

THE EVALUATION OF THE LIQUEFACTION POTENTIAL OF FINE GRAINED SOILS BY THE USE OF CONE PENETRATION TEST

Ertan BOL	Akın ÖNALP	Nazile URAL
Assist Prof. Dr.	Prof.. Dr.	Res. Asist.
Sakarya University	İstanbul Kültür University	Sakarya University
Adapazarı/Turkey	Istanbul/Turkey	Adapazarı/Turkey

ABSTRACT

The use of the cone penetration test with measurement of porewater pressures has enabled the engineer to scrutinize soil conditions along a profile much more effectively than by tests like the Standard penetration. The ability to sample at two cm intervals in the CPTU has created the advantage of recognising fine grained soils susceptible to liquefaction. The soil type behaviour index I_c is a powerful tool to distinguish susceptible and non liquefying soils. It is shown that calculating I_c with the conventional formulae may be misleading because contractant and dilatant property of a fine grained soil is overlooked. If however porewater pressures are taken into account, a meaningful interpretation is possible. In this context the changes in the slope of the $z-u_2$ curve during penetration is evaluated .

ARAZİ KONİ PENETRASYON DENEYİ İLE ZEMİNLERİN SIVILAŞMA YETENEĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ertan BOL	Akın ÖNALP	Nazile URAL
Yrd. Doç. Dr.	Prof. Dr.	Arş. Grv.
Sakarya Üniversitesi	İstanbul Kültür Üniversitesi	Sakarya Üniversitesi
Sakarya/Türkiye	Sakarya/Türkiye	Sakarya/Türkiye

ÖZET

Boşluk suyu basıncı ölçümü ile birlikte yapılan arazi koni penetrasyon deneyi (CPTU) zeminlerin mekanik, hidrolik ve sıkışabilirlik özelliklerini belirlemede dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı şehirleri alüvyonlar üzerine kurulu olan Türkiye’de de son yıllarda bu yönde bir eğilim vardır. CPTU deneyi ile aynı zamanda sıvılaşma potansiyeli gibi zeminlerin dinamik özelliklerini tayin etmek de mümkündür. CPT ile yapılacak sıvılaşma analizinin standart penetrasyon deneyi ile yapılabilecek oranla birçok avantajları bulunmaktadır. Bunların en önemlileri arasında; uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı gibi çok farklı özelliklerin aynı anda ölçülmesi, deneyin 2 cm de bir bilgisayara veri göndermesi ve insan müdahalesinin hiç olmaması sayılabilir. CPTU ile temiz kumların sıvılaşması için günümüzde bir görüş birliği sağlanmış ise de, silt gibi ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin tayini hakkında tam bir görüş birliği bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir yöntemin geliştirilmesi ve bu konuda daha güvenilir sonuçların elde edilebilmesi olmuştur.

AMAÇ

Bu araştırmada arazi koni penetrasyon deneyi ile temiz kumlarda yapılan sıvılaşma analizi özetlenmiştir. Bununla birlikte Adapazarı alüviyal/fluviyal zeminlerinde 1999 depreminde sıvılaşma olayının gözlemlendiği ve gözlemlenmediği sitelerde sondaj ve CPTU çalışmaları birlikte yürütülerek boşluk suyu basıncı artış ve azalışlarının zemin tipini tanımlamada ve sıvılaşma kriteri olarak kullanmada sağlayacağı avantajlar irdelenmiştir.

GİRİŞ

Türkiye’de zemin incelemeleri genellikle sondaj sırasında yapılan standart penetrasyon (SPT) deney sonuçlarına dayandırılmaktadır. Bu deneyde elde edilen örselenmiş numunelerden ortamın fiziksel, ayrıca alınacak örselenmemiş numunelerden de mekanik özellikleri tayin edilmeye çalışılmaktadır. Bununla birlikte, gelişen teknoloji ile boşluk suyu basınçlarının da ölçülebildiği koni penetrasyon deneyi (CPTU) çağdaş dünyada önemli bir uygulama alanı bulmuş ve artık geleneksel yöntem olarak kabul edilen standart penetrasyon deneyinin yerini almaya başlamıştır. Bunun en önemli nedeni; belirli büyük aralıklarla (75-150 cm) yapılan SPT deneyinin aksine, CPTU ile zemini kesintisiz (2 cm’ de bir) olarak inceleme olanağının sağlanmış olmasıdır. Buna ek olarak, SPT’ye oranla yüksek oranda tekrarlanabilirlik göstermesi, tamamen elektronik ölçüm alındığından insan hatasının sıfıra yakın olması, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basınçları hakkında önemli bilgiler vermesi CPTU’ nun üstünlükleri arasında sayılabilir.

Sıvılaşabilir zeminlerin tanımlanmasında CPTU deneyi, Standart Penetrasyon deneyinde olduğu gibi, CRR/CSR çevrimsel gerilme oranını kullanmakta ve kumlarla sınırlandırılmaktadır. Bilindiği üzere son yıllarda yapılan çalışmalar özellikle plastik olmayan (NP) siltler gibi ince daneli zeminlerin de sıvılaşabildiğini göstermekte ve bunların sıvılaşma yeteneğinin tayini için incelenen zeminin fiziksel özelliklerine dayanan bir çok kriter geliştirilmiş bulunmaktadır. Bu bildiride CPT verileri ile ince daneli zeminlerin söz konusu fiziksel özellikleri arasında bulunan ilişkiler incelenmiş ve bunların sıvılaşma tanısında kullanımı açıklanmıştır.

Temiz Kumlarda CPT ile Sıvılaşma Tayini

Seed ve Idriss. (1971) deprem yüklemeleri sırasında oluşan çevrimsel sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için genel kabul gören bir metodoloji geliştirmişlerdir (1). Bu yöntemde; bir dizayn depremi tarafından oluşturulan çevrimsel kayma gerilmesi profilinin “*cyclic stres ratio*” (CSR) ve zeminin çevrimsel direnç oranının “*cyclic resistance ratio*” tahmin edilmesi gerekmektedir. Eğer CSR, CRR’ dan büyük ise çevrimsel sıvılaşma meydana gelebilir. CSR’ ın tahmini için basitleştirilmiş bir prosedür Seed ve Idriss (1971) tarafından verilmiştir (2):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left[\frac{a_{max}}{g} \right] \left(\frac{\sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad [1]$$

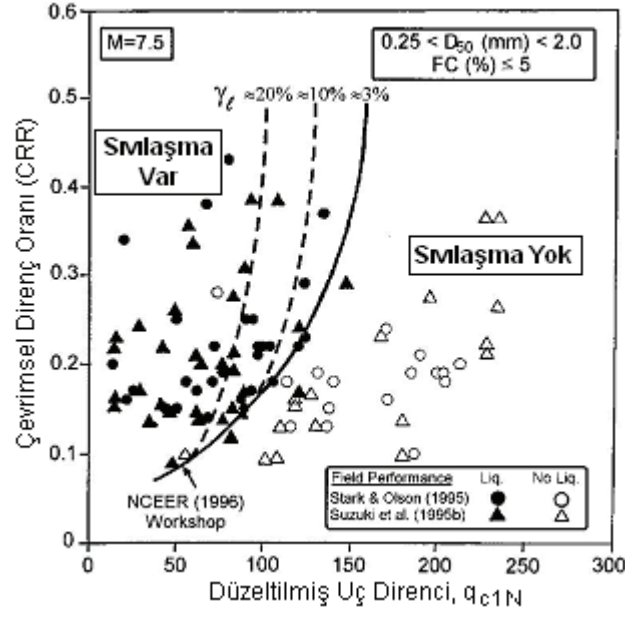
burada τ_{av} ortalama çevrimsel kesme gerilmesi; a_{max} zemin yüzeyinde maksimum yatay ivme; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ yerçekimi ivmesi; σ'_{vo} ve σ'_{vo} toplam ve efektif düşey örtü yükü basıncı ve r_d derinliğe bağlı gerilme azaltma faktörüdür. r_d ’ nin tahmini için değişik araştırmacıların sunduğu bazı formülasyonlar bulunmaktadır. Seed ve Idriss (1971) aşağıdaki basit bağıntıları önermiştir (2):

$$\begin{aligned} \text{eğer } z < 9.15 \text{ m} &\Rightarrow r_d = 1.0 - 0.00765z \\ \text{eğer } z = 9.15 - 23 \text{ m} &\Rightarrow r_d = 1.174 - 0.0267z \end{aligned} \quad [2]$$

Seed ve diğ. (1985) standart penetrasyon deneyi (SPT) ile temiz kumlarda CRR’ ı tahmin eden bir metot geliştirmişlerdir (2). Son yıllarda ise CPT kesintisiz okuma alması, güvenilirlik ve tekrar edilebilirliğinin yüksek olmasından dolayı CRR’ ı tahmin etmede daha popüler olmuştur. Son yıllarda kullanışlı arazi performans verilerinde “özellikle CPT ‘ de’ ” önemli artışlar olmuştur. Şekil 1’ de temiz kumlar için tavsiye edilen korelasyon aşağıdaki basitleştirilmiş denklemlerle tahmin edilebilir (3):

$$\begin{aligned} \text{eğer } 50 < (q_{c1N})_{cs} \leq 160 \quad CRR_{7.5} &= 93 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08 \\ \text{eğer } (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad CRR_{7.5} &= 0.833 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05 \end{aligned} \quad [3]$$

burada $(q_{c1N})_{cs}$ normalleştirilmiş eş temiz kum penetrasyon direncidir.



Şekil 1. Temiz kumlar için çevrimsel direnç oranı (CRR) (3)

Robertson ve Wride (1998) (q_{c1N})cs için aşağıdaki formülü önermişlerdir (3):

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c (q_{c1N}) \quad [4]$$

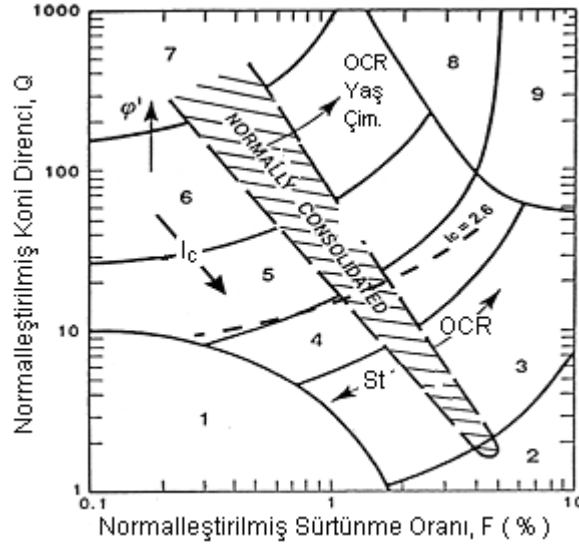
burada K_c zeminin dane karakteristiğini ifade eden bir düzeltme faktörüdür. Robertson ve Wride (1998) (3) K_c ' nin tahmini için Robertson (1990) (4) tarafından önerilen zemin davranış kartının (Şekil 2) ve zemin davranış tipi indeksinin (I_c) kullanılmasını önermişlerdir, burada I_c :

$$I_c = \sqrt{[3.47 - \log Q]^2 + [1.22 + \log F]^2} \quad [5]$$

ile bulunur ve

$$Q = q_{c1N} = \left(\frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_{a2}} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad [6]$$

normalleştirilmiş CPT penetrasyon direncidir ve boyutsuzdur.



Şekil 2: Normalleştirilmiş zemin tipi kartı (4)

n = gerilme üssü; $F = f / [(q_c - \sigma_{vo})] \times 100\%$ yüzde cinsinden normalleştirilmiş sürtünme oranıdır; f CPT sürtünme direncidir; σ_{vo} ve σ'_{vo} toplam ve efektif düşey örtü yükü basıncı; P_a bir referans basınçtır ve σ'_{vo} ile aynı birimdedir (örn. eğer σ'_{vo} kPa ise $P_a = 100$ kPa dır); diğer bir referans basınç olan P_{a2} , q_c ve σ_{vo} ile aynı birimdedir (örn. eğer q_c ve σ_{vo} MPa ise $P_{a2} = 0.1$ MPa' dır). Robertson (2004) n değerinin ilk önce $n=1$ alınarak Q ve F in tayininden sonra bir I_c değerinin elde edilmesini ve buna göre de aşağıdaki yöntemin kullanılabileceğini söylemiştir (5):

$$\text{eğer } I_c < 1.64 \Rightarrow n = 0.5$$

$$\text{eğer } I_c > 3.30 \Rightarrow n = 1.0$$

[7]

$$\text{eğer } 1.64 < I_c < 3.30 \Rightarrow n = (I_c - 1.64)0.3 + 0.5$$

Burada gerilme sabitindeki değişim $\Delta n < 0.01$ oluncaya kadar iterasyon yapılır. I_c ile K_c arasındaki ilişki şu formülle verilmiştir:

$$K_c = 1.0 \text{ eğer } I_c \leq 1.64$$

$$K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 + 33.75I_c - 17.88 \text{ eğer } I_c > 1.64$$

[8]

Sonuçta sıvılaşmaya karşı direnç: $FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} MSF$ formülü ile verilir (6). Burada

$$MSF = \frac{174}{M^{2.56}} \text{ deprem büyüklüğü ölçek faktörüdür.}$$

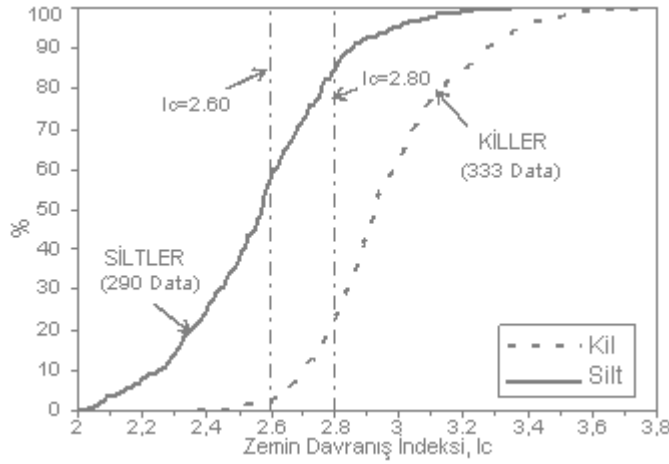
İnce Daneli Zeminlerde CPT ile Sıvılaşma Tayini

Geleneksel yöntemlerle ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli çoğu araştırmacı tarafından zeminlerin likit limitine, doğal su muhtevasına, içerdiği kil yüzdesi ve dane boyutuna bağlı olarak irdelenmiştir. Literatürde bu parametreleri değişik oranlarda kullanan farklı sıvılaşma kriterleri mevcuttur. 1999 depreminde Adapazarı'nda meydana gelen sıvılaşma ve çevrimsel hareketlenme olaylarının bir çoğunun siltli zeminlerde meydana geldiği görüşü ağırlık kazanmıştır. Önalp ve diğ. (2006) Adapazarında sıvılaşma meydana gelen ve gelmeyen bölgelerdeki ince daneli zeminleri incelemişler ve Y.A.S.S. altındaki silt ortamlarında ve $M_w > 7$ koşulunda sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için:

- a) Likit limitin %33' den az
- b) Sıvılık indisinin (I_L) veya w_n/w_L oranının 0.9' dan büyük
- c) Kil oranının %10' dan düşük ve
- d) Ortalama dane boyutunun 0.02 mm' den büyük

olması gerektiğini ortaya koymuşlardır (7).

Sıvılaşma yeteneğinin CPT ile tayininde yukarıda anlatılan Robertson ve Wride (1998)' in özellikle gevşek temiz kumlar için önerdiği çevrimsel kayma gerilmesi yöntemine dayanan çalışması genel kabul görmektedir. Araştırmacılar söz konusu çalışmalarında ince daneli zeminler için CPTU sonuçlarından elde edilen zemin tipi davranış indeksi I_c ' nin sıvılaşmada önemli bir belirleyici olduğunu söylemişler ancak sıvılaşabilir ince daneli zeminler hakkında kesin bir sınır çizememişlerdir. Kumları ve siltli zeminleri $I_c=2.6$ değeri killerden ayırmakta ve bu değer üstündeki zeminlerin çok fazla oranda kil içerdiğinden dolayı sıvılaşmaz olduğu kabul edilir (3). Bazı araştırmacılara göre bu sınır değer index deneyleri ile sınıflaması yapılan zeminler ile bire bir örtüşmemektedir (7) (8). Gilstrap (1998)' e göre I_c ' nin 2.4 ile 2.6 değerleri arasında zeminler index deneylerine göre %20 ile %50 oranında killi zemin olarak sınıflandırılmaktadır (8). Önalp ve diğ. (2006) TS1500/2000' e göre kil ve silt olarak sınıflandırılan zeminlerin zemin davranış indeksi (I_c) üzerinde yapmış oldukları çalışma Şekil 3' te verilmiştir (7). Buna göre araştırmacılar killerin $I_c > 2.60$ sınırı ile ayrılırsa siltlerin %50' ye yakınının $I_c > 2.60$ olarak çıktığını ve hata oranının arttığını söylemişlerdir. Bununla birlikte kil sınırı $I_c > 2.80$ alındığında ise siltlerde yaklaşık % 20' lik bir hata yapılırsa dahi bu yüzdeye büyük çoğunlukla sıvılaşma potansiyeli bulunmayan plastik siltlerin (MI, MH) girmesi nedeniyle ayırım daha gerçekçi hale geleceğini ifade etmişlerdir (7).



Şekil 3. Kil ve siltlerin zemin davranış indisi (I_c) açısından incelenmesi (7)

Yukarıda verilen I_c değerleri Robertson ve Wride (1998)' ın önerdiği formülasyon ile elde edilmiştir (3). Aşağıdaki tabloda diğer araştırmacılar tarafından önerilen I_c değerlerinin formülleri gösterilmektedir (Tablo 1). Bu formüllerde boşluk suyu basıncının da B_q bağıntısı ile yer almasının daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülebilir. Boşluk suyu basıncının zemin tipi ile olan ilişkisi şu şekilde özetlenebilir: Yüksek oranda ince dane içeren zeminler ile yüksek hassaslık derecesine sahip zeminler yüksek u_2 (hemen koni arkasına yerleştirilmiş filtrede ölçülen boşluk suyu basıncı) verirler. Buna karşın, iri daneliler, sıkı ve sürtünmeli zeminler ile yüksek OCR' ye sahip zeminler düşük u_2 okumaları verirler. Bu nedenlerle, boşluk suyu basınçlarını da göz önüne alan formülasyonların güvenilirliğinin daha yüksek olacağı düşünülmektedir. Tablo 2' de ise değişik araştırmacılara göre I_c değer aralıklarının hangi zemin tipini temsil ettiğini gösteren çizelge bulunmaktadır.

Tablo 1. Farklı araştırmacılara göre I_c formülleri

Araştırmacılar	I_c	Denklem No
Jefferies ve Davies (1991) (9)	$\sqrt{\left\{3 - \log [Q(1 - Bq)]\right\}^2 + [1.5 + 1.3(\log F)]^2}$	[9]
Been ve Jefferies (1992) (10)	$\sqrt{\left\{3 - \log [Q(1 - Bq) + 1]\right\}^2 + [1.5 + 1.3(\log F)]^2}$	[10]
Robertson ve Wride (1998) (4)	$\sqrt{[3.47 - \log Q]^2 + [1.22 + \log F]^2}$	[5]
Kun Li ve diğ. (2007) (11)	$\sqrt{\left\{3.25 - \log [Q(1 - Bq)]\right\}^2 + [1.5 + 1.3(1 + \log F)]^{2.25}}$	[11]
Bu çalışma	$\sqrt{\left\{3 - \log [Q(1 - m)]\right\}^2 + \left[1.5 + 1.3\left(\log \frac{F}{1 - m}\right)\right]^2}$	[12]

Tablo 2. Zemin davranış tipi sınırları

Zemin Davranış Tipi	Bölge	Ic (4)	Ic (11)	Ic (10)
Organik Zeminler-Turba	2	>3.60	>3.22	>3.22
Killer:Siltli Kil-Kil	3	2.95-3.60	2.76-3.22	2.82-3.22
Silt Karışımları: Killi Silt-Siltli Kil	4	2.60-2.95	2.40-2.76	2.54-2.82
Kum Karışımları: Siltli Kum-Kumlu Silt	5	2.05-2.60	1.80-2.40	1.90-2.54
Kumlar: Temiz Kum-Siltli Kum	6	1.31-2.05	1.25-1.80	1.25-1.90
Çakıllı Kum-Sıkı Kum	7	<1.31	<1.25	<1.25

Tablo 1’ de gösterilen formüller ile Robertson ve Wride (1998) in kullandığı formül (3) arasında beliren en büyük farklılık Q parametresinin boşluk suyu basınçlarının bir göstergesi olan $(1-B_q)$ değeri ile çarpılması olmuştur. Burada

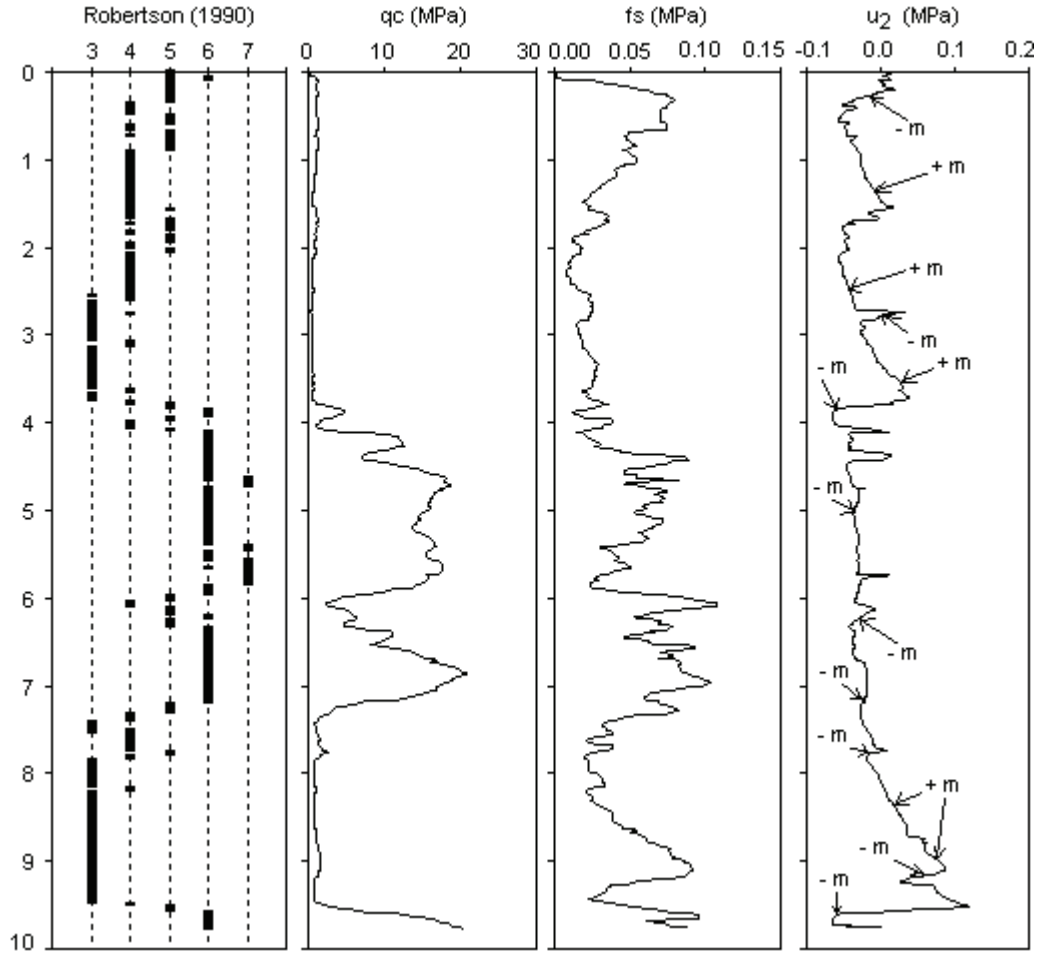
$$B_q = \frac{u - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad [13]$$

bağıntısından bulunabilir. Burada u: penetrasyon sırasında ölçülen boşluk suyu basıncı (bsb), u_0 : statik su yükü, q_t : bsb ye göre düzeltilmiş uç direnci, σ_{v0} : örtü yüküdür. Araştırmacılar Q’ nun B_q ile birlikte kullanımı sayesinde özellikle ince daneli zeminleri (silt-kil) birbirinden ayırmada üstünlük sağladığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada sitelerden gelen verilerin incelenmesi ile B_q ’ nun gerçekten silt-kil ayırımına büyük katkılar sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, sonda ucundaki koni arkasına yerleştirilen poröz taş yardımı ile derinlikle ölçülen boşluk suyu basınçlarının (u_2) killi zeminlerde pozitif eğimle (+m) artış gösterdiği, genleşme (dilatasyon) gösteren siltlerde ise negatif eğimler (-m) verdiği göze çarpmıştır (Şekil 4). Bu eğimlerin zemini sınıflandırmada ne gibi katkılar sağlayacağı bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Bu durumda “m” eğiminin her okuma kademesinde hesaplanması ve indeks deneyleri ile sınıflandırılması yapılan bir laboratuvar numunesini temsil eden derinlik boyunca da toplam “m” değerlerinin ortalaması alınmalıdır. “m” değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

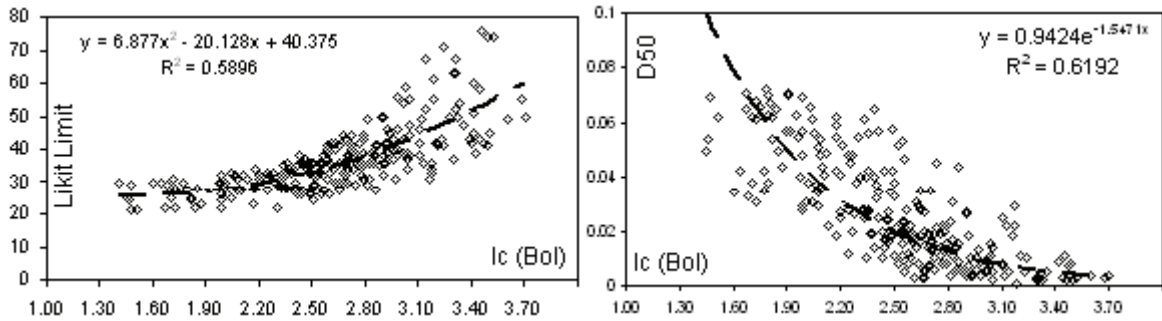
$$m = \frac{\Delta u_2}{\Delta z} = \frac{u_{2z2} - u_{2z1}}{z_2 - z_1} \quad [14]$$

burada u_{2z2} ve u_{2z1} sırasıyla z_2 ve z_1 derinliklerinde ölçülen boşluk suyu basınçlarıdır. Bu eğim kullanılarak bir çok Ic formülü üzerinde çalışılmış ve en uygun olan formülün Tablo 1’ de bu çalışma için verilen formül olduğuna karar verilmiştir.



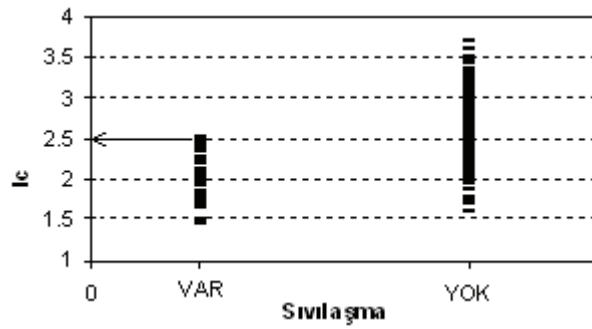
Şekil 4. Boşluk suyu ölçümü yapılan tipik bir CPTU profili

Şekil 5' te bu çalışma kapsamında önerilen I_c formülü ile zeminlerin likit limit (w_L) ve ortalama dane boyutu (D_{50}) arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Görüleceği gibi, zeminlerin likit limiti ile I_c arasındaki ilişki ancak $I_c=2.4$ sınırından sonra etkin olmakta, tersine I_c 'nin 2.4 den küçük olduğu durumlarda ortalama dane boyutu etkin olmaktadır.



Şekil 5. I_c ile Likit limit (w_L) ve ortalama dane boyutu (D_{50}) arasındaki ilişki

Önalp ve diğ. (2006)' nin önerdiği ince daneli zeminlerin sıvılaşması için gerekli olan kriterleri (7) sağlayan zeminler söz konusu I_c değeri ile karşılaştırılmış ve Şekil 6' daki sonuç çıkmıştır. Buna göre, $I_c > 2.50$ şartını sağlayan zeminlerin sıvılaşmayacağı görülmektedir. Bu durumda, I_c ' nin 2.5' ten küçük olduğu durumlarda zeminin sıvılaştığını öne sürmek için bu kritere giren tabakaların tüm kesit boyunca kümülatif toplamına bakılması gerekir. Bu çalışmanın ileriki aşamalarında bu sınır I_c değeri ile birlikte Toprak ve diğ. (2003) önerdiği sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) (12) değerlendirilmesi sıvılaşan ve sıvılaşmayan siteler için yapılacaktır.



Şekil 6. Sıvılaşan ve sıvılaşmayan ince daneli zeminlerin I_c değerleri

SONUÇLAR

Gelişen teknoloji ve gelişmiş ülkelerdeki durum gözönüne alındığında, yakın gelecekte Türkiye'de de koni penetrasyon deneyinin zemin incelemelerinde başrol oynayacağı açıkça görülmektedir. Koni penetrasyon deneyi ile zeminlerin mekanik, fiziksel ve hidrolik özellikleri hakkında geliştirilmiş birçok korelasyonlar bulunmakta ve günümüzde konu tartışılmaktadır. Koni penetrasyon deneyi ile kesintisiz zemin incelemesi olanağı doğduğundan, eskiden fark edilmesi çoğun mümkün olmayan, en ince sıvılaşabilir katmanlar bile yakalanmakta ve değerlendirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında daha çok ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin CPTU deneyi ile tayini irdelenmiş ve ölçülen boşluk suyu basınçlarının, sıvılaşabilir siltli zeminleri sıvılaşmaz killerden veya siltli killerden ayırmada, kullanılabilir olduğu ortaya çıkmıştır. Bu ayırımı yapmada; kil tabakalarında derinlik arttıkça boşluk suyu basınçlarının arttığı ve pozitif eğim gösterdiği, silt tabakalarında ise derinlik arttıkça negatif veya sıfıra yakın eğimler verdiği özelliğinden yararlanılmıştır.

Teşekkür

TÜBİTAK' a bu çalışmanın MAG 104M387 projesi ile gerçekleştirilebilmesi için katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunmaktayız.

KAYNAKLAR

1. Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971), "Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97 (SM9): 1249-1273.
2. Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985), "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(12): 1425-1440.
3. Robertson, P.K., and Wride, C.E. (1998), "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test." *Canadian Geotech. J.*, Ottawa, 35 (3), 442–459.
4. Robertson, P.K., (1990), "Soil Classification using the CPT", Canadian Geotechnical Journal. 27(1),151-158.
5. Robertson, P.K., (2004), "Evaluating Soil Liquefaction and Post-earthquake deformations using the CPT", University of Alberta, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Canada.
6. Youd, T.L., Idriss, I.M, Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H. (2001), "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4): 297 – 313.
7. Önalp, A., Bol, E., Ural, N., (2006), "Siltlerin Sıvılaşabilirliği: Adapazarı Kriterinin Geliştirilmesi", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
8. Gilstrap, S.D. (1998), CPT based liquefaction resistance analyses evaluated using case histories, M.Sc. thesis, Department of Civil Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo, UT. Technical Report CEG-98–019.
9. Jefferies, M.G., and Davies, M.P., (1991), "Soil classification using the cone penetration test.Discussion", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, No. 1, pp. 173 - 176.

10. Been, K., and Jefferies, M.G. (1992), "Towards systematic CPT interpretation", In Proceedings of the Wroth Symposium, Oxford, U.K., July, pp. 44–55.
11. Kun Li, D., Juang, H., Andrus, R.D., Camp, W.M., (2007), "Index Properties-Based Criteria for Liquefaction Susceptibility of Clayey Soils: A Critical Assessment", J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, Volume 133, Issue 1, pp. 110-115.
12. Toprak, S., and Holzer, T.L., (2003), "Liquefaction potential index: Field assessment", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 129, no. 4, p. 315-322.