

# Zemin Özelliklerini Belirlemede Koni Penetrasyon Deneyi

<sup>1</sup>\*Sedat SERT, <sup>1</sup>Ertan BOL, <sup>1</sup>Aşkın ÖZOCAK

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

## Özet

Geoteknik mühendisliğinde gelişen teknoloji ile birlikte zemin kesitinin ve zemin özelliklerinin yerinde (in situ) ve sürekli olarak belirlenmesini sağlayabilen yöntemler ağırlık kazanmaktadır. 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 arazi deneylerine rağbeti artırmaktadır. Koni penetrasyon deneyi, insan müdahalesi olmadan yapılan sürekli ölçüm sayesinde zemin profilinin ayrıntılı ve gerçeğe en yakın şekilde elde edilmesine imkan vermektedir. 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. 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

## Abstract

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. The conventional approach of drilling a borehole and attempting to procure undisturbed samples often present difficulties due to sample disturbance. The standard penetration test, a long time favourite is full of pitfalls in implementation and interpretation whereas the CPT is able to sample every 2 cm yielding values leading to several parameters of the soil as well as providing a complete soil profile. This paper describes the advantages of the CPT and the results obtained with it in the city of Adapazarı during the past five years.

**Key words:** Soil investigation, cone penetration, disturbance, pore water pressure, shear wave velocity

## 1. Giriş

Geleneksel yöntemlerle zemin incelemelerinde sondaj sırasında numunelerin arazide UD tüp içine alınması, taşınması, laboratuvarda tüpten çıkarılması ve denenmesi aşamalarında maruz kaldığı farklı gerilme izi ve örselenme zeminin ölçülen özelliklerinin yerindeki değerlerinden farklı bulunmasına yol açmaktadır. Ayrıca sondaj uygulamasının özelliği nedeniyle zemin kesitinde davranışı etkileyebilecek görece ince tabakaların belirlenmesi sondaj mühendisinin becerisine bağlı kalmaktadır. Bu durum son yıllarda gelişen teknolojinin de yardımıyla arazi deneylerine eğilimin artması sonucunu getirmiştir.

\*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: sert@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955738 Fax: +902642955601

## 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  $10 \text{ cm}^2$ , konik uç açısı (*apex angle*)  $60^0$  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 (Şekil 1). Ayrıca istenilen derinliklerde penetrasyon durdurulduğunda boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi izlenerek zeminin geçirimsizlik özellikleri hakkında bilgi edinilebilmekte, aynı zamanda statik boşluk suyu basınçları da belirlenebilmektedir [1].

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 geçtikleri tabakaların dinamik boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün olmuştur. Burada dinamik terimi koninin hareket halinde 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 kablosuz akustik sistemler yardımı ile bir mikroişlemci tarafından ses sinyaline çevrilerek yüzeye hata payı olmadan aktarılabilir (Şekil 1). 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.



Şekil 1. Akustik CPT ekipmanları ve genel görünüm

### 3. Deneyin Uygulanması

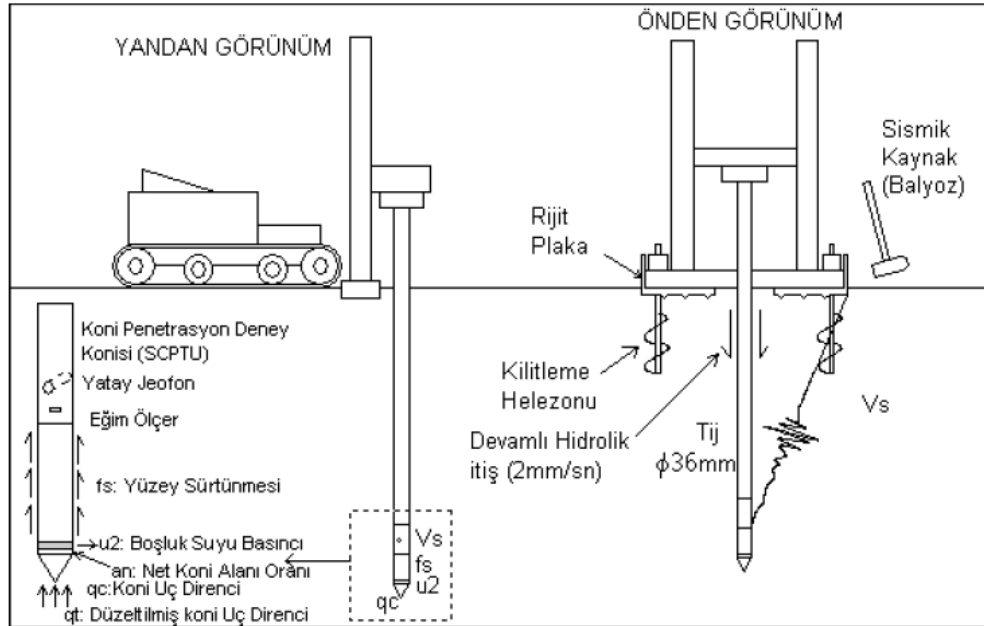
Koni penetrasyon aleti, kamyon veya paletli bir araç üzerine monte edilmiş şekilde çalışmaktadır. Şekil 2’de Sakarya Üniversitesi’nin 200 kN kapasiteli CPT aleti görülmektedir. Kullanılacak sondanın tipine göre ölçülebilecek maksimum uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri değişmekte 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 (Şekil 3). 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 çalışmasının 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 sistemlerde istenilen derinlikte sönümlenme deneyi (*dissipation test*); ve SCPTU sistemlerde kayma dalgası hızları ( $v_s$ ) ölçümü yapılabilmektedir. Alınan ölçüm sonuçlarından zemin sınıfları tayin edilmekte, zeminin taşıma gücü ve sıvılaşma davranışı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir.



Şekil 2. Koni penetrasyon deney aleti



Şekil 3. CPT deney sistemi ve ölçülen parametreler

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 ( $\Delta u$ ), zemin cinsine göre pozitif veya negatif değer alabilir. Deney sırasında koni ucunda ve arkasında oluşan dengelenmemiş boşluk suyu basınçlarının etkisini ortadan kaldırmak amacıyla uç direnci ve çevre sürtünmesi için boşluk suyu basıncına göre düzeltme yapılmalıdır [1]. 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	$b = (A_L - A_b) / A_s$
Koni uç direnci (düzeltilmemiş)	$q_c = F_c / A_T$
Koni uç direnci (düzeltilmiş)	$q_T = q_c + u(1 - a)$
Normalleştirilmiş koni uç direnci	$Q_t = (q_T - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$
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)	$f_T = f_s - \left[ u_s \cdot b + 0.3 \cdot \Delta u \left( \frac{1-a}{15} - b \right) \right]$
Sürtünme oranı (%)	$R_f = (f_T / q_T) \cdot 100$
Boşluk suyu basıncı oranı	$DPPR = \Delta u / q_T$
Zemin davranış tipi katsayısı	$I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2}$

## 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. Tablo 2’de Yenigün Mahallesi’nde gerçekleştirilen CYG278 nolu sondanın 4.50-5.50 metre arasında bilgisayar tarafından kayıt edilen verileri görünmektedir.

### 5.1. Zemin Kesiti ve Zemin Sınıfları

CPT ölçümlerinden zemin sınıflandırması sürtünme oranı ( $R_f$ ) ve normalleştirilmiş uç direnci ( $Q_t$ ) değerleri kullanılarak yapılabilmektedir (Şekil 4) [2,3]. Her derinlik için ölçülen uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri derinliğe karşı noktalanarak grafik şeklinde sunulmaktadır. Şekil 5’de Adapazarı’nda aynı noktada gerçekleştirilmiş bir sondaj ve sonda 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 10 m derinlik boyunca 9 farklı zemin tabakası tespit edilebilirken PCPT verileri ile aynı derinlik boyunca otuza yakın zemin tabakasını yakalamak mümkün olmuştur.





## 5.2. Sıvılaşma Analizi

Türkiye’de sondaj sırasında genel uygulama SPT deneylerinin 1.5 metrede bir yapılmasıdır. Doğal olarak sıvılaşma analizleri de 1.5 metrede bir alınan bu veriler kullanılarak yapılmaktadır. Bu durumda numune alınan derinlikler arasında yer alan ara zemin tabakalarının farklı özelliklere sahip olması durumunda sıvılaşma analizinde sonuçlar gerçekten önemli derecede uzaklaşabilmektedir.

Sıvılaşma yeteneğinin CPT ile tayininde Robertson ve Wride (1998)’ in özellikle gevşek temiz kumlar için önerdiği çevrimsel kayma gerilmesi yöntemine dayanan çalışması genel kabul görmektedir [4]. 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. Ayrıca Sıvılaşma Potansiyeli İndeksine (LPI) göre yapılan analizde de LPI’ nin 15’ den büyük çıkarak ortamın sıvılaşma açısından riskli olduğu anlaşılmaktadır [5]. Şekil 6’ da yapılmış sıvılaşma analizine göre söz konusu inceleme alanında sıvılaşmanın mümkün ve olası olduğu anlaşılmaktadır.

## 5.3. Kayma Direnci Parametreleri

### 5.3.1. Yumuşak Killerde Drenajsız Kayma Direnci ve Taşıma Gücü

Koni penetrasyon deneyi verileri ile normal yüklenmiş killerde drenajsız kayma direnci şu şekilde hesaplanabilmektedir [6]:

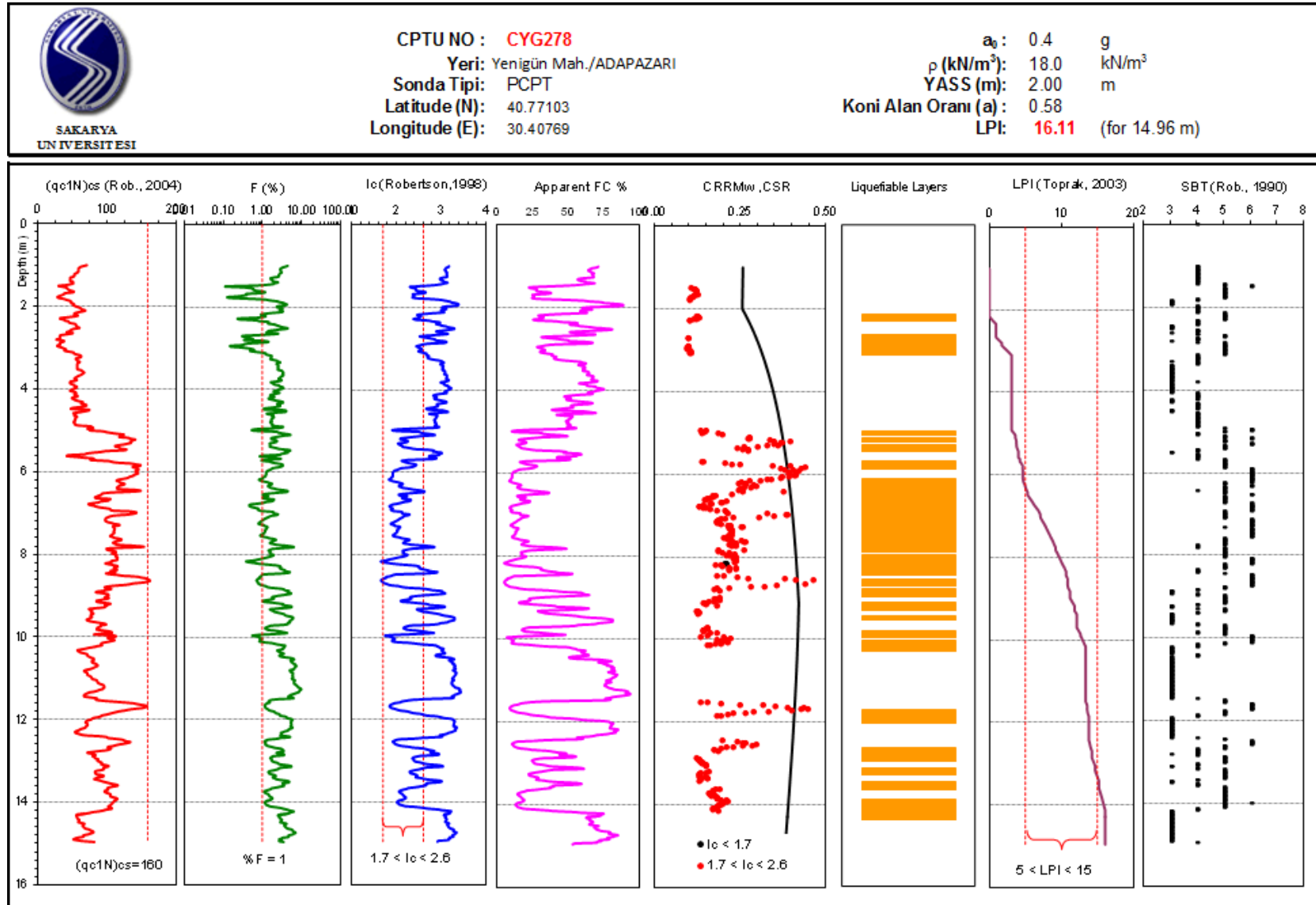
$$s_u = (q_c - \sigma_{vo}) / N_k \quad (1)$$

Koni faktörü  $N_k$  11-19 arasında değişmekte [7] olup Adapazarı’ nda ortalama olarak 15 alınabilir [8]. Buna göre çalışma alanında zemin profilinin üst kısımlarında ince daneli zeminlerin önemli yer tuttuğu görülmekte ve 1.0-2.0 metre derinliğindeki temel seviyesi altında bulunan bu ince daneli zeminlerin drenajsız kayma dirençleri ortalama 50 kPa civarında kalmaktadır. Bu sonuç göz önüne alındığı takdirde  $D_f/B=0.50$  olan bir yüzeysel temel için hesaplanan güvenli gerilme de Skempton ile,

$$\sigma_{em} = \frac{c \times N_c}{G.S.} = \frac{50 \times 5.7}{3} = 95 \text{ kPa} \quad (2)$$

gibi üç-dört katlı bir yapı için yeterli düzeyde bulunmaktadır.





Şekil 6. CPT sonuçları kullanılarak yapılan sıvılaşma analizi

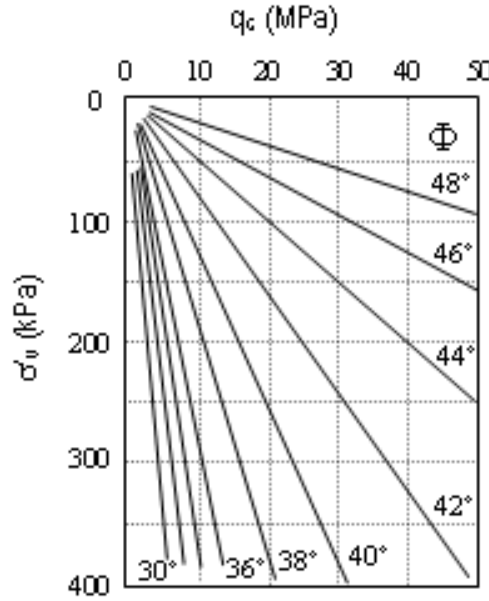
### 5.3.2. Kumlarda Efektif Kayma Direnci Açısı ve Temel Taşıma Gücü

$q_c$  ve  $\sigma'_{vo}$  değerleri kullanılarak kumlar için efektif kayma direnci açısı Şekil 7'den okunabilir [9]. Görüldüğü gibi  $\phi$  ile  $q_c$  arasında doğrusal bir bağıntı vardır.

Kumlar üzerinde inşa edilecek yüzeysel temellerin taşıma gücü için Meyerhof (1956) tarafından aşağıdaki formül önerilmiştir [10]:

$$q_{ult} = \bar{q}_c \cdot \frac{B}{C} \cdot \left( 1 + \frac{D_f}{B} \right) \quad (3)$$

Burada temel genişliği B ve gömme derinliği  $D_f$  metre cinsinden alındığında C ampirik katsayısı 12.2 olarak verilmekte ve  $q_c$  temel altında temel genişliği kadar derinlikte ortalama koni uç direncini göstermektedir. Güvenli gerilme için Meyerhof tarafından önerilen güvenlik sayısı 3'dür.



Şekil 7. Kumda koni uç direnci-efektif kayma direnci açısı ilişkisi [9]

### 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 balyoz vuruşu ile oluşturulan sismik dalgalar 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

5’de kayma dalgası hızlarının derinlikle değiştiği, sağlam tabakaların altında daha gevşek veya yumuşak zemin tabakalarına girildiği grleilmekte, bu da SPCPT’nin yüzeysel jeofizik ölümlerine üstünlüğünü göstermektedir.

### 5.5. Diğer Zemin zellikleri

Koni penetrasyon deneyi sonuçları kullanılarak zeminlerin birim hacim ağırlığı, aşır 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 [6].

## 6. Sonuçlar

Koni penetrasyon deneyi Türkiye’de bir çok yörede karşılaşılan özellikle aluviyal kökenli yumuşak/gevşek zeminlerin özelliklerinin yerinde hızlı ve güvenilir olarak llmesinde modern bir yaklaşım olarak öne çıkan zemin inceleme yöntemlerindedir. Çok sayıda inceleme noktası gerektiren büyük projelerde sondaj ve jeofizik ölüm eksenini sayısının en az seviyede tutularak PCPT ölümlerine ağırlık verilmesi ile incelemenin insan faktöründen ve örselenmeden kaynaklanan hatalardan arındırılması mümkün olacaktır. Ayrıca arazi ve laboratuvar işlemlerinin azalması maliyeti azaltıp, hızı arttıracaktır.

## Kaynaklar

[1] Larsson, A., 1995. The CPT Test: Equipment, Testing, Evaluation. Swedish Geotechnical Institute.

[2] Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., Grieg, J., 1986. Use of Piezometer Cone Data. Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, In-Situ 86 Specialty Conference, Edited by S. Clemence, Blacksburg, June 23 - 25, Geotechnical Special Publication GSP No. 6, pp. 1263-1280.

[3] Robertson, P. K., 1990. Soil Classification Using the Cone Penetration Test. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27 (1), 151-158.

[4] Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotech. J., Ottawa, 35 (3), 442–459.

[5] Toprak, S., Holzer, T.L., 2003. Liquefaction potential index: Field assessment, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 129, no. 4, p. 315-322.

[6] Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Engineering, E&FN SPON.

[7] Lunne, T., Kleven, A., 1981. Role of CPT in North Sea Foundation Engineering, Session at the ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Materials, St. Louis, pp. 76-107.

[8] Önalp, A., Bol, E., Ural, N., 2006. Estimation of Undrained Shear Strength from Cone Tip Resistance in Clayey Soils. Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, 11-13 October, 2006, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey.

[9] Robertson, P.K., Campanella, R.G., 1983. Interpretation of Cone Penetrometer Test: Part I: Sand, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20 (4), pp. 718-733.

[10] Meyerhof, G.G., 1956. Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 82 (1), pp. 1-19.