

Koni Penetrasyon Deneyi ile Zeminlerin Karakterizasyonu

¹*Ertan BOL, ¹Aşkın ÖZOCAK, ¹Sedat SERT

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Özet

Zeminlerin fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin belirlenmesi Geoteknik Mühendisliğinin en önemli konularının başında gelmektedir. Buna yönelik olarak uzun yıllardır sondajlı zemin incelemesinde sıkça uygulanan standart penetrasyon deneyinde (SPT); sonuçları etkileyen faktörlerin çokluğu, uygulama ve yorum yanlışlıkları, bunun yanında tüp içine alınan ve örselenmemiş tabir edilen numunelerin laboratuvar denemelerinde doğal durumundan büyük oranda farklı durumda olduğu gerçeği, diğer arazi deneylerinde gelişmelere neden oluşturur. Gelişen teknoloji sayesinde boşluk suyu basınçlarını da ölçebilen Arazi Koni Penetrasyon Deneyi (PCPT) ile zeminlerin çeşitli özelliklerini artık kesintisiz olarak belirlemek mümkün olmuştur. Koni penetrasyon deneyi, insan müdahalesi olmadan yapılan sürekli ölçüm sayesinde zemin profilinin ayrıntılı ve gerçeğe en yakın şekilde elde edilmesine olanak vermektedir. Deney; kısa zamanda istenilen sayıda tekrarlanabilmekte, zemin parametreleri numune alınmasına ve laboratuvar çalışmasına gerek duyulmadan elde edilebilmekte, ayrıca deneyin yapılmasının ve sonuçların yorumlanmasının diğer yöntemlere göre daha az zaman alması, işgücü ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada deneyin özellikleri yanında Adapazarı zeminlerinde yapılan 350'nin üzerindeki boşluk suyu basıncı ölçümlü koni penetrasyon deneylerinden seçilmiş örnek ile uygulama ve değerlendirme aşamaları anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin incelemesi, koni penetrasyon, örselenme, boşluk suyu basıncı, kayma dalgası hızı

The Determination of Ground Properties by the Cone Penetration Test

¹*Ertan BOL, ¹Aşkın ÖZOCAK, ¹Sedat SERT

¹Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Sakarya, Türkiye

Abstract

Determination of the physical, mechanical and hydraulic properties of soils is one of the most important tasks in geotechnical engineering. The conventional approach of drilling a borehole and attempting to procure undisturbed samples often present difficulties due to sample disturbance, in addition SPT procedures still have human and equipment based problems. So, some other alternative in-situ tests started to being widely used. The use of the cone penetration test for the determination of soil properties is a novel approach to soil investigation because of its speed and requiring minimum human intervention on the readouts. Today, the standard penetration test, a long time favourite is full of pitfalls in implementation and interpretation whereas the CPT with pore pressure measurements has been used increasingly in respect to improving technology to determine some other parameters (ie: chemical properties of water, electrical resistivity, pH, temperature) in addition to geotechnical properties of soils and detecting soil stratigraphy. This paper describes the advantages of the CPT through the results obtained in the city of and Adapazarı during the past fourteen years.

Keywords: Soil investigation, cone penetration, disturbance, pore water pressure, shear wave velocity

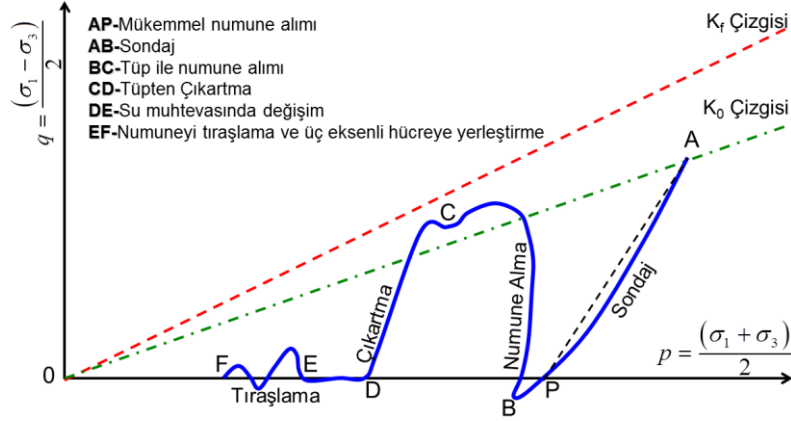
*Sorumlu Yazar: Ertan BOL Adres: Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, 54187, Sakarya TÜRKİYE. E-mail: ebol@sakarya.edu.tr, Telefon: +902642955746

Doi: 10.5505/apjes.2014.58066

1. Giriş

Şekil 1 geleneksel yöntemlerle sondaj sırasında arazide tüp içine örselenmemiş numune (UD) alınması, tüpün taşınması, numunenin laboratuvarda tüpten çıkarılması, tıraşlanması ve denenmesi aşamalarında maruz kaldığı farklı gerilme izi profilini göstermektedir. Buradan anlaşılacağı üzere zeminin laboratuvarda ölçülen özellikleri örselenme nedeni ile

yerindeki değerlerinden farklı bulunmaktadır [1]. Ayrıca sondaj uygulamasının özelliği nedeniyle zemin kesitinde davranışı etkileyebilecek görece ince tabakaların belirlenmesi sondaj mühendisinin becerisine bağlı kalmakta, her ne kadar özen gösterilse de ince tabakaların gözden kaçması kaçınılmaz olmaktadır. Bu durum son yıllarda gelişen teknolojinin de yardımıyla arazide doğrudan ölçüm yapan deneylere eğilimin artması sonucunu getirir.



Şekil 1. Numune alınması ve hazırlanması aşamalarında meydana gelen örselenmeler [1]

Özellikle yumuşak killer, sondaj açılması, numunenin alınması ve laboratuvar hazırlığında ciddi derecede örselenmeye maruz kalmaktadır [2]. Bu durumun laboratuvar deney sonuçlarının hatalı biçimde elde edilmesine ve projenin güvensiz ya da aşırı boyutlandırılmasına neden olacağı açıktır. Yumuşak killerde mükemmel örselenmemiş numune alınmasındaki zorluklar ve kumlarda numune almanın ancak zeminin dondurulması gibi hem zor hem de maliyetli bir işlem sonucunda mümkün olması, yerinde yapılan deneylerin önemini artırmaktadır.

2. Koni Penetrasyon Deneyi

Koni Penetrasyon Deneyi (CPT: Cone Penetration Test), Geoteknik' te zemin özelliklerini yerinde belirlemek için sıklıkla kullanılan etkili bir arazi deneyidir. 1920' li yıllarda Hollanda'da kumlarda kazık kapasitesinin hesaplanması amacıyla uygulanmaya başlanmıştır. Koni penetrasyon deneyi, özellikle yumuşak/gevşek ince daneli zeminlerden çakıl boyutundaki iri daneli zeminlere kadar kesit boyunca karşılaşılan zemin tabakalarında zemin özelliklerinin örselenme olmaksızın yerinde belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Deneyin temel amacı zemin profilinin tanımlanması, zemin tabakalarının geoteknik özelliklerinin ve tasarıma yönelik parametrelerin ölçüm sonuçlarından belirlenmesidir. CPT deneyinde, kesit alanı 10 cm²,

konik uç açısı (apex angle) 60° olan silindir şeklinde bir sonda 20 mm/s sabit hızla zemine itilmektedir. Bu işlem esnasında koni ucunda oluşan direnç (q_c), silindirik gömlekte oluşan sürtünme direnci (f_s) ve konik ucun farklı kısımlarında penetrasyon sırasında meydana gelen boşluk suyu basınçları (u) elektronik olarak ölçülerek zemin kesiti ve zemin sınıfları elde edilmektedir. Ayrıca istenilen derinliklerde penetrasyon durdurulduğunda boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi izlenerek zeminin geçirimsizlik özellikleri hakkında bilgi edinilebilmekte, aynı zamanda statik boşluk suyu basınçları da belirlenebilmektedir [3].

Deney ilk zamanlarda sadece; ucu konik olan bir aletin zemine itilmesi sırasında karşılaşılan toplam direncin ölçümüyle yürütülmüştür. Daha sonraları 1960'lı yıllarda koninin arkasına geçirilen bir sürtünme gömleği sayesinde içinden geçtiği tabakaların sürtünme dirençlerini de ölçme olanağı doğmuş, böylece uç ve çevre dirençlerinin ayrı ayrı ölçülmesi mümkün olmuştur. Bu sayede zeminlerin cinsleri koni penetrasyon deney sonuçlarına dayanılarak daha doğru bir şekilde belirlenmeye başlamıştır. Yakın tarihlerde gelişen teknolojiye paralel olarak koni içine yerleştirilen transdüşer yardımı ile içinden geçilen tabakaların dinamik boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün olmuştur. Burada dinamik terimi koninin hareket halinde iken

ölçtüğü boşluk suyu basınçlarını ifade etmek için kullanılmaktadır. Boşluk suyu basınçlarının da ölçüldüğü koni penetrasyon deneyinde CPT kısaltması ya ön P (*piezocone*) takısını alarak PCPT ya da U (u: boşluk suyu basıncının ölçüldüğü filtrenin adı) son ekini alarak CPTU şeklinde tanımlanır. Bunun yanında koni penetrasyon deney aleti üzerine yerleştirilecek değişik teçhizatlar yardımı ile kayma dalgası hızları, zeminin elektriksel iletkenliği ölçülebilmekte, kamera ile geçilen tabakaların eş zamanlı kayıt altına alınması (*vision cone penetrometer*) mümkün olabilmektedir.

Başlangıçta derinlerde ölçülen parametreler manometre yardımıyla yukarıda gözlemlenirken daha sonraları elektrik koninin icadı ile kablolu sistemler ölçülen parametreleri yukarıya aktarmaya başlamıştır. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte ölçülen parametreler kablolu akustik sistemler yardımı ile bir mikroişlemci tarafından ses sinyaline çevrilerek yüzeye hata payı olmadan aktarılabilmektedir. Bu sinyal sondanın bağlandığı mikrofon tarafından algılanarak ara bağlantısı yapılmış veri toplayıcıya aktarılmaktadır. Veri toplayıcıda ayrıca sinyallerin gönderildiği derinliğin kaydı da yapılmaktadır. Günümüzde ise radyo dalgaları ile çalışan sistemlerin ve hatta veriyi yukarıya aktarmadan koni içine yerleştirilen bellekler yardımıyla saklayan sistemlerin kullanımı mümkün olmaktadır.

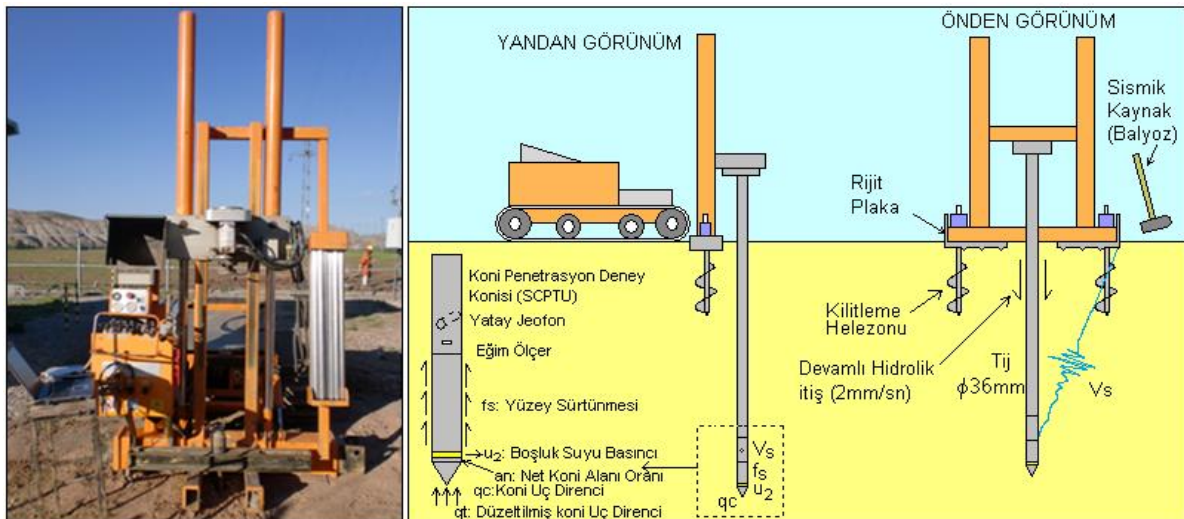
3. Deneyin Uygulanması

Koni penetrasyon aleti, kamyon veya paletli bir araç üzerine monte edilmiş şekilde çalışmaktadır. Şekil 2'

de Sakarya Üniversitesi' nin 200 kN kapasiteli CPT aleti görülmektedir. Kullanılacak sondanın tipine göre ölçülebilecek maksimum uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri değişmekte olup Şekil 2' deki makina için sırasıyla 50, 0.5 ve 2.5 MPa' dır. Bu değerler, Adapazarı gibi yumuşak ve gevşek zemin türlerinin geniş yer kapladığı bir yerleşim bölgesi için yeterli olmaktadır. Deneyin yapılacağı alana getirilen araç, ankrajlar vasıtasıyla zemine sabitlendikten sonra, sonda zemine itilmeye başlanır. Kullanılan tijlerin boyları 1 m olup, inilecek derinlik zeminin göstereceği dirence göre 0-30 m arasında değişebilmektedir. Deney, bilgisayar kontrollü yapıldığından tijlerin düşeyliği sürekli gözlenmekte; herhangi bir yanlış veri alınmasına izin verilmemektedir. Deney esnasında veri alma aralıklarının 1 cm'ye kadar düşürülebilmesi zemin özelliklerinin ölçümünde süreklilik sağlamakta; bu da CPT' nin diğer zemin inceleme yöntemlerine göre daha hassas çalıştığına göstergesi olmaktadır.

4. Ölçümler ve Tanımlamalar

Koni zemine itilirken CPT sistemlerde uça ölçülen kuvvetin kesit alanına bölünmesi ile bulunan uç direnci (q_c), yan yüzeydeki kuvvet hücresinin ölçtüğü toplam yükün sonda yanak alanına bölünmesiyle bulunan çevre sürtünme/yapışması (f_s); CPTU sistemlerde boşluk suyu basınçları (u_1, u_2, u_3) sistemi denetleyen bilgisayarca sürekli kaydedilmektedir. Buna ek olarak CPTU (veya PCPT) sistemlerde istenilen derinlikte sönümlenme deneyi (*dissipation test*) ve sismik (SCPTU) sistemlerde kayma dalgası hızları (V_s) ölçümü yapılabilmektedir.



Şekil 2. Koni penetrasyon deney aleti, CPT deney sistemi ve ölçülen parametreler

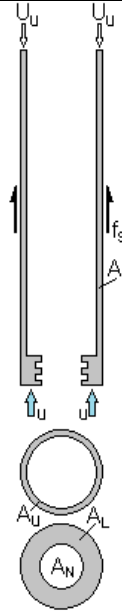
Alınan ölçüm sonuçlarından zemin sınıfları tayin edilmekte, zeminin taşıma gücü ve sıvılaşma davranışı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir.

Koni sabit hızla zemine itilirken kaydedilen boşluk suyu basınçları (u) dinamik değerlerdir ($u = u_0 + \Delta u$). Deney esnasında statik boşluk suyu basıncında (u_0) meydana gelen değişiklik (Δu), zemin cinsine göre pozitif veya negatif değer alabilir. Deney sırasında koni ucunda ve arkasında oluşan dengelememiş

boşluk suyu basınçlarının etkisini ortadan kaldırmak amacıyla uç direnci ve çevre sürtünmesi için boşluk suyu basıncına göre düzeltme yapılmalıdır [3]. Ayrıca istenilen derinlikte yapılan sönümlenme deneyi ile zeminin geçirimsizlik özelliği hakkında da veri alınabilir. Deney esnasında ölçülen ve bunlara bağlı olarak hesaplanabilen terimlerin tanımları ve açılımları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Kullanılan terimler ve hesaplamaları

Tanım	Değeri
Konik uç alan faktörü	$a = A_N / A_T = (A_T - A_L) / A_T$
Sonda yüzey alan faktörü	$b = (A_L - A_U) / A_S$
Koni uç direnci (düzeltilmemiş)	$q_c = F_c / A_T$
Koni uç direnci (düzeltilmiş)	$q_t = q_c + u \cdot (1 - a)$
Normalleştirilmiş koni uç direnci	$Q_i = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$
Normalleştirilmiş sürtünme oranı	$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0})$
Sonda çevre sürtünmesi (düzeltilmemiş)	$f_s = F_s / A_s$
Sonda çevre sürtünmesi (düzeltilmiş)	$f_T = f_s - \left[u_2 \cdot b + 0.3 \cdot \Delta u \cdot \left(\frac{1-a}{15} - b \right) \right]$
Sürtünme oranı (%)	$R_f = (f_s / q_t) \cdot 100$
Boşluk suyu basıncı oranı	$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_v)$
Zemin davranış tipi katsayısı [16]	$I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q_i)^2 + (\log F_r + 1.22)^2}$



5. Koni Penetrasyon Deneyi Sonuçları ile Analiz

Bu bölümde Adapazarı kent merkezinde gerçekleştirilmiş koni penetrasyon deneylerinden seçilmiş örnek veri grubu kullanılarak yapılan işlemler ve analiz sonuçları sunulmuştur. Adapazarı Yenigün Mahallesi’nde N40.77103 ve E030.40769 koordinatlarında gerçekleştirilen CYG278 nolu sonda 15.00 m derinliğe kadar yürütülmüş ve uç direnci, sürtünme direnci ile boşluk suyu basıncı ölçümleri her iki santimetrede bir kayıt altına alınmıştır. Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında, konsolidasyon ve hidrolik karakteristiğini de öğrenebilmek amacıyla belirli seviyelerde durularak artan boşluk suyu basıncının dağılması beklenerek sönümlenme (*dissipation*) deneyleri yürütülmüştür. Sondalama sırasında değişik derinliklerde kuyu içi yöntem ile kayma dalgası hızları tayin edilmiştir. Ayrıca sonda verileri ile karşılaştırmak amacı ile bir

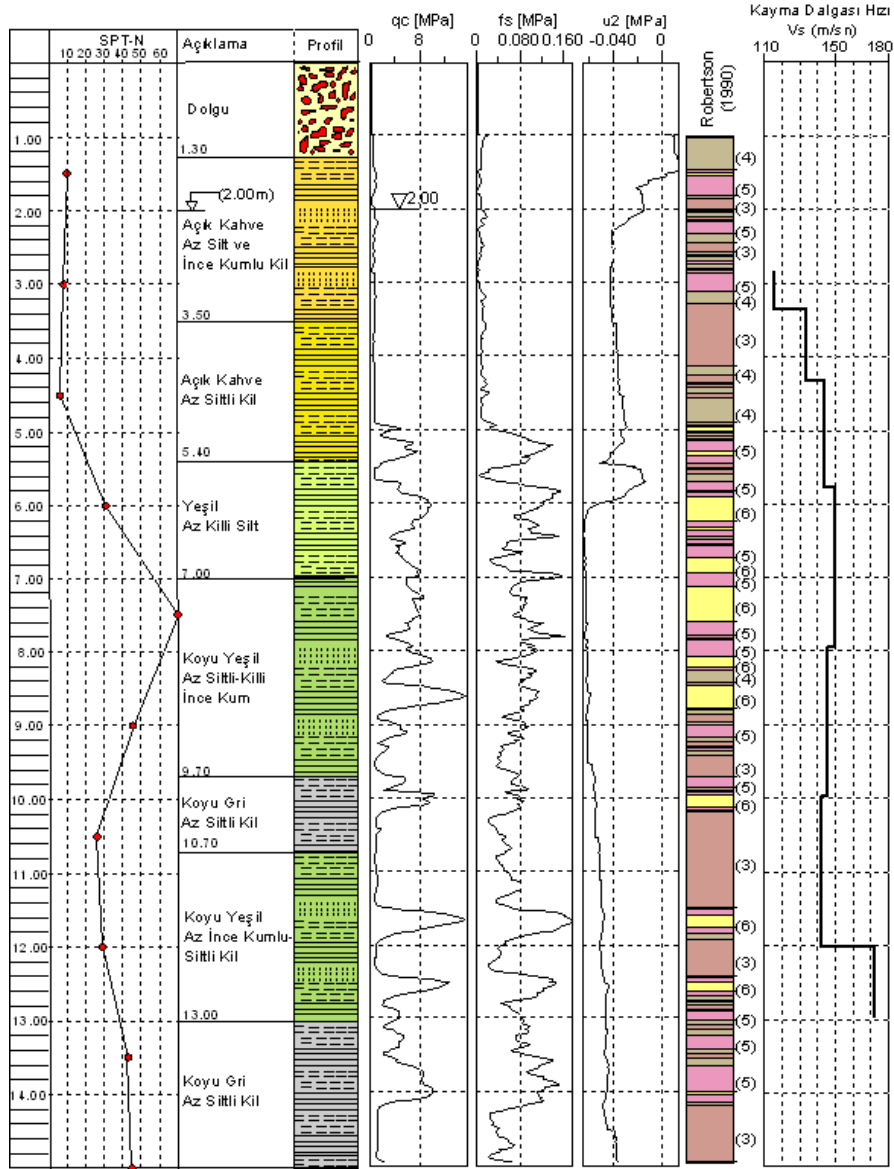
adet de yine 15.00 m derinliğinde dönel sondaj (SYG610) yaptırılmıştır. Arazide ölçülen su seviyesi -2.00 metredir.

5.1. Zemin Kesiti ve Zemin Sınıfları

Şekil 3’de Adapazarı’nda bu çalışmada irdelenen sondaj (SYG610) ve sonda (CYG278) çalışmasından elde edilen zemin kesiti görülmektedir. SPT darbe sayıları ile PCPT uç dirençleri arasında iyi bir uyum göze çarpmakla beraber sondaj çalışmasında en titiz gözetimle araştırma derinliği boyunca ancak 8 farklı zemin tabakası tespit edilebilirken, PCPT verileri ile aynı derinlik boyunca otuzdan fazla zemin tabakasını yakalamak mümkün olmuştur. Buradan sondalama ile zemin kesitinin en küçük tabakalarının bile yakalanabileceği anlaşılmaktadır. Sondaj, uygulama tekniği açısından devamlı karot alınmadıkça bu imkanı sağlayamamaktadır.

SYG610 nolu sondajdan elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler önce TS1900-1 (2006) ve TS1900-2 (2006) uyarınca deneye tabi tutulmuşlar daha sonra TS1500 (2000)' e göre sınıflandırılmışlardır. Fiziksel deney olarak su muhtevası ölçümleri, kıvam limitleri ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Sondajda sırasında TS 5744 (1988) ve Eurocode 7/Pt.3 (TS ENV 1997-3) uyarınca her 1.5 m' de standart penetrasyon deneyi (SPT)

ölçümleri yapılmıştır. Arazi ve laboratuvar deney sonuçları Tablo 2' de sunulmuştur. Şekil 3 ve Tablo 2 birlikte değerlendirildiğinde çalışılan bölgede zeminin üst 7 metresinin düşük plastisiteli silt ve killerden, 7.00-9.70 metreler arasının siltli kumlardan ve ince bir yüksek plastisiteli kil tabakasının altından kuyu sonuna kadar ise düşük-orta plastisiteli siltlerden oluştuğu görülmektedir. Ortam bu hali ile tipik bir taşkın ovası istifi sunmaktadır.



Şekil 3. Adapazarı Yenigün Mahallesi' nde aynı noktaya ait sondaj (SYG610) ve sonda (CYG278) logları

Tablo 2. SYG 610 nolu sondajın laboratuvar deney sonuçları ve arazi SPTN₃₀ değerleri

Derinlik (m)	Renk	w _L (%)	w _P (%)	w _n (%)	% İnce	% Kil	Sınıf (TS1500/2000)	SPTN ₃₀
1.5	Kahve	31	20	28	66	10	CL	10
2.5	Kahve	NP	NP	30	81	10	ML	---
3	Kahve	NP	NP	28	93	14	ML	8
4.5	Kahve	33	21	31	73	13	CL	6
6	Yeşil	30	NP	28	87	14	ML	33
7	Yeşil	NP	NP	17	49	10	SM	---
7.5	Yeşil	NP	NP	22	37	8	SM	71
9	Yeşil	NP	NP	27	49	9	SM	46
10	Yeşil- Koyu Gri	NP	NP	23	46	---	SM	---
10.5	Yeşil	52	24	45	73	---	CH	26
12	Yeşil	NP	NP	25	51	---	ML	28
13.5	Yeşil	35	25	34	93	---	MI	43
15	Yeşil	33	NP	39	93	---	ML	45

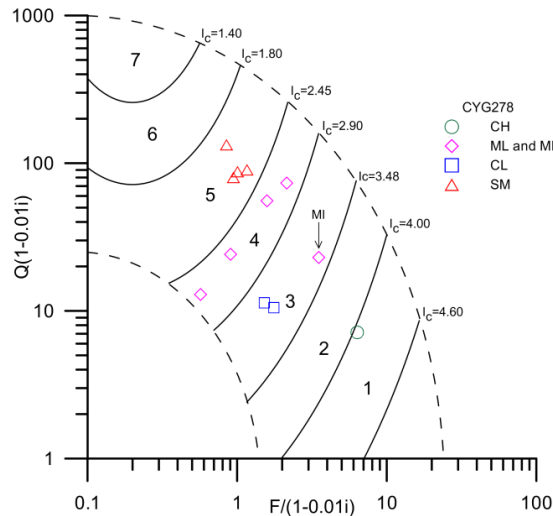
Literatürde CPT ölçümlerinden zemin sınıflandırması sürtünme oranı (R_f) ve normalleştirilmiş uç direnci (Q_t) değerleri kullanılarak yapılan birçok yayın mevcuttur [4,5]. Başlangıçta zeminler sadece geliştirilen grafikler üzerinden bir sınıflandırmaya tabi tutulurken ilerleyen zamanlarda grafiklerin üzerlerinde bulunan ve zeminleri birbirlerinden ayıran eğriler formülize edilmiştir [6-10]. Söz konusu eğriler genelde bir daireyi temsil etmekte ve zemin davranış indeksi olarak adlandırılmaktadırlar (I_c). Bunlara ek olarak, CPT verileri ile zemin sınıflandırmasında boşluk suyu basıncının derinlik boyunca değişen eğiminin özellikle zemin sınıflandırmasında önemli rol oynadığı ifade

edilmiştir [11]. Buna göre boşluk suyu basıncı eğimi;

$$i = \frac{\Delta u_2}{\Delta \sigma_0} = \frac{u_{2z_2} - u_{2z_1}}{(\sigma_{0z_2} - \sigma_{0z_1})} \quad (1)$$

formülü ile elde edilebilir. Burada u_{2z_2} ve u_{2z_1} ; z_2 ve z_1 derinliklerinde ölçülen boşluk suyu basınçlarını ve σ_{0z_2} ise σ_{0z_1} yine sırası ile z_2 ve z_1 derinliklerindeki toplam gerilmeleri ifade etmektedir. Araştırma sonucunda zemin davranış indeksi formülü, boşluk suyu basıncı eğimini de içerecek biçimde aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir:

$$I_c = \sqrt{\left\{3.47 - 0.9 \log \left[Q(1 - 0.01i) \right] \right\}^2 + \left\{1.4 + 2 \left[\log F / (1 - 0.01i) \right] \right\}^2} \quad [11] \quad (2)$$



Şekil 4. CYG278 nolu sondajın deney sonuçlarına göre sınıflandırması [11]

Tablo 3. Zemin sınıflarını temsil eden I_c değerleri

Bölge	I_c	Zemin Sınıfı (TS1500/2000)
1	$I_c < 1.4$	SP veya Çakıllar
2	$1.40 < I_c < 1.8$	SW-SM veya SP-SM
3	$1.80 < I_c < 2.45$	SM veya ML
4	$2.45 < I_c < 2.9$	CL veya ML
5	$2.90 < I_c < 3.48$	CI – MI veya CL
6	$3.48 < I_c < 4$	CH veya CI
7	$I_c > 4.00$	CH

Tablo 3' te zemin davranış aralıklarının TS1500 (2000)' e göre hangi zemin sınıfı tarafından temsil edileceği yine aynı çalışmada sunulmuştur [11]. Şekil 4' te ise araştırma sonucunda önerilen sınıflandırma

grafığı, bu çalışma kapsamında SYG610 nolu sondajdan elde edilen zemin numunelerinin verileri eşliğinde sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere laboratuvar sonuçlarına göre TS1500 (2000) uyarınca yapılan zemin sınıflandırması önerilmiş olan CPT sınıflandırma sistemiyle [11] büyük uyum sağlamaktadır.

5.2. Sıvılaşma Analizi

Sondaj sırasında gerçekleştirilen standart penetrasyon deneyi (SPT) genellikle daha önce belirtildiği gibi her 1.50 metrede bir yapılır. Dolayısı ile SPT verilerine dayalı sıvılaşma analizleri de bu derinliklerden elde edilen veriler kullanılarak yapılmaktadır. Buna göre numune alınan derinlikler arasında yer alan ara zemin tabakalarının farklı özelliklere sahip olması durumunda belirecek hatalar sıvılaşma analizinde sonuçların doğruluğunu tartışmalı hale getirmektedir.

Bununla birlikte standart penetrasyon deney sonuçları ile sadece iri daneli kum zeminlerin sıvılaşma potansiyeli hesaplanabilir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar silt zeminlerin de sıvılaşabileceğini göstermiş ve siltin sıvılaşmasını belirlemek için de laboratuvar fiziksel deney sonuçlarına dayalı bir takım yöntemler geliştirilmiştir [12-15]. Bu durum, sondaj ile sıvılaşma yeteneğinin belirlenmesinde arazide yapılan SPT deneyinin yanı sıra laboratuvar deneylerinin de yapılması gerekliliğini ortaya koymuş bu da süreci uzatan ve maliyeti arttıran bir durum olmuştur.

Tablo 4. SYG 610 nolu sondajın UU deney sonuçları

Sondaj No	Derinlik (m)	e_0	ρ_n (kN/m ³)	S_r	c_u (kPa)	ϕ_u	E_u (MPa)	Cep Pen. (kPa)
SYG610	2.50	0.68	19.59	100	35	0	1.73	100

İnce daneli zeminlerin drenajsız kayma direncinin CPT ile elde edilmesinde birçok yaklaşım üretilmiştir. Problem literatürde teorik çözümleri ve deneysel korelasyonları kullanmak üzere iki ana yaklaşımla çözülmeye çalışılmıştır.

Koni penetrasyon deneyi verileri ile normal yüklenmiş killerde drenajsız kayma direnci şu şekilde hesaplanabilmektedir [19]:

$$s_u = (q_c - \sigma_{vo}) / N_k \quad (3)$$

Koni faktörü N_k 11-19 arasında değişmekte [20] olup Adapazarı'nda ortalama olarak 15 alınabilir [21].

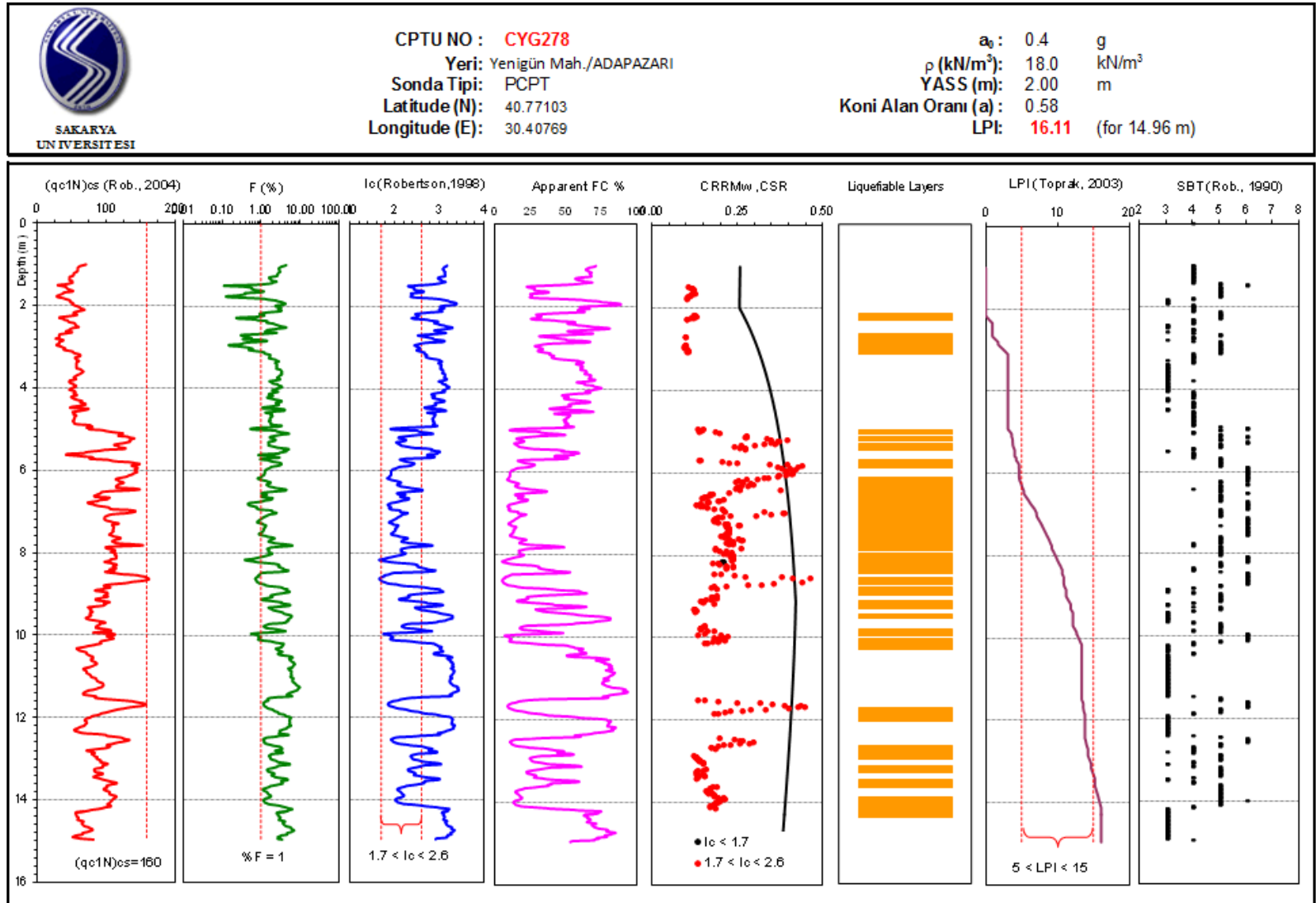
Sıvılaşma yeteneğinin CPT ile tayininde özellikle gevşek temiz kumlar için önerilen çevrimsel kayma gerilmesi yöntemine dayanan çalışma genel kabul görmektedir [16, 17]. İnce daneli zeminler için CPTU sonuçlarından elde edilen zemin tipi davranış katsayısı I_c 'nin sıvılaşmada önemli bir belirleyici olduğu belirtilmiş olmakla birlikte sıvılaşabilir ince daneli zeminlerin sıvılaşma eşiği sınırı tartışmalıdır [16]. Bununla birlikte yapılan çalışmada kumlar ve siltli zeminler $I_c=2.6$ değeri ile killerden ayrılmakta ve bu değer üstündeki zeminler çok fazla oranda kil içerdiğinden dolayı sıvılaşmaz kabul edilmektedir. Ayrıca Sıvılaşma Potansiyeli İndeksine (LPI) göre yapılan analizde de LPI'nın 15' den büyük çıkması durumunda ortamın sıvılaşma açısından riskli olduğu anlaşılmaktadır [18]. Şekil 5' de yapılmış sıvılaşma analizine göre söz konusu inceleme alanında sıvılaşmanın mümkün ve olası olduğu anlaşılmaktadır.

5.3. Kayma Direnci Parametreleri

5.3.1. Drenajsız kayma direnci

SYG610 nolu sondajda 2.50 m derinlikten alınmış örselenmemiş (UD) numune üzerinde yapılan drenajsız-konsolidasyonsuz (UU) üç eksenli hücre kesme deneyinin sonuçları Tablo 4' te verilmiştir.

Buna göre çalışma alanında zemin profilinin üst kısımlarında ince daneli zeminlerin önemli yer tuttuğu görülmekte ve 2.50-3.00 metre derinliğindeki zeminlerin ortalama uç direncinin 450 kPa ve bu seviyede ortalama toplam gerilmenin 50 kPa olduğu göz önüne alınırsa bu basit yaklaşımla kayma direncinin 27 kPa olduğu anlaşılır. Adapazarı zeminleri için yapılan çalışmada [21] ince daneli zeminlerin drenajsız kayma direncilerinin dane karakterlerini de hesaba katan normalleştirilmiş koni penetrasyon direnci (q_{cIN} -boyutsuz) parametresi ile daha doğru sonuçların yakalanabileceği ortaya atılmıştır. Buna göre drenajsız kayma direnci



Şekil 5. CPT sonuçları kullanılarak yapılan sıvılaşma analizi

$$s_u = \frac{(q_{c1N})_{cs}}{N_{cs}} \quad (4)$$

formülü ile hesaplanabilir. Araştırmacılar N_{cs} değerini 1.402 olarak tayin etmişlerdir. Bu durumda 2.50-3.00 metre derinliğindeki zeminlerin ortalama normalleştirilmiş koni penetrasyon direncinin (q_{c1N}) 42 olduğu göz önüne alınırsa drenajsız kayma direncinin 30 kPa olduğu hesap edilir. Bu yaklaşımla laboratuvarında ölçülene daha yakın bir değer yakalandığı dikkate değerdir.

5.3.2. Drenajlı kayma direnci

Drenajlı koşullar; yüklerden kaynaklanan hiçbir aşırı boşluk suyu basıncının oluşmadığı, yükteki değişimlerin yeterince düşük olduğu veya bu yüklerin yeterli uzunluktaki bir sürede (uzun vadeli) yerinde kaldığı durumlardır. Dolayısıyla drenajlı kayma direnci (c' ve ϕ') geoteknik tasarımda en önemli özelliklerdendir. Söz konusu parametrelerin elde edilmesi için laboratuvarında konsolidasyonlu-drenajsız (CU) veya konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneyleri gerçekleştirilir. Bu deneyler oldukça uzun zaman almakta ve insan hatasına açık bulunmaktadır. Bununla birlikte laboratuvarında denenen küçük boyutlardaki bir numunenin arazideki gerçek durumu yansıtamayacağına yönelik tartışmalar da sürmektedir.

Kumlar üzerinde konu ile ilgili birtakım çalışmalar yapılmıştır ancak killer üzerinde yapılan çalışmalar ise yok gibidir. Mevcut teorik yöntemler PCPT verilerinden drenajsız kayma direnci parametrelerinin korele edilebileceğini iddia etseler de bu metodlar ciddi problemler taşımaktadırlar. Bu çözümler zemin içinde ilerleyen koni etrafındaki toplam ve boşluk suyu basınçlarını tahmin etmek için aşırı varsayımlar yaparlar. Ne yazık ki yumuşak normal konsolide killer haricinde koni etrafındaki boşluk suyu basınçlarını modellemek veya ölçmek bugüne değin mümkün olmamıştır.

Taşıma gücü teorisi kullanılarak kalibrasyon silindiri içerisinde denenen beş farklı temiz kum üzerinde yapılan bir deneysel çalışma sonuçlarına göre temiz kuvars kumlarında ($c'=0$) efektif sürtünme açısının:

$$\phi' = \arctan[0.1 + 0.38 \log(q_t / \sigma'_{v0})] \quad (5)$$

formülü ile bulunabileceğini ifade edilmiştir [22]. Kalibrasyon silindirinde daha fazla örnek (24 kum) üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre geliştirilen

alternatif yaklaşımda efektif kayma direnci açısı:

$$\phi' = 17.6^\circ + 11.0^\circ \log(q_{t1}) \quad (6)$$

ile elde edilebilir [23]. Burada q_{t1} gerilme normalizasyonu olup aşağıdaki şekilde kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir [24]:

$$q_t = \frac{(q_t / \sigma_{atm})}{(\sigma'_{v0} / \sigma_{atm})^{0.5}} \quad (7)$$

Efektif kayma direnci parametrelerinin (c' ve ϕ') tayini için geliştirilen bir yöntemde efektif gerilmelere (σ_{v0}) göre taşıma gücü;

$$q_t - \sigma_{v0} = N_m (\sigma'_{v0} + a) \quad (8)$$

ile hesaplanmaktadır [25]. Burada:

$$q_t = q_c + (1 - a)u$$

$$N_m = \frac{N_q - 1}{1 + N_u B_q} \quad (9)$$

Burada;

a = atraksiyon

$$N_q = \text{Taşıma kapasitesi faktörü} = \tan(45 + \frac{1}{2}\phi') e^{(\pi/2)\beta \tan\phi'}$$

β = Plastifikasyon açısı

$$N_u = \text{Taşıma kapasitesi faktörü} = 6 \tan\phi' (1 - \tan\phi')$$

Δu = Koni arkasına yerleştirilen filtrede aşırı boşluk suyu basıncıdır.

Bu yöntemde göre drenajlı kayma direnci açısını (ϕ') tahmin etmek için $\tan\phi$, N_m ve B_q ' nun bir arada kullanıldığı grafiğin yorumlanması gerekmektedir. Söz konusu grafik zemin türlerine göre farklılıklar göstermektedir. Araştırmacılar aşırı konsolide (OC) Beaumont kili için β değerini -150 olarak almışlardır. β değeri kil içinde ilerleyen koni etrafında gelişen plastik zonun şeklinin bir ölçüsüdür. Zemin türüne göre değişiklik gösterir ve aşırı konsolide killerde -200 < β < -100 arasındadır. N_m ve B_q ' nun devamlı bir hesaplaması tüm profil boyunca yapılabilir. Bu efektif sürtünme direnci açısı profilinin devamlı bir şekilde elde edilmesini sağlayacaktır. Sonuçta efektif kohezyon c' tüm derinlik boyunca

$$c' = a \cdot \tan\phi' \quad (10)$$

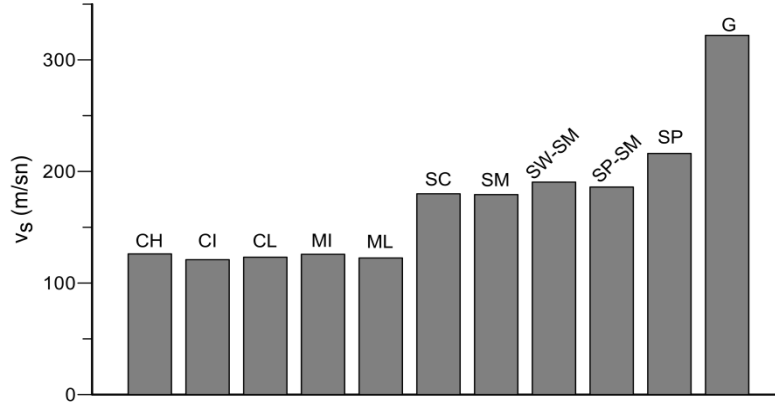
formülü ile elde edilebilir.

5.4. Kayma Dalgası Hızları

SPCPT deneyinde istenen derinlikte durularak çok sayıda kayma dalgası hızı ölçümü yapmak mümkün olmaktadır. Kayma dalgası hızı ölçümü için, sonda arkasındaki alıcıdan gelen kablo tijlerin içinden geçerek veri toplayıcıya ulaşmaktadır. Kuyu içi/sismik koni yöntemi uyarınca zemin yüzeyinde rijit bir plakaya balyoz vuruşu ile oluşturulan sismik dalgalar istenen derinlikte durdurulmuş olan sonda içindeki alıcıya ulaşmakta ve bilgisayar belleğine kaydedilmekte, buradan kayma dalgası hızları hesap edilebilmektedir. Yaygın olarak uygulanmakta olan yüzeysel jeofizik yöntemlerle sunulan zemin profillerinde genellikle yumuşak zemin ve sert zemin adlandırmasıyla iki farklı katman gösterilmektedir. Şekil 3'de son sütunda kayma dalgası hızlarının

derinlikle değiştiği, sağlam tabakaların altında daha gevşek veya yumuşak zemin tabakalarına girildiği görülebilmekte, bu da SPCPT'nin yüzeysel jeofizik ölçümlerine üstünlüğünü göstermektedir.

Adapazarı kent merkezinde yapılan bir çalışmada 30 noktadan gelen sondaj ve CPT ile yapılan kuyu içi sismik verileri karşılaştırılmış ve Şekil 8'deki grafik ortaya konmuştur [26]. Şekil 6'da yaklaşık 200 ölçüm kullanılarak elde edilmiş zemin sınıflaması ile kayma dalgası hızları arasındaki bağıntı grafik olarak gösterilmektedir. Grafikte yatay ekseninde yer alan zemin cinsleri soldan sağa sırasıyla inceden iri daneye doğru gelişmektedir. Zemin sınıfları kilden çakıla doğru ilerledikçe ortalama kayma dalgası hızlarında belirgin bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Kayma dalgası hızı – zemin cinsi ilişkisi (Özocak ve diğ., 2004 [26]'den değiştirilerek)

5.5. Diğer Zemin Özellikleri

Koni penetrasyon deneyi sonuçları kullanılarak zeminlerin 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) hesaplanabilmektedir [19].

6. Sonuçlar

Koni penetrasyon deneyi Türkiye'de bir çok yörede karşılaşılan özellikle aluviyal kökenli yumuşak/gevşek zeminlerin özelliklerinin yerinde hızlı ve güvenilir olarak ölçülmesinde modern bir yaklaşım olarak öne çıkan zemin inceleme yöntemlerindedir. Çok sayıda inceleme noktası gerektiren büyük projelerde sondaj ve jeofizik ölçüm ekseni sayısının en az seviyede tutularak PCPT

ölçümlerine ağırlık verilmesi ile incelemenin insan faktöründen ve örselenmeden kaynaklanan hatalardan arındırılması mümkün olacaktır. Ayrıca arazi ve laboratuvar işlemlerinin azalması maliyeti azaltıp, hızı arttıracaktır. CPT verilerinin standart zemin sınıflandırma simgeleri ile karşılaştırılması sırasında boşluk suyu basıncı eğiminin de kullanılması daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

Sıvılaşma analizlerinde en ince tabakaları dahi yakalayabilen CPT yöntemi ayrıca kesin tabaka değişim sınırlarını da belirleyebildiğinden sondaj verileri ile yapılan değerlendirmelere göre gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte dane karakteristiğini de içeren normalleştirilmiş uç direncinin drenajsız kayma direnci tayininde kullanılmasının, söz konusu değeri bir miktar laboratuvar sonuçlarına yaklaştırdığı izlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] C. C. Ladd and T. W. Lambe, "The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests", Symp. On Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, STP 361, 342-371, (1963).
- [2] D. J. Degroot, S. E. Poirier and M. M. Landon, "Sample Disturbance – Soft Clays", *Studia Geotechnica et Mechanica* 27 (3-4), 91-105, (2005).
- [3] A. Larsson, "The CPT Test: Equipment, Testing, Evaluation", Swedish Geotechnical Institute, (1995).
- [4] P. K. Robertson, R. G. Campanella, D. Gillespie and J. Grieg, "Use of Piezometer Cone Data", Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, In-Situ 86 Specialty Conference, Edited by S. Clemence, Blacksburg, Geotechnical Special Publication (6), 1263-1280, (1986).
- [5] P. K. Robertson, "Soil Classification Using the Cone Penetration Test", *Canadian Geotechnical Journal*, 27 (1), 151-158, (1990).
- [6] K. Been and M. G. Jefferies, "Towards Systematic CPT Interpretation", Proceedings Wroth Memorial Symposium, Thomas Telford, London, 121-134, (1992).
- [7] M. G. Jefferies and M. P. Davies, "Use of CPTu to Estimate Equivalent SPT N60", *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), 458-468, (1993).
- [8] C. H. Juang, H. Yuan, D. H. Lee, and P. S. Lin, "Simplified Cone Penetration Test-Based method for Evaluating Liquefaction Resistance of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 129 (1), 66-79, (2003).
- [9] D. K. Li, C. H. Juang, R. D. Andrus, W. M. Camp, "Index Properties-Based Criteria for Liquefaction Susceptibility of Clayey Soils: a Critical Assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 133 (1), 110-115, (2007).
- [10] P. K. Robertson, "Soil Behaviour Type from the CPT: An Update", 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT10, Huntington Beach, CA, USA (paper 2-56) (2010)
- [11] E. Bol, "The Influence of Pore Pressure Gradients in Soil Classification during Piezocone Penetration Test", *Engineering Geology*, 157, 69-78, (2013).
- [12] W. Wang, "Some Findings in Soil Liquefaction", Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, (1979).
- [13] H. B. Seed and I. M. Idriss, "Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes", Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, (1982).
- [14] D. C. A. Andrews, and G. R. Martin, "Criteria for Liquefaction of Silty Soils. In: Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand Paper 0312, (2000).
- [15] R. B. Seed, K. Ö. Çetin, R. E. S. Moss, A. M. Kammerer, J. Wu, J. M. Pestana, M. F. Riemer, R. B. Sancio, J. D. Bray, R. E. Kayen and A. Faris, "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework", In Proceedings of 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, Long Beach, California, (2003).
- [16] P. K. Robertson, C. E. Wride, "Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the Cone Penetration Test", *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (3), 442-459, (1998).
- [17] Robertson, P.K., "Evaluating Soil Liquefaction and Post-Earthquake Deformations using the CPT", Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterizations, (1) 233-249, (2004).
- [18] S. Toprak, T. L. Holzer, "Liquefaction Potential Index: Field Assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129 (4), 315-322, (2003).
- [19] T. Lunne, P. K. Robertson and J. J. M. Powell, "Cone Penetration Testing in Geotechnical Engineering", E&FN SPON, (1997).
- [20] T. Lunne and A. Kleven, "Role of CPT in North Sea Foundation Engineering", Session at the ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Materials, St. Louis, 76-107, (1981).
- [21] A. Önalp, E. Bol and N. Ural, "Estimation of Undrained Shear Strength from Cone Tip Resistance in Clayey Soils", Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey (2006).
- [22] P. K. Robertson, R. G. Campanella, "Interpretation of Cone Penetrometer Test: Part I: Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, 20 (4), 718-733, (1983).
- [23] F. H. Kulhawy and P. W. Mayne, "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design", Report EL-6800, Electric Power Research Inst., Palo Alto, (1990).

- [24] M. Jamiolkowski, D. F. C. Lo Presti and M. Manassero, “ Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT”, Proceedings: Soil Behaviour and Soft Ground Construction, ASCE, 201-238, (2001).
- [25] K. Senneset, R. Sandven and N. Janbu, “Evaluation of Soil Parameters from Piezocone Test”, In-situ Testing of Soil Properties for Transportation, Transportation Research Record, 1235, 24-37, (1989).
- [26] A. Özocak, E. Bol, E. Arel ve S. Sert, “Kuyu İçi Yöntemi ile Ölçülen Kayma Dalgası Hızlarının Sondaj Verileri ile Karşılaştırılması”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, İstanbul teknik Üniversitesi, İstanbul, 353-360, (2004).