitelerinin sondaj sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan değerlerden farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Verilen örnekte kazık çevresinde sağlanan dirençlere bakıldığında CPT verilerinden elde edilen değer, laboratuvar sonuçlarından elde edilen değerden %50 kadar fazla çıktığı görülmektedir. Uç dirençlerine bakıldığında ise CPT deneyinden elde edilen değerlerin diğer sonucun %20'si mertebesinde hesaplanabildiği görülmüştür. 1.5 m'de bir yapılan ve hataya çok açık olan SPT deneyi sonucundan çıkılarak bulunan bu yüksek değerlerin sorgulanması gerekmektedir. Bu sonuçlara bakılarak insan etkisinin minimumda olduğu, zemini cm boyutunda inceleyebilen CPT deneyinin kazık kapasitesinin hesaplanmasında kullanılmasının uygun olduğu söylenebilmektedir.

KAYNAKLAR

- (1) Bol, E., Özocak, A., Önalp, A., “A New Approach to Soil Classification by the Use of CPTU Test, International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering”, Eastern Mediterranean Univ., Lefkoşa, TRNC, 2003, pp.157-162.
- (2) Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M., Cone Penetration Testing In Geotechnical Engineering, Blackie Academic & Professional, 1997.
- (3) Önalp, A., Sert, S., Geoteknik Bilgisi-III: Bina Temelleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2006, 375 sayfa.
- (4) Titi, H.H., Abu-Farsakh, M.Y., “Evaluation of Bearing Capacity of Piles from Cone Penetration Test Data”, LTRC Project No. 98-3GT, Louisiana, 1999, 115 pp.
- (5) Fellenius, B.H., Basics of Foundation Design, 2006.
- (6) Bustamante, M., and L. Gianeeselli. “Pile Bearing Capacity Predictions by Means of Static Penetrometer CPT”. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, 1982, Vol. 2, pp. 493-500.