

# İnce daneli zeminlerde SPT sonuçlarının düzeltilmesi üzerine bir çalışma

Osman SİVRİKAYA\*, Ergün TOĞROL

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) zemin incelemelerinde en sık kullanılan ve en eski arazi deneylerinden biridir. Son yıllarda düzeltilmiş SPT-N değeri ile çeşitli zemin özellikleri arasındaki ilişkiler bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu bağlamda, arazide ölçülen değerler üzerinde yapılan düzeltmeler, çok önemli olmaktadır. Bu çalışmada, düzeltme faktörlerini belirlemek amacıyla Türkiye’de SPT’nin uygulaması ve deneyde kullanılan aletleri içeren geniş kapsamlı anket çalışması yapılmıştır. SPT-N ile serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) arasında korelasyonlar araştırılmış, daha önceki çalışmalarla karşılaştırılması ve Türkiye’nin çeşitli bölgelerinde yapılan bir çok zemin araştırmasından elde edilen veriler üzerinde düzeltmelerin etkisinin kontrolü yapılmıştır. SPT kullanılarak,  $q_u$  gibi ince daneli zeminlerin mühendislik özelliğinin büyük bir doğrulukla belirlenebileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İnce daneli zeminler, korelasyon, SPT, basınç mukavemeti.

## A study on corrections of SPT results in fine-grained soils

### Abstract

The Standard Penetration Test (SPT) is one of the oldest and the most frequently used penetration test in soil exploration. In recent years several researchers attempted correlations between corrected field measured values with several soil properties. In that context corrections applied to field values become crucial. These corrections consist of the effects of rod length, bore hole diameter, liner, anvil, hammer cushion, hammer type and its release mechanism, overburden, blow count frequency and underground water level. In this study a questionnaire including the performance of the standard penetration test and equipment used in Turkey is circulated in order to determine the relevant correction factors. Thus the appropriate and correct corrections are used in obtaining corrected SPT-N values. In engineering applications information concerning soil types and soil conditions necessary for design can be limited due to the difficulties encountered in sampling, testing, and the costs involved. Therefore it is useful to determine the unconfined compressive strength ( $q_u$ ) in relation to easily obtainable and reliable data. In this study the relationship between SPT-N and  $q_u$  is examined, and comparisons are made with previous studies. Also this study aims at checking the relevance of the corrections with regards of the data obtained from a large number of soil investigations performed in Turkey. Standard penetration test is found to be sufficient for reliable assessment of  $q_u$ .

**Keywords:** Fine-grained soils, correlation, SPT, compressive strength.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Osman SİVRİKAYA. osmans@itu.edu.tr ; Tel: (212) 285 37 00.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi’nde tamamlanmış olan "Standart penetrasyon deneyi ile zemin özelliklerinin belirlenmesi ve Türkiye’deki uygulaması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 20.10.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 20.11.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.04.2004 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Geoteknik mühendisliğinde, zemin numunelerini çeşitli şekillerde almak mümkündür. İnce daneli zeminlerde, numune alma yöntemi ne kadar gelişmiş olursa olsun, gerilme durumunun değişmesi yüzünden numune örseleneceğinden ve numune alma işlemi sırasında numune fiziksel etkiye maruz kalacağından, alınan numunelerin tamamen örselenmemiş olmadığı bilinmektedir. Ayrık daneli zeminlerde ise örselenmemiş numune alma oldukça zor ve pahalı bir işlemdir. Bu nedenlerden dolayı, zemin özelliklerinin, çeşitli miktarlarda örselenmiş numuneler üstünde yapılacak laboratuvar deneyleri yerine arazi deneyleri ile belirlenmesi tercih edilir.

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) dinamik bir penetrasyon deneyi olup, zemin incelemelerinde en sık kullanılan ve en eski arazi deneylerinden biridir. SPT oldukça kapsamlı şekilde Kuzey ve Güney Amerika, Büyük Britanya ve Japonya'da kullanılmaktadır. Kuzey Amerika'da SPT zemin incelemelerinin anahtar taşı olmuş ve olmaya da devam etmektedir (Horn, 1979). Mori (1979)'a göre Japonya'da ön inceleme aşamasında sondajların % 90 dan fazlası SPT ile birlikte yapılmaktadır. Bu deney Türkiye'de ve bir çok ülkede en fazla tercih edilen deneydir (Durgunoğlu ve Toğrol, 1974). Türkiye'de SPT hemen hemen her zemin inceleme programının ana kısımlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

SPT, dinamik olarak 76 cm yükseklikten 63.5 kg ağırlığındaki bir tokmağın düşürülerek standart bir numune alıcının zemine 45 cm sokulması şeklinde uygulanır. Numune kaşığının zemine son 30 cm'lik girmesine karşı gelen toplam darbe sayısı, zeminin penetrasyon direnci (SPT-N) olarak tarif edilir. Bu deney, yumuşak killer ve gevşek kumlardan çok sert killer ve sıkı kumlara kadar çeşitli zemin türlerinde uygulanabilmektedir.

SPT-N değeri, ayrık daneli zeminler üzerinde inşa edilen yapıların taşıma gücü ve oturmasının hesabında, ayrık daneli zeminlerin önemli fiziksel ve mühendislik özellikleri olan izafi sıkılık ( $D_r$ ) ve kayma mukavemeti açısının ( $\phi$ ) hesaplanmasında ve ayrıca ayrık daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ile dinamik bir özellik olan kayma

dalgası hızının ( $v_s$ ) tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. İnce daneli zeminlerde SPT'nin kullanımı, ayrık daneli zeminlere göre tartışmalı olmakla birlikte, teknolojinin gelişmesi ile son zamanlarda inceleme konusu olmuştur. İnce daneli zeminlerde önemli mühendislik parametreleri olan serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ), drenajsız kayma mukavemeti ( $c_u$ ) ve hacimsel sıkışma katsayısının ( $m_v$ ) belirlenmesinde kullanılmaktadır. SPT ayrıca, yapılan dolguların kontrolünde kullanılmaktadır. Ancak ince daneli zeminler için bulunan sonuçlar, ayrık daneli zeminlerdeki kadar güvenilir olmamaktadır.

Bilindiği gibi SPT, deneyin uygulanmasındaki farklılıklar ve deneyde kullanılan ekipman sebebiyle bir çok faktörün etkisindedir. Dolayısıyla SPT'den elde edilen sonuçlar (SPT-N) bu faktörler tarafından etkilendiğinden, SPT-N değerleri üzerinde düzeltmeler yapılmalıdır. Son yıllarda tij uzunluğu, sondaj kuyusu çapı, numune alıcı tipi, tokmak tipi ve düşürülme şekli, vuruş sıklığı ve jeolojik yük etkileri dikkate alınarak arazide ölçülmüş SPT-N değerleri (SPT-N<sub>arazi</sub>) için çeşitli düzeltmeler geliştirilmiştir. Deney yapılırken, sistem içerisinde tijlere ve oradan da numune alıcıya iletilen enerji ve tokmak düşürüldüğünde yapılan hatalar farklı değerlendirilmelere yol açmaktadır. Dolayısıyla çakma enerjisinin belli bir standarda bağlanması gerekmektedir. Yapılan bu düzeltmeler, düzeltilmemiş değerler için bir çok araştırmacı tarafından önerilen korelasyonların kullanımı sırasında karışıklığa sebep olabilmektedir.

Son zamanlarda, özellikle SPT tokmaklarının arazideki enerjilerinin ölçülmesi ve SPT'nin dinamiği (Schmertmann ve Palacios, 1979; Kovacs vd., 1981; Clayton, 1990; Farrar vd., 1998) üzerine mevcut araştırmalar, SPT'ye ve sonuçlarına ait bilgileri önemli derecede geliştirmiştir. Bunun sonucu olarak deney sonuçlarının karşılaştırılmasındaki zorlukları giderebilme imkanı doğmuştur.

Bir çok değişken (sondaj metodları, tij tipleri, sondaj kuyusu ebatları ve stabilizasyonu, numune alıcı tip, vuruş sıklığı, tokmak tipi ve düşürülmesine bağlı enerji, deney prosedürü)

SPT sonuçlarının geçerliliğini ve kullanılabilirliğini etkilemektedir (Sağlamer, 1979; Nixon, 1982; Coduto, 1994). Bu değişkenlere bağlı olarak, ölçülen penetrasyon direnci (SPT- $N_{arazi}$ ) çok aşırı yüksek veya çok aşırı düşük olabilmektedir. Aşırı yüksek olarak ölçülen SPT- $N_{arazi}$  değeri, zeminin özelliklerinin ve taşıma gücünün güvenli olmayan tahminlerine sebep olmaktadır. Aşırı düşük olarak ölçülen SPT- $N_{arazi}$  değeri ise, ekonomik olmayan aşırı güvenli sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Daha kullanılabilir, faydalı ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için düzeltmeler uygulanmalıdır. Bu düzeltmeler:

- $C_N$  jeolojik yük düzeltmesi,
- $C_E$  enerji düzeltmesi,
- $C_R$  tij uzunluğu düzeltmesi,
- $C_B$  sondaj çapı düzeltmesi,
- $C_S$  numune alıcı kılıf düzeltmesi,
- $C_A$  çakma başlığı düzeltmesi,
- $C_{BF}$  tokmak vuruş sıklığı düzeltmesi,
- $C_C$  tokmak yastığı düzeltmesi

şeklinde (McGregor ve Duncan, 1998).

Ölçülen vuruş sayıları (SPT- $N_{arazi}$ ),  $N_{60}$  veya  $N_{1,60}$  şeklinde normalize edilebilir.  $N_{60}$  veya  $N_{1,60}$  için en genel formül aşağıdaki gibidir:

$$N_{60} = (C_E C_R C_B C_S C_A C_{BF} C_C) N_{arazi} \quad (1)$$

$$N_{1,60} = (C_N) N_{60} \quad (2)$$

Burada  $N_{60}$ , teorik serbest düşme, standart tokmağın standart yükseklikten serbest düşmesi halinde ortaya çıkan enerjinin % 60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı;  $N_{1,60}$  teorik serbest düşme enerjisinin % 60 ve efektif düşey basıncının 100 kPa değerine göre düzeltilmiş vuruş sayısıdır.

Tüm düzeltmeler ayrık daneli zeminlerde uygulanırken, jeolojik yük ( $C_N$ ) ve tokmak vuruş sıklığı ( $C_{BF}$ ) düzeltmeleri ince daneli zeminlerde pratikte yapılmaz (McGregor ve Duncan, 1998). Farrar (2001), jeolojik yük düzeltmesi yapmanın sığ derinliklerde gereksiz olduğunu, oldukça derin kısımlarda ise yararlı olabileceğini ifade etmektedir. İnce daneli zeminlerde jeolojik yük düzeltmesi, tartışmalı

bir konu olmakla birlikte pratikte yapılmadığından bu çalışmada bu etki dikkate alınmamıştır. Böylece ince daneli zeminler için genel düzeltmeleri içeren denklem:

$$N_{60} = (C_E C_R C_B C_S C_A C_C) N_{arazi} \quad (3)$$

şeklini alır.

### SPT-N ile $q_u$ arasındaki ilişkiler

Çeşitli arazi parametrelerinin kendi aralarında ve/veya arazi parametreleri ile laboratuvar parametreleri arasındaki korelasyonları, mühendislere gerek proje ön değerlendirmeleri sırasında ışık tutmakta gerekse çeşitli yöntemlerle bulunan sonuçların tutarlılığını kontrol etme imkanı sağlamaktadır (Özkan vd., 1990). Mühendislik uygulamalarında, zemin şartları ve zemin cinsleri hakkında elde edilen bilgiler, numune alma ve deney sırasında karşılaşılan güçlüklerden, bunların getirdiği yüksek maliyetlerden ve zaman darlığından dolayı sınırlı kalmaktadır. Bu yüzden, serbest basınç mukavemetini ( $q_u$ ) kolaylıkla elde edilen az sayıdaki zemin parametresiyle belirlemek daha kullanışlı olacaktır.

Serbest basınç mukavemeti, ince daneli zeminler için çok önemli bir mühendislik parametresidir. Bu zeminlerin kıvamları hakkında bilgi verir. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'te, zeminlerin sınıflandırılmasında,  $q_u$ , kullanılmaktadır. Ayrıca killerin hassaslığı hakkında da bilgi sahibi olmamız için yine bu deneye ihtiyaç vardır.

Mühendislik uygulamalarında serbest basınç mukavemeti, serbest basınç deneyi ile belirlenebilmektedir. Serbest basınç deneyi, killi zeminlerde yapılır. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir. Numunelerin % 100 doygun olduğu kabulü yapıp numuneler fisürler ve silt bantları içermemelidir. Örselenme, sonuçları önemli derecede etkilemektedir. Bu kısıtlayıcı yönlerine karşın serbest basınç deneyi killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemede yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemidir.

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, zeminin cinsine göre serbest basınç mukavemeti ile SPT-N sayısı arasındaki ilişkiler Tablo 1’de verilmiştir.

Uygulamada kullanılan Terzaghi ve Peck (1948) tarafından önerilen serbest basınç mukavemeti ile SPT-N arasındaki yaklaşık ilişkiler Tablo 2’de çizelge halinde verilmiştir.

### Malzeme ve metod

Bu çalışmada, bir çok özel şirket ve kamu kuruluşu tarafından, ülkemizin çeşitli bölgelerinde farklı sahalarda yapılan SPT’leri ile araziden alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerini içeren veriler toplanmıştır.

Geoteknik mühendisinin sağlıklı bir şekilde SPT-N değerlerini yorumlayabilmesi için, SPT’de kullanılan ekipman ve prosedür hakkında bilgiye sahip olması gerekir. Bu düşünce ile derlenen SPT-N değerlerinin sağlıklı analizinin yapılabilmesi için SPT-N değerini etkileyen faktörleri içeren bir anket çalışması yapılmıştır.

Anket çalışması sonucunda; genellikle sondaj çapları 65 mm ile 115 mm arasında değiştiğinden  $C_B = 1.00$  (Skempton, 1986), SPT deneyinde odun blok yastık kullanılmadığından  $C_C = 1.00$  (Decourt, 1990), numune alıcı içi kılıfsız olduğundan  $C_S = 1.20$  (Skempton 1986), halka tipi tokmak ve küçük çakma başlığı kullanıldığından  $C_A = 0.85$  (Tokimatsu, 1988), halka tipi tokmak ve kedi başı 2 sarım bırakılma sistemine ait tokmaklar olduğundan  $C_E = 0.75$  (Clayton, 1990;

Seed vd., 1984, 1985) ve tij uzunluğuna bağlı olarak,  $C_R = 0.75, 0.85, 0.95, 1.00$  olarak (Skempton, 1986) kabul edilmiştir.

Bu anket çalışması sonuçlarına göre, ince daneli zeminler için düzeltilmiş penetrasyon direncinin değeri, denklem (4) şeklinde verilebilir. Ayrıca oldukça yakın sonucu veren denklem (5) kullanılabilir. Burada denklem (5)’deki  $N_{60}$  gösterilimi kullanılmış olup enerji-tij boyu düzeltmesine karşı gelmektedir.

$$N_{60} = (C_E C_R C_S C_A) N_{arazi} \quad (4)$$

$$N_{60} = (C_E C_R) N_{arazi} \quad (5)$$

Araziden sondaj yapılarak alınan ince daneli zeminlere ait örselenmiş numuneler üzerinde yapılan kıvam deneyleri ve zemin sınıflandırılması ile sondajdan elde edilen örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinin sonuçları kullanılmıştır. Serbest basınç deneyinden elde edilen  $q_u$  ile arazide yapılan SPT’lerinden elde edilen SPT-N değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiş, literatürde mevcut korelasyonlarla karşılaştırılmıştır.

### Değerlendirme

SPT’nin yapıldığı derinliğe yakın derinliklerden alınan numunelerden elde edilen  $q_u$  ile SPT-N değerleri karşılaştırılmıştır. Zemin numunelerinin gruplandırılmasında, birleştirilmiş zemin sınıflandırılması kullanılmıştır.  $q_u$  ile SPT-N değeri arasında korelasyon geliştirmek için, yüksek plastisiteli killer (CH), düşük plastisiteli killer

Tablo 1. Zemin cinslerine göre  $q_u$  ile SPT-N arasındaki ilişkiler

Araştırmacılar	Zemin Cinsi	$q_u$ (kPa)
Sanglerat (1972) ve Tomlinson (1986)	Kil	25N
	Siltli Kil	20N
Terzaghi ve Peck (1948)	Kohezyonlu Zemin	12.5N
	Yüksek Plastisiteli Kil	25N
Sowers (1979)	Orta Plastisiteli Kil	15N
	Düşük Plastisiteli Kil	7.5N
Nixon (1982)	Kil	24N
Kulhawey ve Mayne (1990)	Kohezyonlu Zemin	$58N^{0.72}$

Tablo 2. SPT-N'e göre ince daneli zeminlerin kıvamı ile  $q_u$  arasındaki ampririk ilişki

Kıvam	Terzaghi ve Peck (1948)	
	SPT-N	$q_u$ (kPa)
Çok yumuşak	< 2	< 25
Yumuşak	2 - 4	25 - 50
Orta Katı	4 - 8	50 - 100
Katı	8 - 15	100 - 200
Çok katı	15 - 30	200 - 400
Sert	> 30	> 400

(CL) ve killer (CH-CL) olarak üç gruba ayrılmış zemin sınıflarında (Tablo 3), enerji ve tij boyu düzeltmesi dikkate alınarak, lineer ve lineer olmayan korelasyon ve regresyon analizleri yapılmıştır.

Tablo 3. Analiz için kullanılan numunelerin zemin sınıfı

Zemin sınıfı	Veri sayısı (n)
CH	113
CL	72
Killer (CH-CL)	185

Bu çalışmada tüm  $q_u=b+aN$  şeklindeki lineer regresyonun anlamlılığı % 5 anlamlılık düzeylerinde incelendiğinde (t test),  $b=0$  ve  $a \neq 0$  olduğu bulunmuştur. Böylece  $q_u=b+aN$  şeklindeki doğrusal regresyon denklemi  $q_u=aN$  şeklini almıştır. Lineer olmayan regresyon analizlerinde  $q_u=aN^b$  seçilmiştir. Üç ayrı zemin alt grup için yapılan lineer regresyon analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 4'de gösterilmiştir. Bu tablodan görüleceği gibi  $q_u=aN$  denklemiindeki "a" katsayısı gerek

düzeltilmeler gerekse zemin sınıfına göre değişiklik göstermektedir. Düzeltmelere bağlı olarak "a" katsayısı zemin sınıfına göre;

CH için  $10 < a < 14$

CL için  $7 < a < 10$

Killer için  $9 < a < 12.5$

şeklinde değişmektedir. Buradan da görüleceği gibi, SPT-N üzerinde düzeltmelerin önemli derecede etkili olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayıları (r) ise tüm zemin sınıfları için 0.73 ile 0.83 arasında bulunmuştur. En yüksek r, 0.83 olarak CH zemin sınıfı için bulunmuştur.

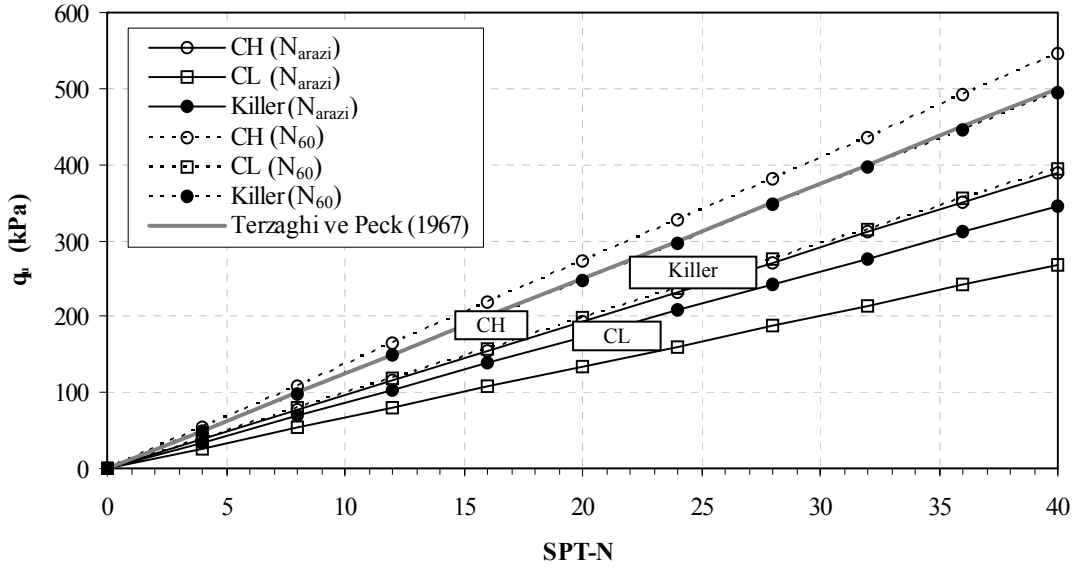
Çeşitli araştırmacıların önerdiği değerler ile bu çalışmadan, zemin sınıfı ve düzeltmeleri dikkate alınarak incelendiğinde, Terzaghi ve Peck (1948)'in önerdiği sonuçların uyumlu olduğu görülürken, diğer araştırmacıların önerdiklerinin ise oldukça yüksek değerler verdiği görülmüştür.

Uygulamada çok kullanılan Terzaghi ve Peck'in (1948) önerdiği korelasyon denkleminin düzeltmeleri içerip içermediği veya hangi düzeltmeleri içerdiği konusu tartışılabilir. Bu çalışmadan tij boyu - enerji düzeltmeleri için bulunan değer (a= 12.38), Terzaghi ve Peck (1948)'in önerdiği değere (a=12.5) oldukça yakın çıkması, Terzaghi ve Peck (1948)'in önerdiği korelasyon denklemini kullanırken enerji-tij boyu düzeltmeleri yapılması gerektiği sonucunu ortaya koymuştur. Her bir zemin grubu ve düzeltmeleri içeren korelasyon denklemleri ile Terzaghi ve Peck'in önerdiği denklem Şekil 1'de gösterilmiştir.

Burada CH zemin grubu için serbest basınç mukavemetinin en büyük değerlerinin, CL zemin grubu için de en düşük değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bütün değerler birlikte ele alındığında (Killer) CH ile CL zemin sınıfları arasında değerler elde edilmektedir. Terzaghi ve

Tablo 4. SPT-N ile  $q_u$  arasındaki lineer analiz sonuçları

Zemin Sınıfı		
CH	CL	Killer
n=113	n=72	n=185
$q_u=9.70N_{arazi}$ $r=0.83$	$q_u=6.70N_{arazi}$ $r=0.76$	$q_u=8.65N_{arazi}$ $r=0.82$
$q_u=13.63N_{60}$ $r=0.80$	$q_u=9.85N_{60}$ $r=0.73$	$q_u=12.38N_{60}$ $r=0.77$



Şekil 1. Zemin sınıfına göre enerji - tij boyu düzeltmesinin SPT-N ile  $q_u$  lineer ilişkisi üzerindeki etkisi

Peck'in (1948) önerdiği sonuçlar, "Killer" için enerji - tij boyu düzeltmesi ile bulunan sonuçlarla aynı çıktığı, yalnızca CH zemin grubu için ( $N_{arazi}$  hariç) bulunan değerlerden küçük sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ham verilerden ( $N_{arazi}$ ) elde edilen sonuçların herhangi bir zemin grubu için, hiç bir zaman Terzaghi ve Peck'in (1948) önerdiği sonuçları geçmediği gözlenmiştir.

SPT sonuçlarını doğru bir şekilde yorumlayabilmek için, deneyin tam olarak nasıl yapıldığının bilinmesi gerekmektedir. Öteden beri, SPT için kullanılan ekipman ülkeden ülkeye farklılıklar arz etmektedir. Amerika'da rutin bir test olmasına rağmen standarttan farklı bir şekilde kullanılmakta iken Avrupa ve Güney Amerika'daki ülkelerde oldukça farklı ekipman kullanılmakta idi (Sanglerat, 1972). Dolayısıyla önceki araştırmalarda bulunan lineer regresyon denklemindeki "a" katsayısının oldukça büyük çıkmasının, doğal olarak SPT sonuçlarının ve dolayısıyla da elde edilen korelasyonların farklı çıkmasına yol açtığı düşünülmektedir. Bununla beraber, Terzaghi ve Peck'in (1948) önerdiği oldukça sık kullanılan bağıntının, bu çalışma sonucu elde edilen sonuç ile çok uyumlu çıkması da dikkate değer bulunmuştur.

Ayrıca lineer regresyon denklemindeki "a" katsayısı plastisite indisinin ( $I_p$ ) fonksiyonu

olarak incelenmiştir.  $n = 38$  veri ile "a" ile  $I_p$  arasında lineer regresyon analizi yapılmış, korelasyon katsayısı ( $r$ ) 0.51 olan regresyon fonksiyonu olarak bulunmuştur (Şekil 2):

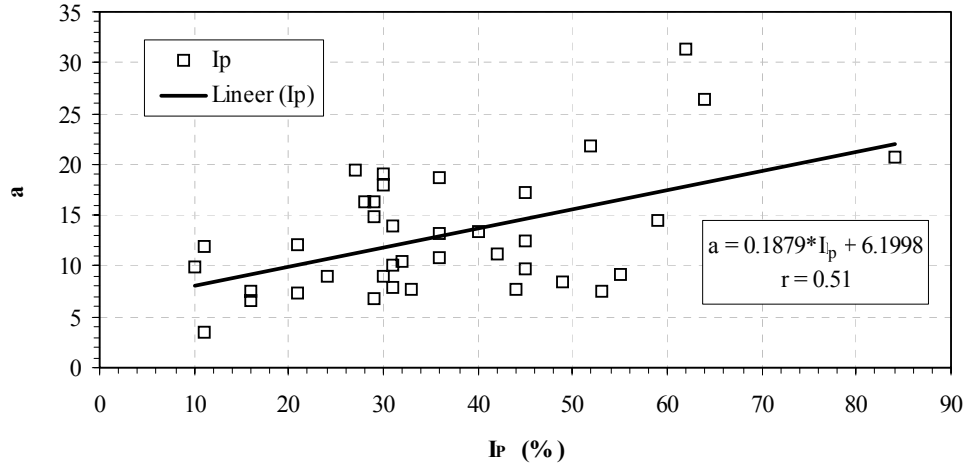
$$a = 0.19I_p + 6.20 \quad (6)$$

$$q_u = (0.19I_p + 6.20)N_{60} \quad (7)$$

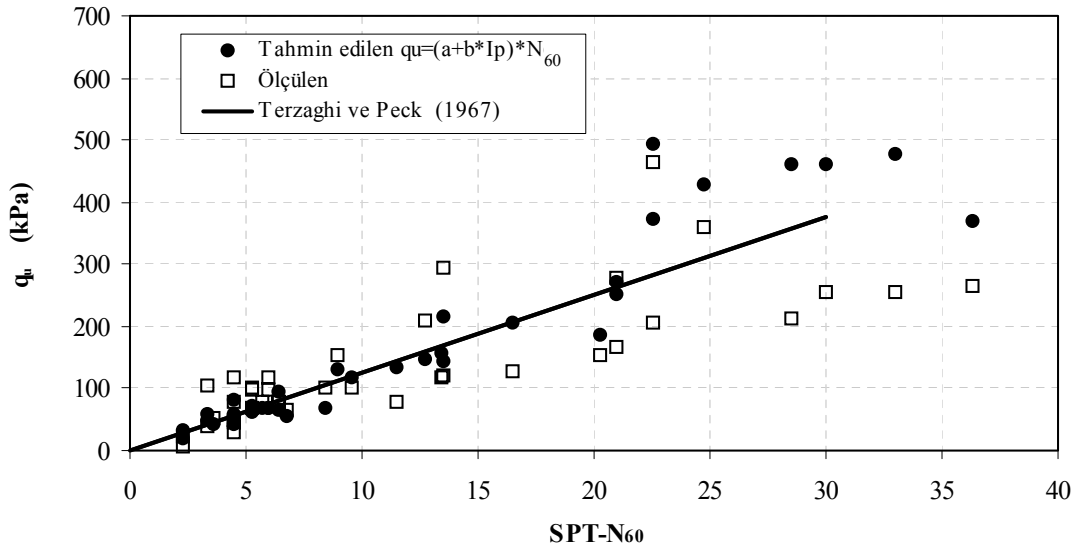
Burada  $I_p$ , tamsayı olarak tanımlanmıştır.  $N_{60}$  değerinin, enerji ve tij boyu düzeltmesini içerdiği unutulmamalıdır.

Ölçülen, önerilen fonksiyondan tahmin edilen, Terzaghi ve Peck'in (1948) önerdiği fonksiyonun sonuçları toplu olarak Şekil 3'de verilmiştir. Önerilen bağıntının genellikle uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. SPT- $N_{60}$  değerinin 25'e kadar ( $N_{60} < 25$ ) değerler için önerilen denklem (7) ile ölçülen, Terzaghi ve Peck'in (1948) önerdiği sonuçlar arasında oldukça yakın bir ilişki olduğu Şekil 3'de görülmektedir. Bununla beraber, SPT- $N_{60}$ 'in 25'den büyük ( $N_{60} > 25$ ) değerleri için veriler arasında geniş bir dağılım olduğu görülmüştür.

Türkiye'de, sadece enerji - tij boyu düzeltmelerini yapmanın, SPT-N ile  $q_u$  ilişkisi için yeterli olacağı görülmüştür. Düzeltmelerin etkisi dikkate



Şekil 2.  $I_p$  ile regerasyon katsayısı (a) arasındaki değişim



Şekil 3. Killer için önerilen modelin sonuçlarının karşılaştırılması

alındığında; en alt sınır, ham veri olan ve doğrudan arazide ölçülen SPT- $N_{arazi}$  değeri olurken, üst sınır ise SPT- $N_{60}$  değerinden elde edilen doğrular olmaktadır.

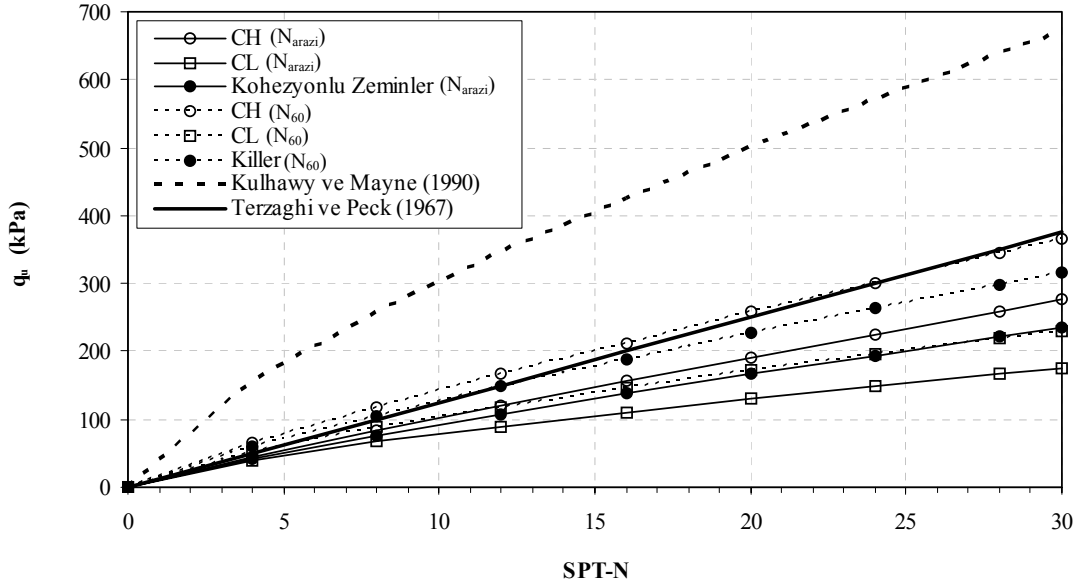
Yapılan lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen  $q_u = aN^b$  denklemindeki "a" katsayı, düzeltmeleri ve zemin gruplarını dikkate alarak  $N_{arazi}$  ve  $N_{60}$  için yaklaşık olarak 13 ile 20, "b" katsayı 0.73 ile 0.91 arasında değişmektedir (Tablo 5). Korelasyon katsayısı ise 0.75 ile 0.86 arasında değişmektedir. Özellikle düzeltmeler yapılmış olan (SPT- $N_{60}$ ) değerlerinden, CH zemin sınıfı için, elde edilen sonuçların Terzaghi ve Peck (1948)'in önerdiği sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 4).

Şekil 4'de görüldüğü gibi, Kulhawy ve Mayne (1990)'nin önerdiği formülün sonuçları, bu çalışmada zemin grupları için (her bir düzeltme etkisini içeren) elde edilen sonuçlardan oldukça yüksek değerler olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Türkiye şartlarında bu formül oldukça yüksek sonuçlar vereceğinden, kullanılmaması tavsiye edilmektedir.

Bu çalışmadan görüleceği gibi, gerek SPT düzeltmeleri gerekse zemin cinsi, SPT ile serbest basınç mukavemetini belirlemede önemli olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, literatürdeki SPT-N değerini içeren mevcut korelasyonlar kullanılmadan önce, SPT düzeltmeleri içerip içermediği ve hangi zemin sınıfı için geçerli

Tablo 5. SPT-N ile  $q_u$  arasındaki lineer olmayan analiz sonuçları

Zemin Sınıfı		
CH n=113	CL n=72	Killer n=185
$q_u=12.50N_{arazi}^{0.91}$ $r=0.85$	$q_u=14.63N_{arazi}^{0.73}$ $r=0.78$	$q_u=13.02N_{arazi}^{0.85}$ $r=0.81$
$q_u=19.61N_{60}^{0.86}$ $r=0.84$	$q_u=19.22N_{60}^{0.73}$ $r=0.75$	$q_u=18.81N_{60}^{0.83}$ $r=0.80$



Şekil 4. Zemin tipine göre enerji ve tij boyu düzeltmesinin SPT-N ile  $q_u$  lineer olmayan ilişkisi üzerindeki etkisi

olduğu konusunda, mühendisin bilgisi olması gerekir. Aksi takdirde mühendis yanlış tasarımlara sebep olabilir.

### Sonuçlar

Türkiye'deki uygulama sonuçlarına bakılarak SPT düzeltme faktörleri,  $C_C=1$ ,  $C_B=1$ ,  $C_A=0.85$ ,  $C_S=1.2$ ,  $C_E=0.75$  olarak alınabilir. Ülkemizde ince daneli zeminler için tüm düzeltmeleri içeren oldukça aynı sonucu veren SPT- $N_{60}=0.75 \cdot C_R \cdot N_{arazi}$  ifadesi kullanılabilir. SPT kullanılarak, serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) gibi ince daneli zeminin mühendislik özelliği oldukça iyi bir doğrulukla belirlenebilmektedir.

### Semboller

SPT :Standart penetrasyon deneyi  
SPT-N :Zeminin penetrasyon direnci  
(vuruş sayısı/30 cm penetrasyon)

$N_{60}$  :Düzeltilmiş zemin penetrasyon direnci  
 $N_{l,60}$  :Düzeltilmiş zemin penetrasyon direnci  
 $C_N$  :Jeolojik yük düzeltme faktörü  
 $C_E$  :Enerji düzeltme faktörü  
 $C_R$  :Tij uzunluğu düzeltme faktörü  
 $C_B$  :Sondaj çapı düzeltme faktörü,  
 $C_S$  :Numune alıcı kılıf düzeltme faktörü  
 $C_A$  :Çakma başlığı düzeltme faktörü,  
 $C_{BF}$  :Tokmak vuruş sıklığı düzeltme faktörü  
 $C_C$  :Tokmak yastığı düzeltme faktörüdür  
 $q_u$  :Serbest basınç mukavemeti (kPa)  
 $D_r$  :İzafi sıklık (%)  
 $v_s$  :Kayma dalgası hızı (m/sn)  
 $\phi$  :Kayma mukavemeti açısı (°)  
 $c_u$  :Drenajsız kayma mukavemeti (kPa)  
 $m_v$  :Hacimsel sıkışma katsayısı (1/kPa)  
 $I_p$  :Plastisite indisi (%)  
 $a, b$  :Regresyon katsayıları  
 $r$  :Korelasyon katsayısı  
 $n$  :Veri sayısı



## Kaynaklar

- Clayton, C. R. I., (1990). SPT Energy Transmission: Theory, Measurement and Significance, *Ground Engineering*, **23**, 10, 35-43.
- Coduto, D. P., (1994). *Foundation Design: Principles and Practice*, Prentice-Hall, USA.
- Decourt, L. (1990). The Standard Penetration Test: State-of-the-Art-Report, Norwegian Geotechnical Institute Publ., No. 179, Oslo.
- Durgunoğlu, H. T. ve Toğrol, E., (1974). Penetration testing in Turkey: State-of-the-art report, *ESOPT*, sf.137.
- Farrar, J. A., Nickell, J., Alien, M. G., Goble, G. ve Berger, J. (1998). Energy Loss in Long Rod Penetration Testing.- Terminus Dam Liquefaction Investigation, *Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III Specialty Conference, ASCE GSP*, No. 75, 554-567.
- Farrar, J. A., (2001). Kişisel görüşme.
- Horn, H. M., (1979). North American Experience in Sampling and Laboratory Dynamic Testing, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **2**, 2, 84-97.
- Kovacs, W. D., Salomone, L. A., ve Yokel, F. Y., (1981). Energy Measurement in the Standard Penetration Test, U.S. Department of Commerce and National Bureau of Standards, Washington D.C.
- Kulhawy, F. H. ve Mayne, P. W., (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, Electric Power Institute, Palo Alto, CA.
- McGregor, J. ve Duncan, J. M., (1998). Performance and Use of the Standard Penetration Test in Geotechnical Engineering Practice, Report of CGPR, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Mori, H., (1979). Review of Japanese Sub-surface Investigation Techniques, *Journal of South East Asian Society Geotechnical Engineering*, **10**, 219-242.
- Nixon, I. K., (1982). Standard Penetration Test: State of the Art Report, *Proc.2<sup>nd</sup> ESOPT*, Amsterdam.
- Özkan, M. Y., Wasti, Y. ve Balkır, T., (1990). Arazi Deneylemleri Korelasyonları ve Zemin Parametreleri Tahmini, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi Bülteni*, **1**, 33-40
- Sağlamer, A., (1979). Standart Penetrasyon Deneyi Nedir, Ne Değildir, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi Bülteni*, **1**, 4, 267-271.
- Sanglerat, G., (1972). *The Penetrometer and Soil Exploration*, Elsevier Publishing, Amsterdam.
- Schmertmann, J. H. ve Palacios, A., (1979). Energy Dynamics of SPT, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **105**, No GT8.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. P. ve Chung, R. M., (1984). The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Report No: UCB/EERC-84/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. ve Chung, R. M. (1985). Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **111**, 12, 1425-1445.
- Skempton, A. W., (1986). Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, *Geotechnique*, **36**, 3, 425-447.
- Sowers, G. F., (1979). *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*, 621 sf., 4<sup>th</sup> edition, Macmillan, New York.
- Terzaghi, K. ve Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley, New York.
- Tokimatsu, K., (1988). Penetration Tests for Dynamic Problems, *Proceedings of 1<sup>st</sup> International Symposium on Penetration Testing*, 117-136, Rotterdam.
- Tomlinson, M. J. (1986). *Foundation Design and Construction*, Pitman Books Ltd., London.