

**STANDART PENETRASYON VE KONİK PENETRASYON
DENEY VERİLERİNDEN KİLLERİN MAKASLAMA
DAYANIMININ KESTİRİMİ**

**THE ESTIMATION OF SHEAR STRENGTH OF CLAYS
FROM THE DATA OF STANDARD AND CONE
PENETRATION TESTS**

KIVANÇ YÜKSEL

PROF. DR. ERGÜN TUNCAY
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2019

KIVANÇ YÜKSEL'in hazırladığı "**Standart Penetrasyon ve Konik Penetrasyon Deney Verilerinden Killerin Makaslama Dayanımının Kestirimi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü AKSOY
Başkan



Prof. Dr. Ergün TUNCAY
Danışman



Prof. Dr. Reşat ULUSAY
Üye



Doç. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU
Üye



Doç. Dr. Mustafa FENER
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak/...../..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30.05.2019



KIVANÇ YÜKSEL

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin / raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ **Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾

o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾

o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

30 / 05 / 2019



KIVANÇ YÜKSEL

ÖZET

STANDART PENETRASYON VE KONİK PENETRASYON DENEY VERİLERİNDEN KİLLERİN MAKASLAMA DAYANIMININ KESTİRİMİ

Kıvanç YÜKSEL

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ergün TUNCAY

Mayıs 2019, 138 sayfa

Kohezyonlu zeminlerin drenajsız makaslama dayanımı (s_u); temellerin taşıma gücü ve kısa süreli şev duraylılığı analizlerinde yaygın şekilde kullanılmakta olup, ekonomik ve güvenilir bir yapı tasarımının yapılabilmesi açısından bilinmesi gereken zemin parametrelerinden biridir. Bu parametre, örselenmemiş örnekler üzerinde laboratuvar da deney yapılarak veya arazi deneyleriyle tayin edilebilmektedir. Ancak, örselenmemiş örneklerin alınması sırasında yaşanan olası güçlükler, örneklerin nem içeriğinin korunması için uygun şartlarda muhafaza edilmesi, laboratuvar deneylerinin nispeten yüksek maliyetleri vb. nedenlerle günümüzde, kohezyonlu zeminlerin drenajsız makaslama dayanımının belirlenmesinde pratik ve kolay arazi deney yöntemlerinin kullanımı tercih sebebi olmaktadır. Bu nedenlerle tez çalışması kapsamında, zemin etütlerinde yaygın olarak kullanılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) verileri kullanılarak killi zeminlerin drenajsız makaslama dayanımlarının tahmin edilebilmesi için literatürde önerilen görgül ilişkilerin performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, Türkiye'nin farklı yerlerinde özel bir firma tarafından yapılmış 36 adet SPT ve 17 adet CPT kuyusu verilerinden s_u değerleri belirlenmiş olan kil seviyelerindekiler ayırtlanmış olup, söz konusu seviyelerdeki diğer bazı zemin özellikleri de derlenerek bir veri tabanı oluşturulmuştur. İlk aşamada; veri tabanındaki SPT ve CPT verisinden yararlanılarak, literatürde önerilen görgül ilişkiler aracılığıyla s_u 'lar hesaplanmış ve bunlar deneylerle belirlenmiş olanlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda s_u 'yu en iyi tahmin eden literatürdeki ilişkiler ayırtlanmıştır. İzleyen aşamada ise, derlenen verileri en iyi temsil eden ilişkilerin belirlenmesi için basit ve çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen ilişkilerin anlamlılıkları test edilmiştir. Sonuç olarak, SPT-N, N_{60} sayıları ile s_u arasında basit regresyon analizleri ve bunlarla birlikte diğer zemin parametrelerinin kullanılmasıyla yapılan çoklu regresyon analizlerinden belirlenen ilişkilerin belirleme katsayılarının 0.70 ile 0.81 arasında olduğu görülmüştür. CPT verilerinden s_u 'nun tahmininde ise, konik uç dirençleri (q_c ve q_t)'nin girdi parametresi olduğu ilişkilerin, koni faktörlerinin belirlenmesi amacıyla elde edilenlere nazaran 0.80 civarında daha yüksek belirleme katsayılarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, basit regresyon analizleriyle elde edilen bu eşitliklerin performanslarının, diğer zemin özelliklerinin de dikkate alındığı çoklu regresyon analizlerinden belirlenenlerden bir miktar daha iyi olduğu görülmüştür. Bu değerlendirmelerden; tez kapsamında incelenen killerin s_u 'larının tahmini için, gerek SPT gerekse CPT verisi doğrudan kullanılarak oluşturulan eşitliklerin yeterli olacağı anlaşılmaktadır. Özellikle, CPT verisinden s_u 'nun belirlenmesi için literatürdeki bazı ilişkilerde girdi parametresi olan ve ek deney gerektiren bazı zemin özelliklerinin kullanılmasına gerek olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Drenajsız makaslama dayanımı, Standart ve Konik Penetrasyon Deneyleri, laboratuvar ve arazi deneyleri, görgül ilişki, basit ve çoklu regresyon analizleri.

ABSTRACT

THE ESTIMATION OF SHEAR STRENGTH OF CLAYS FROM THE DATA OF STANDARD AND CONE PENETRATION TESTS

Kıvanç YÜKSEL

Master of Science, Geological Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. Ergün TUNCAY

May 2019, 138 pages

The undrained shear strength of cohesive soils (s_u), which is an important soil parameter to be known in order to design economic and reliable structures, is widely used in the foundation bearing capacity and short-term slope stability analyses. This parameter can be determined by laboratory tests conducted on the undisturbed soil specimen or by in-situ tests. However, nowadays, practical and relatively easy in-situ test methods are commonly preferred to estimate the undrained shear strength of cohesive soils due to the difficulties and inconveniences while taking the undisturbed specimens, conservating the specimens in suitable conditions to preserve the in-situ moisture content, and relatively high costs of laboratory tests etc. For above mentioned reasons, it was aimed in this thesis study to evaluate the performances of the empirical relations proposed in the literature to determine the undrained shear strength of clayey soils by using the Standard Penetration Test (SPT) and Cone Penetration Test (CPT) data. For this purpose, a database was generated by compiling the results of 36 SPT and 17 CPT boreholes in clay levels conducted across Turkey by a private company, as well as the corresponding undrained shear strength and other relevant soil properties.

In the first step, undrained shear strength values were calculated by using CPT and SPT data according to the empirical equations proposed in the literature. These values were then compared with the s_u values determined by laboratory tests, and the obtained results are discussed. By considering the findings, the best predictive relationships in literature for estimation of s_u were reserved. In the next step, simple and multiple regression analyses were performed to establish the relationships the best representing the compiled data, and significance tests were employed for the these relationships. It was seen that coefficient of determinations of the relationships determined by performing simple and multiple regression analyses between s_u and SPT-N, N_{60} counts and some other soil properties were between 0.70 and 0.81. In the estimation of s_u values from CPT data, it was found that the relationships in which cone tip resistances (q_c and q_t) were used as input parameters, had higher coefficient of determinations about of 0.80 than those of relationships obtained for determination of cone factors. Besides, it was seen that the performances of these relationships were slightly better than those derived from multiple regression analyses. From these evaluations, it was understood that the equations formed by using SPT and CPT data directly will be sufficient for the estimation of s_u of clays examined in this thesis. Particularly, it is concluded that there is no need to use some soil properties which are used as input parameter in relationships to estimate s_u from CPT data in literature and additional tests are needed to determine.

Keywords: Undrained shear strength, Standard and Cone Penetration Tests, laboratory and in-situ tests, empirical relationship, simple and multiple regression analyses.

TEŞEKKÜR

Tez kapsamında yürütülen çalışmaların her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, çalışmanın ilerlemesi, geliştirilmesi ve derinleştirilmesi ile ilgili tüm katkılarından dolayı değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Ergün TUNCAY'a,

Veri tabanının oluşturulması kapsamında destek olan, ancak firma politikası gereği ismini açıklayamadığım firma ve yetkililerine,

Tezin savunması sırasında görüş ve değerlendirmelerinden yararlandığım jüri üyeleri; Prof. Dr. Hüsnü AKSOY, Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Doç. Dr. Hakan NEFESLİOĞLU ve Doç. Dr. Mustafa FENER'e,

Çalışmalarım boyunca desteğinden dolayı, değerli arkadaşım ve meslektaşım Yalın Umur DOĞAN'a,

Öğrenim hayatımda geldiğim noktada en büyük pay sahibi olan, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme,

TEŞEKKÜR EDERİM.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER	viii
ŞEKİLLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. STANDART PENETRASYON VE KONİK PENETRASYON DENEYLERİ (SPT VE CPT)	4
2.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)	4
2.1.1. Deneyin Yapılışı	4
2.1.2. SPT Sonuçlarını Etkileyen Faktörler ve Yapılan Düzeltmeler	6
2.2. Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)	9
2.2.1 Mekanik Konik Penetrometreler	11
2.2.2. Elektrikli Konik Penetrometreler	12
2.2.3. Piyezometrik Elektrikli CPT (CPTu)	13
2.2.4. Sismik Piyezometrik Elektrikli CPT (SCPTu)	14
2.2.5. CPT/CPTu İle Elde Edilen Veri ve Yapılan Düzeltmeler	15
3. SPT VE CPT VERİSİYLE DRENAJSIZ MAKASLAMA DAYANIMI TAYİNİNE YÖNELİK ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	19
3.1. Drenajsız Makaslama Dayanımının Tayinine Yönelik SPT Verisini Esas Alan Yöntemler	19
3.2. Drenajsız Makaslama Dayanımının Tayinine Yönelik CPT Verisini Esas Alan Yöntemler	30
3.2.1. Teorik Yaklaşımlar	30
3.2.2. Görgül Yaklaşımlar	32
4. SPT VE CPT VERİSİNİN DERLENMESİ	45
4.1. SPT Veri Tabanı	47
4.2. CPT Veri Tabanı	49
5. LİTERATÜRDE ÖNERİLEN İLİŞKİLERİN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	53

5.1. SPT Verisini Esas Alan Yöntemler.....	53
5.2. CPT Verisini Esas Alan Yöntemler.....	65
6. SPT VE CPT VERİSİ İLE DRENAJSIZ MAKASLAMA DAYANIMININ TAHMİNİ	72
6.1. SPT Verisiyle Drenajsız Makaslama Dayanımının Belirlenmesi	72
6.1.1. Basit regresyon analizleri	72
6.1.2. Çoklu regresyon analizleri	78
6.1.3. Genel değerlendirme	81
6.2. CPT Verisi İle Drenajsız Makaslama Dayanımının Belirlenmesi	84
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR.....	100
EKLER	108
ÖZGEÇMİŞ	138

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Değişik ülkelerde kullanılan şahmerdan türleri ve serbest bırakılma yöntemlerine göre enerji oranı (E_r) değerleri (Skempton, 1986).....	7
Çizelge 2.2. Clayton (1990) tarafından önerilen değişik ülkelerde kullanılan şahmerdan türleri ve serbest bırakma yöntemine göre enerji oranı (E_r) değerleri.	8
Çizelge 2.3. Tij, kuyu çapı ve iç gömlek (iç tüp) düzeltme faktörleri (Skempton, 1986; Youd ve ark., 2001).....	8
Çizelge 2.4. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen örtü gerilmesi düzeltme faktörleri (C_N) eşitlikleri (Liao ve Whitman, 1986).	9
Çizelge 3.1. SPT-N ve s_u arasındaki ilişki (Terzaghi ve Peck, 1967).....	20
Çizelge 3.2. Sivrikaya ve Toğrol (2002) tarafından ince taneli ve kil zeminler için önerilen s_u - N ve N_{60} ilişkileri.	22
Çizelge 3.3. SPT - N ve N_{60} ile s_u arasındaki ilişkiler (Sivrikaya ve Toğrol, 2006).	23
Çizelge 3.4. Etkin gerilmelerin değişimine bağlı s_u ile N_{60} ve I_p arasındaki ilişkiler (Kalantary, Ardalani ve Nariman-Zadeh, 2008).....	24
Çizelge 3.5. Kalantary, Ardalani ve Nariman-Zadeh, (2008) tarafından önerilen s_u eşitliklerindeki girdi parametrelerinin değişim aralıkları.	25
Çizelge 3.6. Sivrikaya (2009) tarafından, kohezyonlu zeminler için önerilen s_u ile SPT-N, N_{60} , w_n , LL ve I_p arasındaki ilişkiler.	26
Çizelge 3.7. Nassaji ve Kalantari (2011) tarafından, ince taneli zeminler için önerilen s_u ile SPT-N, N_{60} , w_n , LL ve I_p arasındaki ilişkiler.	26
Çizelge 3.8. Literatürde s_u 'nun belirlenmesine yönelik önerilen ilişkiler.	28
Çizelge 3.9. Teorik koni faktörü (N_c) değerleri (Konrad ve Law, 1987; Lunne, Robertson ve Powell, 1997).	31
Çizelge 3.10. Chen (2001) tarafından s_u , I_p ve N_k arasında belirlenen değişim aralıkları	34
Çizelge 3.11. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen N_k 'nin değişimi.	35
Çizelge 3.12. Farklı araştırmacılar tarafından N_{kt} 'nin belirlenmesi için önerilen ilişkiler ve değer aralıkları.....	38
Çizelge 3.13. Farklı araştırmacılar tarafından N_{ke} için önerilen değer aralıkları.....	39

Çizelge 3.14. Farklı araştırmacılar tarafından $N_{\Delta u}$ için önerilen değer aralıkları ve ilişkiler.	41
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan SPT verisine ait genel bilgiler.	48
Çizelge 4.2. CPT parametreleri ve bazı zemin özelliklerinin değişim aralıkları.....	50
Çizelge 5.1. Koni faktörlerinin tez kapsamındaki veri dikkate alınarak hesaplanan değişim aralıkları.	65
Çizelge 6.1. Tez veri tabanındaki killer için s_u ile SPT-N, N_{60} ve $N_{1(60)}$ sayıları arasındaki ilişkiler ve belirleme katsayıları	77
Çizelge 6.2. Basit regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin ANOVA testi sonuçları.....	77
Çizelge 6.3. Çoklu regresyon analizleriyle s_u 'nun belirlenmesine yönelik oluşturulan eşitlikler.	79
Çizelge 6.4. Çoklu regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin ilişkilerin ANOVA testi sonuçları.	80
Çizelge 6.5. Koni faktörü N_{ke} ve $N_{\Delta u}$ 'nun B_q 'dan belirlenmesi için oluşturulan görgül ilişkiler için yapılan ANOVA testi sonuçları.	89
Çizelge 6.6. s_u 'nun belirlenmesine yönelik oluşturulan ilişkiler.	93

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Standart penetrasyon deneyinin yapılışı (Coduto, 1994).	5
Şekil 2.2. Standart penetrasyon deneyi aşamaları (Mayne, Christopher ve Dejong, 2002).	5
Şekil 2.3. Dutch tipi mekanik koni boyutları (Sanglerat, 1972).	11
Şekil 2.4. 1935'te üretilen elle çalışan mekanik konik penetrometre cihazı (Robertson ve Cabal, 2012).	11
Şekil 2.5. Konik Mantolu Hollanda (Delft) konisi (Robertson ve Cabal, 2012).	12
Şekil 2.6. Begemann tipi mekanik sürtünme konisi: (1) kapalı konumda (2) yarı açık konumda ve (3) tamamen açık konumda (Begemann, 1953).	12
Şekil 2.7. Fugro tipi elektrikli CPT penetrometresi (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).	13
Şekil 2.8. Elektrikli piyezometrik konik penetrometre (Robertson ve Cabal, 2012).	14
Şekil 2.9. SCPTu uygulamasının temsili bir görünümü (Bol, Özocak ve Sert, 2014).	15
Şekil 2.10. Piyezometrik elektrikli koni iç geometrisi (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).	16
Şekil 3.1. f_1 ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki (Stroud, 1974).	21
Şekil 3.2. Terzaghi ve Peck (1967) ve Sowers (1979) tarafından önerilen SPT-N s_u grafikleri.	21
Şekil 3.3. Stroud (1974) tarafından önerilen f_1 katsayısı ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki (Sivrikaya ve Toğrol, 2006).	24
Şekil 3.4. Normal konsolide killeri için kanatlı kesici deneyinden belirlenen s_u dikkate alınarak hesaplanmış N_k 'nin I_p 'ye bağlı değişimi (Lunne ve Kleven, 1981).	33
Şekil 3.5. Kanatlı kesici deneyinden elde edilen s_u değeri için düzeltme katsayısı (μ) belirleme grafiği (Bjerrum, 1973).	33
Şekil 3.6. Kanatlı kesici deneyinden belirlenen s_u değerlerine düzeltme uygulandıktan sonra hesaplanan N_k 'lerin I_p 'ye göre değişimi (Lunne ve Kleven, 1981).	34
Şekil 3.7. I_p ve N_k arasındaki ilişkiler (Shin ve Kim, 2011).	35

Şekil 3.8. I_p 'ye bağlı N_{kt} değerlerinin değişimi: (a) Üç eksenli sıkışma ve çekme deneyleri ile doğrudan makaslama deneylerinin sonuçları kullanılarak, (b) sadece üç eksenli sıkışma deneyi sonuçları kullanılarak (Aas ve ark. 1986).	37
Şekil 3.9. Koni faktörleri ve plastisite indeksi arasındaki ilişkiler (Hong ve ark., 2010).	43
Şekil 3.10. Koni faktörleri ve boşluk suyu basıncı oranı arasındaki ilişkiler (Hong ve ark., 2010).	43
Şekil 3.11. Kohezyonlu zeminlerde q_c ve s_u arasındaki ilişki (Anagnostopoulos ve ark., 2003).	44
Şekil 3.12. Kohezyonlu zeminlerde koni tiplerine göre f_s ve s_u arasındaki ilişki (Anagnostopoulos ve ark., 2003).	44
Şekil 4.1. (a) SPT-N - s_u ve (b) CPT parametreleri - s_u çiftlerinin oluşturulmasında izlenen yöntem.	46
Şekil 4.2. SPT'nin uygulandığı zemin örneklerinin plastisite abağındaki (Wagner, 1957) konumları.	47
Şekil 4.3. s_u değerlerinin derinlikle değişimi.	48
Şekil 4.4. SPT-N darbe sayısının derinliğe göre değişimi.	48
Şekil 4.5. Enerji düzeltmesi yapılmış N_{60} darbe sayılarının derinliğe göre değişimi.	49
Şekil 4.6. CPT'nin uygulandığı zeminlerin plastisite abağındaki konumları.	50
Şekil 4.7. Konik uç direnci (q_c)'nin derinliğe göre değişimi.	51
Şekil 4.8. Sürtünme direnci (f_s)'nin derinliğe göre değişimi.	51
Şekil 4.9. Koni arkasındaki boşluk suyu basıncı (u_2)'nin derinliğe göre değişimi.	51
Şekil 4.10. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen drenajsız makaslama dayanımı değerlerinin derinliğe göre değişimleri.	52
Şekil 4.11. Kanatlı kesici deneylerinden elde edilen drenajsız makaslama dayanımı değerlerinin derinliğe göre değişimleri.	52
Şekil 5.1. Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974) ve İyisan ve Ansal (1990) tarafından SPT-N sayısı kullanılarak önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların, $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.	58
Şekil 5.2. Sivrikaya ve Toğrol (2002) tarafından SPT-N ve N_{60} sayıları esas alınarak, (a) İnce taneli, (b) CH ve (c) CL zeminler için önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.	58

Şekil 5.2. (devam ediyor).....	59
Şekil 5.3. Sivrikaya ve Toğrol (2006) tarafından SPT- N ve N ₆₀ sayıları esas alınarak, (a) Kil, (b) ince taneli, (c) CH ve (d) CL sınıfındaki zeminler için önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.	60
Şekil 5.3. (devam ediyor).....	61
Şekil 5.4. Sivrikaya (2009) tarafından SPT- N, N ₆₀ sayıları esas alınarak, (a) UU üç eksenli deney verisi kullanılarak ve (b) UCS deney verisi kullanılarak kohezyonlu zeminler için oluşturulmuş ilişkilerle belirlenen $s_{u(tahmin)}$ 'ların, $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.	62
Şekil 5.5. Balachandran ve ark. (2017) tarafından N ₆₀ ve Cangir ve Dipova (2017) tarafından N ₇₀ sayısı kullanılarak önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların, $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.	63
Şekil 5.6. (a) Larsson ve Mulabdic (1991) ve Larsson ve Ahnberg (2005) tarafından önerilen N _{kt} ve (b) Karlsrud ve ark. (2005) tarafından önerilen koni N _{ke} , N _{Δu} ve N _{kt} eşitlikleriyle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'dan yüzde değişimleri.	69
Şekil 5.7. Hong ve ark. (2010) tarafından önerilen (a) N _{ke} ve N _{kt} ve (b) N _{Δu} eşitlikleriyle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'dan yüzde değişimleri.	70
Şekil 5.8. (a) Shin ve Kim (2011) N _k ve Remai (2013) N _{Δu} ile (b) Westerberg, Müller ve Larsson (2015) ve Mayne ve Peuchen (2018) tarafından önerilen eşitliklerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'dan yüzde değişimleri.	71
Şekil 6.1. (a) Kil, (b) CH sınıfı ve (c) CL sınıfı zeminlerde SPT-N ile s_u arasındaki ilişkiler.....	74
Şekil 6.2. (a) Kil, (b) CH sınıfı ve (c) CL sınıfı zeminlerde N ₆₀ ile s_u arasındaki ilişkiler.	75
Şekil 6.3. (a) Kil, (b) CH sınıfı ve (c) CL sınıfı zeminlerde N ₁₍₆₀₎ ile s_u arasındaki ilişkiler.....	76
Şekil 6.4. (a) 2 no'lu ve (b) 20 no'lu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u değerleri ile laboratuvarında belirlenmiş $s_{u(ölçülen)}$ değerlerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 6.5. (a) 8 no'lu ve (b) 37 no'lu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u değerleri ile laboratuvarında belirlenmiş $s_{u(ölçülen)}$ değerlerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 6.5. (devam ediyor).....	83

Şekil 6.6. Kanatlı kesici deneylerinde belirlenmiş s_u 'ların UU üç eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen s_u 'lar ile karşılaştırılması.	84
Şekil 6.7. (a) N_{kt} , (b) N_{ke} ve (c) $N_{\Delta u}$ Koni faktörlerinin plastisite indeksine (I_p) göre değişimleri.	86
Şekil 6.8. (a) N_{kt} , (b) N_{ke} ve (c) $N_{\Delta u}$ Koni faktörlerinin likit limite (LL) göre değişimleri.	87
Şekil 6.9. (a) N_{kt} , (b) N_{ke} ve (c) $N_{\Delta u}$ Koni faktörlerinin aşırı konsolidasyon oranına (OCR) göre değişimleri.	88
Şekil 6.10. (a) N_{ke} ve (b) $N_{\Delta u}$ Koni faktörleri ile boşluk suyu basıncı oranı (B_q) arasındaki ilişkiler.	89
Şekil 6.11. s_u ile (a) q_c , (b) q_t ve (c) f_s arasında en yüksek belirleme katsayısına sahip ilişkiler.	91
Şekil 6.12. s_u ile (a) u_2 , (b) (q_c+f_s) ve (c) (q_t+f_t) arasında en yüksek belirleme katsayısına sahip ilişkiler.	92
Şekil 6.13. (a) 51, (b) 52, (c) 55 ve (d) 56 no'lu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u değerleri ile UU üç eksenli deneylerden belirlenenlerin karşılaştırılması.	94
Şekil 6.13. (devam ediyor).....	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	Koni alan oranı
A_c	Koni kesit alanı
A_s	Sürtünme çubuğu yüzey alanı
A_n	Koni gerisindeki çubuğun kesit alanı
A_{sb}	Koni alt kesit alanı
A_{st}	Koni tepe kesit alanı
B_q	Boşluk suyu basıncı oranı
c	Kohezyon
C_A	Çakma başlığı düzeltmesi
C_{BF}	Tokmak vuruş sıklığı düzeltmesi
$C_ç$	Kuyu çapı düzeltmesi
C_N	Etkin (efektif) örtü gerilme düzeltmesi
$C_ö$	İç gömlek düzeltmesi
C_t	Tij uzunluğu düzeltmesi
d_c	Koni çapı
Δu	Boşluk suyu basıncı farkı
f_s	Sürtünme direnci
F_R	Normalize edilmiş sürtünme oranı
f_t	Düzeltilmiş koni direnci
f_1	s_u /SPT-N oranı
I_p	Plastisite indeksi
n	Veri sayısı
N_c	Teorik koni faktörü
N_k	Ampirik koni faktörü

N_{ke}	Efektif koni faktörü
N_{kt}	Düzeltilmiş konik uç direncine göre tanımlı koni faktörü
$N_{\Delta u}$	Boşluk suyu basıncına göre tanımlı koni faktörü
SPT-N/N	Arazide ölçülen darbe sayısı
N_{60}	%60'lık enerjiye göre düzeltme uygulanan darbe sayısı
$(N_1)_{60}$	%60'lık enerji ve etkin örtü gerilme düzeltmesi uygulanan darbe sayısı
q_c	Toplam konik uç direnci
q_e	Efektif konik uç direnci
q_n	Net konik uç direnci
q_t	Düzeltilmiş konik uç direnci
Q_t	Normalize edilmiş konik uç direnci
q_u	Tek eksenli sıkışma dayanımı
r	Korelasyon katsayısı
R^2	Belirleme katsayısı
R_f	Konik penetrasyon deneyi sürtünme oranı
s_t	Zeminlerin hassasiyeti
s_u	Drenajsız makaslama dayanımı
σ_{v0}	Toplam düşey gerilme
σ_{v0}^l	Etkin düşey gerilme
u_0	Hidrostatik basınç
$u_{1,2,3}$	Konik penetrasyon deneyinde ölçülen boşluk suyu basınçları
w_n	Doğal su içeriği
γ	Birim hacim ağırlık

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Birliği
BHA	Birim hacim ağırlık
CPT	Konik Penetrasyon Deneyi
CPTu	Piyezometrik Elektrikli Konik Penetrasyon Deneyi
CH	Yüksek plastisiteli kil
IRTP	Uluslararası Referans Deney Prosedürleri
ISSMFE	Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Birliği
JGS	Japonya Jeoteknik Birliği
CL	Düşük plastisiteli kil
İTO	İnce tane oranı
LL	Likit limit
MH	Yüksek plastisiteli silt
ML	Düşük plastisiteli silt
OCR	Aşırı konsolidasyon oranı
PL	Plastik limit
SCPTu	Sismik Elektrikli Konik Penetrasyon Deneyi
SPT	Standart penetrasyon deneyi
UCS	Tek eksenli sıkışma dayanımı
UU	Konsolidasyonsuz - Drenajsız

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının aktardığı yüklerin etkisi altındaki zeminlerin davranışlarının belirli bir derinliğe kadar bilinmesi, güvenli ve ekonomik bir yapı tasarımının yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Zemin davranışlarının analizinde girdi parametresi olan özelliklerin belirlenmesi ise, laboratuvar veya arazi deneylerinden elde edilen verilerin önerilen bazı yöntemler kullanılarak değerlendirilmesiyle mümkün olmaktadır. Kohezyonlu zeminlerin drenajsız makaslama dayanımı (s_u), özellikle temellerin taşıma gücü ve kısa süreli şev duraylılığı analizlerinde kullanılmakta olup, bu özellik ya konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli deneylerden ve kanatlı kesici gibi arazi deneylerinden doğrudan belirlenmekte ya da bazı arazi deneylerinden elde edilen parametreler ile görgül ilişkilerden yararlanılarak dolaylı yoldan kestirilmektedir.

Laboratuvar deneyleri için örselenmemiş zemin örneklerinin alınması sırasında yaşanan güçlükler, örneklerin nem içeriğinin korunması için uygun şartlarda muhafaza edilmesi, nakliye sırasında örselenmenin olmaması için özel ambalajların hazırlanması gerekliliği, laboratuvar deneylerinin nispeten yüksek maliyetleri vb. gibi nedenlerle, mühendislik uygulamalarında mümkün olduğu kadar pratik ve kolay elde edilebilen yöntemler kullanılarak zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi tercih sebebi olmaktadır.

Kohezyonlu zeminlerin s_u özelliği, deney çukurlarında arazi makaslama ya da sondaj kuyularında kanatlı kesici deneyleriyle doğrudan belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, arazi makaslama deneyi oldukça zahmetli bir yöntem olup, deney çukurları da sadece sığ derinliklerde açılabilir. Sondajlarda yapılabilen kanatlı kesici deneyinden ise, sadece yumuşak killerde başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Bu durum, s_u 'nın diğer bazı arazi deneylerinden dolaylı olarak belirlenmesi için araştırmaların yapılmasına neden olmuştur. Günümüzde jeoteknik saha incelemeleri kapsamında, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ile Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) en çok tercih edilen arazi deneyleridir. Nispeten pratik olmaları ve bu deneylerle kuyu boyunca zemin profillerinin belirlenebilmesi, tercih edilmelerindeki en önemli etkenlerdir. Literatürde, SPT darbe sayıları (SPT-N) veya

enerji oranı düzeltilmesi yapılmış darbe sayılarından (N_{60}) ve CPT konik uç direnci (q_c) ile yanal sürtünme direncinden (f_s) yararlanılarak kohezyonlu zeminlerde s_u 'nun dolaylı yoldan belirlenmesi için önerilen bazı görgül ilişkiler bulunmaktadır (örneğin; Terzaghi ve Peck, 1967; Stroud, 1974; Lunne, Eide ve Ruiter, 1976; Nixon, 1982; Larsson ve Mulabdic, 1991; Karlsrud, Lunne ve Brattlien, 1996; Dipova ve Cangir, 2005; Sivrikaya ve Toğrol, 2006; Hettarachchi ve Brown, 2009; Shin ve Kim, 2011; Remai, 2013; Mayne ve Peuchen, 2018). Bu ilişkilerde sunulan katsayıların bir kısmı birbirine benzemekle birlikte bir kısmı farklılık göstermekte olup, bu nedenle mühendislik uygulamalarında hangisinin tercih edilmesi gerektiği yönünde tereddütler oluşmaktadır.

1970 ve 1980'li yıllarda SPT verisini esas alan araştırmalarda; kullanılan SPT ekipmanı, deneylerin yapıldığı kuyuların çapları, enerji oranları vb. gibi SPT-N sayılarını etkileyebilecek bilgilerin tamamının ya da bir kısmının ilgili yayınlarda açıkça sunulmamış olması, bu çalışmalarda önerilen SPT-N - s_u tahmin eşitliklerinin mühendislik uygulamalarında kullanımına ilişkin soru işaretleri doğurmaktadır. N_{60} kullanılarak s_u eşitliklerinin önerildiği kimi çalışmalarda ise, ya farklı düzeltme eşitliklerinin kullanıldığı (örneğin, kimi çalışmalarda N_{60} değerleri sadece enerji oranı düzeltilmesi yapılarak hesaplanmakta, kuyu çapı, tij uzunluğu, iç gömlek kullanılıp kullanılmadığına ilişkin bilgi verilmemekte) ya da ilgili zeminlerin yaşı, oluşum ortamları, Atterberg özellikleri, üzerlerindeki yük geçmişleri vb. bilgilerin tamamının ya da bir kısmının verilmediği görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmalarda önerilen ilişkilerin ise, sadece önerildiği yer için ve deneyin yapıldığı kuyu çapı, deney ekipmanı ve N_{60} hesaplama biçiminin aynı olması koşuluyla kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.

CPT sistemlerinde yıllara bağlı gelişmeler olmakla birlikte, konik bir ucun zemine sabit bir hızla itilerek ve gerek uç gerekse sürtünme dirençlerinin doğrudan ölçülmesi deneyde elde edilen verinin güvenilirliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte, literatürde CPT parametreleri kullanılarak önerilen s_u tahmin ilişkilerinde de katsayılar farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca, bu çalışmalarda da zeminlere ilişkin bilgilerin sınırlı olduğu görülmektedir.

Yukarıda değinilen hususlar dikkate alınarak bu tez çalışmasında, SPT ve CPT verilerinden kohezyonlu zeminlerin s_u parametresinin kestirimi için literatürde önerilmiş görgül ilişkilerin performanslarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle SPT ve CPT uygulamaları, belirlenen parametreler ve düzeltmeler kısaca tanıtılmış ve bu deneylerin verisinden s_u 'nun dolaylı olarak belirlenmesi amacıyla literatürde önerilen yaklaşımlar ayrıntılı olarak anlatılmıştır. İzleyen aşamada, Türkiye'deki birkaç lokasyonda bir firma tarafından yapılmış SPT ve CPT'lere ait veriler killi zeminlerde s_u değerleri de belirlenmiş olanlar ayırtlanmış olup, söz konusu seviyelerdeki diğer bazı zemin özellikleri de derlenerek bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanındaki SPT ve CPT verisinden ve gerekli olması durumunda diğer bazı zemin özelliklerinden yararlanılarak, literatürde önerilen görgül ilişkiler aracılığıyla s_u 'lar hesaplanmış ve bunlar deneylerle belirlenmiş olanlarla karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmelerden elde edilen bulgular tartışılarak son aşamada, derlenen verileri en iyi temsil eden ilişkilerin belirlenmesi için basit ve çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiş ve istatistiksel anlamlılık testleri de yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. STANDART PENETRASYON VE KONİK PENETRASYON DENEYLERİ (SPT VE CPT)

2.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

SPT, ilk olarak 1927'de ABD' de Raymon Pile Company tarafından geliştirilmiş olup (Douglas, 1983), jeoteknik incelemelerde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmakta ve özellikle standart ve klasik yöntemlerle örnek alımının zor olduğu kohezyonsuz zeminlerde tercih edilen arazi deneylerinden biridir. SPT'den elde edilen veri, literatürde önerilen abaklar ve görgül ilişkiler aracılığıyla taşıma gücü, sıvılaşma analizi gibi mühendislik analizleri için doğrudan girdi parametresi olarak, ya da zeminlerin bazı mühendislik özelliklerinin dolaylı olarak belirlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca, deney sırasında alınan örselenmiş örnekler üzerindeki indeks deneylerle zeminlerin, nem içeriği, tane dağılımları ve Atterberg özelliklerinin belirlenmesi, özgül ağırlıklarının tayini ve sınıflanması mümkün olabilmektedir. Deney yöntemi, 1958 yılında ASTM tarafından standarda (ASTM D1586) alınmış (ASTM, 2000) ve bugüne değin bazı değişikliklere de uğrayarak bu standarttaki yerini korumuştur (Bowles, 1988).

2.1.1. Deneyin Yapılışı

Deneyde, 63.5 kg ağırlığındaki bir şahmerdan, 76 cm'lik bir yükseklikten tijler üzerindeki örsün üzerine serbest şekilde bırakılmakta (darbe) ve standart bir örnek alıcının (SPT tüpü) zemine 30 cm çakılması için gereken darbe sayısı belirlenmektedir (Ulusay, 2010) (Şekil 2.1). Sondajda deneyin yapılacağı derinliğe inildikten sonra, SPT tüpü tijlerin ucuna takılarak kuyu tabanına indirilmekte ve şahmerdan aracılığıyla kuyu dibinden itibaren zemine toplam 45 cm çakılmaktadır. Birbirini izleyen üç çakma aşamasında tüpün her bir 15 cm'lik penetrasyonunu sağlayan darbe sayıları kaydedilmekte ve ilk 15 cm'lik ilerleme kuyu tabanındaki sondaj işleminin oluşturduğu örselenme nedeniyle dikkate alınmayıp sonraki iki 15 cm'lik ilerlemedeki darbe sayılarının toplamı sayısı SPT-N (ya da N) olarak kaydedilmektedir (Şekil 2.2). Eğer 30 cm'lik penetrasyon için gerekli darbe sayısı 50'yi geçerse ya da ilk 10 darbeye hiç ilerleme kaydedilmezse deneye devam edilmeyip darbe sayısı ile penetrasyon miktarı kaydedilmektedir (Ulusay, 2010).

2.1.2. SPT Sonuçlarını Etkileyen Faktörler ve Yapılan Düzeltmeler

SPT sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanması için, deneyde kullanılan ekipmanın ve deneyin nasıl yapıldığının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. SPT için farklı ülkelerde kullanılan şahmerdan tipleri ve serbest bırakılma yöntemleri, örnek alıcıya iletilen enerjinin giriş enerjisine oranının (Enerji oranı, E_r) farklılık göstermesine neden olmaktadır (Çizelge 2.1 ve 2.2). Buna ek olarak diğer bazı faktörler, SPT'den aynı zemin türü ve koşulları için bile farklı darbe sayılarının elde edilmesi, dolayısıyla deneyden belirlenen SPT-N'nin geçerliliğinin ve kullanılabilirliğinin sorgulanması sonucunu doğurmaktadır (Coduto, 1994; McGregor ve Duncan, 1998). E_r , SPT-N sayıları ile doğrudan ilişkili olup, düşük ya da yüksek olması 30 cm'lik ilerleme için gerekli olan SPT-N sayılarının yüksek ya da düşük çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra; kuyu çapı, tijlerin uzunluğu, örnekleme tüpüyle birlikte iç tüpün kullanılıp kullanılmaması ve etkin gerilme gibi faktörler deney sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenlerle, SPT-N sayılarının standart bir tij enerjisi oranına ve diğer faktörlere göre düzeltilmesi gerekmektedir. Seed ve ark. (1984) tarafından standart kabul edilecek enerji oranı için %60 değeri önerilmiştir. Enerji oranı düzeltilmesine ek olarak, diğer faktörlerin etkisi için Çizelge 2.3 ve 2.4'te verilen düzeltme katsayıları ya da eşitlikleri dikkate alınmaktadır. Düzeltilmiş SPT-N sayıları, N_{60} ve $(N_1)_{60}$ olarak ifade edilmekte olup, aşağıda verilen eşitlikler aracılığıyla belirlenmektedir.

$$N_{60} = N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_\phi C_\psi \quad (2.1)$$

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} \quad (2.2)$$

Burada,

N_{60} : %60'lık enerji oranına göre düzeltilmiş darbe sayısı

E_r : Şahmerdan türleri ve serbest bırakılma yöntemine göre enerji oranı

C_t : Tij uzunluğu düzeltmesi

C_ϕ : İç gömlek düzeltmesi

C_ψ : Kuyu çapı düzeltmesi

C_N : Etkin (efektif) örtü gerilme düzeltmesi

McGregor ve Duncan (1998), N_{60} 'ın belirlenmesi için Eşitlik 2.1'de kullanılan düzeltme faktörlerinin (kuyu çapı, tij uzunluğu ve iç gömlek düzeltmesi) yanı sıra, vuruş sıklığı, çakma başlığı ve tokmak yastığı kullanılıp kullanılmaması gibi ek faktörlerin de kullanılması gerektiğini belirterek Eşitlik 2.3'teki ilişkiyi önermişlerdir.

$$N_{60} = N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_{\phi} C_{\psi} C_A C_C C_{BF} \quad (2.3)$$

Burada,

C_A : Çakma başlığı düzeltmesi

C_C : Tokmak yastığı düzeltmesi

C_{BF} : Tokmak vuruş sıklığı düzeltmesi (İnce taneli zeminlerde kullanılmaz)

Çizelge 2.1. Değişik ülkelerde kullanılan şahmerdan türleri ve serbest bırakılma yöntemlerine göre enerji oranı (E_r) değerleri (Skempton, 1986).

Ülke	Şahmerdan Tipi	Serbest bırakma şekli	E_r
Japonya	Halatlı	Tombi	78
	Halatlı	2 çevrim	60
Çin	Pilcon Tipi	Durdurucu düzenekli	60
	Halatlı	Elle	55
ABD	Emniyetli	2 çevrim	55
		2 çevrim	45
	Halatlı		60
İngiltere	Pilcon ve Dando	Durdurucu düzenekli	
	Eski standart	2 çevrim	55

Çizelge 2.2. Clayton (1990) tarafından önerilen değişik ülkelerde kullanılan şahmerdan türleri ve serbest bırakma yöntemine göre enerji oranı (E_r) değerleri.

Ülke	Şahmerdan Tipi	Serbest bırakma şekli	E_r
Arjantin	Halatlı	Kedibaşı	45
Brezilya	İğneli Ağırlık	Elle bırakmalı	72
Çin	Otomatik	Tetikleme	60
	Halatlı	Elle bırakmalı	55
	Halatlı	Kedibaşı	50
Kolombiya	Halatlı	Kedibaşı	50
Japonya	Halatlı	Tombi Kedibaşı, 2 çevrim + özel bırakma	78-85
	Halatlı		65-67
İngiltere	Otomatik	Tetikleme	73
ABD	Emniyetli	Kedibaşı, 2 çevrim	55-60
	Halatlı	Kedibaşı, 2 çevrim	45
Venezuela	Halka	Kedibaşı	43

Çizelge 2.3. Tij, kuyu çapı ve iç gömlek (iç tüp) düzeltme faktörleri (Skempton, 1986; Youd ve ark., 2001).

Tij uzunluğu düzeltmesi (C_t)		
Uzunluk	10-30 m	$C_t = 1.00$
	6-10 m	$= 0.95$
	4-6 m	$= 0.85$
	3-4 m	$= 0.80$
	<3 m	$= 0.75$
İç gömlek düzeltmesi (C_o)		
İç gömlekli (standart) örnekleyici	C_o	$= 1.00$
İç gömleksiz örnekleyici		$= 1.1 - 1.3 (1.2)$
Kuyu çapı düzeltmesi (C_c)		
Kuyu Çapı : 65 - 125 mm	C_c	$= 1.00$
	150 mm	$= 1.05$
	200 mm	$= 1.15$

Çizelge 2.4. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen örtü gerilmesi düzeltme faktörleri (C_N) eşitlikleri (Liao ve Whitman, 1986).

Araştırmacı	C_N	σ'_v 'nin birimi
(1) Teng (1962)	$C_N = 50/(10 + \sigma'^1_v)$	psi
(2) Peck, Hanson ve Thornburn (1974)	$C_N = 0.77\log(20/\sigma'^1_v)$	ton/ft ²
(3) Seed (1976)	$C_N = 1 - 1.25\log(\sigma'^1_v)$	ton/ft ²
(4.1) Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	$C_N = 1.7/(0.7 + \sigma'^1_v)$	kgf/cm ²
(4.2) Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	$C_N = 167/(\sigma'^1_v + 69)$	kPa
(5) Liao ve Whitman (1986)	$C_N = (1/\sigma'^1_v)^{0.5}$	kgf/cm ²
(6) Bowles (1988)	$C_N = (95.76/\sigma'^1_v)^{0.5}$	kPa

σ'_v : Etkin düşey gerilme

2.2. Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)

CPT, zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir arazi deneyi olup, konik bir ucun zemine sabit bir hızla itilmesi sonucu zeminin konik uca gösterdiği direncin ölçümü esasına dayanmaktadır. CPT, gerek hızlı bir deney olması gerekse sürekli veri sağlaması açısından ön plana çıkan ve zemin profilinin tanımlanması ve zeminlerin bazı jeomekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan pratik bir deneydir. İlk kez 1930'lu yılların başında Delft Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda geliştirilen CPT düzeneği (Lunne, Robertson ve Powell, 1997), günümüze kadar teknolojik gelişmeler sonucunda birçok değişime uğramış ve daha fazla parametreyi ölçebilmek amacıyla farklı türde CPT penetrometreleri üretilmiştir. Türkiye'de 1970'li yıllardan itibaren jeoteknik uygulamalarda kullanılmaya başlanan CPT (Durgunoğlu ve Toğrol, 1974), günümüzde alüvyon ve artık zeminlerde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

CPT için Avrupa ülkeleri tarafından ulusal standartlar geliştirilmiş (Lunne, Robertson ve Powell, 1997) olup, bunlar ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering)'nin IRTP (International Reference Test Procedure) adı altında önerdiği deney yöntemini esas almakla birlikte, bazı farklılıklar içermektedirler. Avrupa'daki standartların yanı sıra, CPT için Amerika'da ASTM

(American Society for Testing and Materials) (ASTM, 1994; ASTM D3441) tarafından, Japonya'da ise JGS (Japanese Geotechnical Society) tarafından (Lunne, Robertson ve Powell, 1997) önerilmiş standartlar da bulunmaktadır (Ulusay ve ark., 2001).

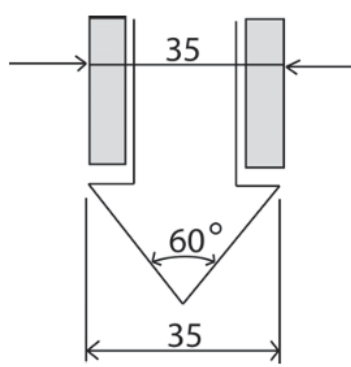
CPT; yumuşak killerden sıkı kumlara kadar değişen geniş bir zemin aralığı için uygun olmakla birlikte, çakıllar ve kayaç içeren zeminler içinse uygun değildir (Durgunoğlu ve Toğrol, 1974). Deney sırasında elde edilen konik uç direnci, sürtünme direnci ve boşluk suyu basıncı verisi ile literatürde önerilen abaklar ve görgül ilişkiler aracılığıyla (örneğin, Douglas ve Olsen, 1981; Robertson ve Campanella, 1983b; Robertson, 1990; Larsson ve Mulabdic, 1991) CPT'nin jeoteknik araştırmalardaki rolü aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- (i) Zemin profilinin belirlenmesi,
- (ii) Yeraltı suyu seviyesinin belirlenmesi,
- (iii) Boşluk suyu basıncının tahmini,
- (iv) Zeminlerde birim hacim ağırlık, bağıl yoğunluk, drenajsız makaslama dayanımı, deformasyon modülü gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin tahmini,
- (v) Temelerde oturma ve taşıma gücü hesaplamaları,
- (vi) Sıvılaşma potansiyeli analizleri

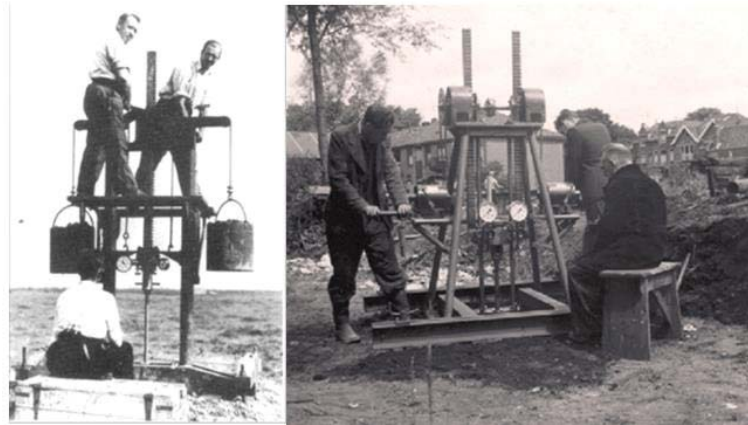
Günümüze kadar geliştirilen CPT sistemlerini mekanik, elektrikli, piyezokonik (CPTu) ve sismik konik penetrometreler (SCPTu) olmak üzere dört ana grupta toplamak mümkündür. Bu sistemlerin özellikleri ve kullanım şekillerine aşağıdaki alt bölümlerde değinilmiştir.

2.2.1 Mekanik Konik Penetrometreler

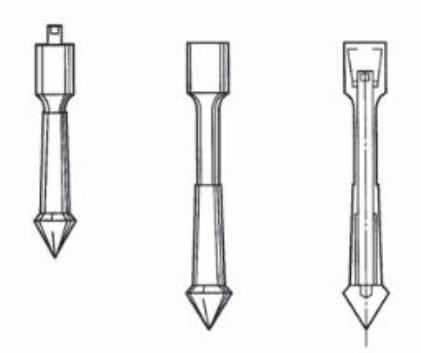
Dutch tipi mekanik konik penetrasyon deneyi ilk kez 1932 yılında Hollanda'da gerçekleştirilmiştir (Sanglerat, 1972). Bu deney, Şekil 2.3'te gösterilen 35 mm'lik dış çapa sahip bir boru içerisinden geçen 15mm çaplı çelik çubukların ucuna monte edilmiş 10 cm²'lik iz düşüm alanına ve 60°'lik tepe açısına sahip mekanik koninin zemine elle itilmesiyle yapılmıştır (Sanglerat 1972; Lunne, Robertson ve Powell, 1997). 1935 yılında, Delft Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nın ilk yöneticisi Huizinga tarafından 10 ton itme kapasiteli elle çalışan mekanik konik penetrasyon aleti tasarlanmış ve arazide uygulaması yapılmıştır (Robertson ve Cabal, 2012) (Şekil 2.4). 1948 yılında Vermeiden ve Plantema, zeminin gövde ile iç çubuk arasına girmesini önlemek amacıyla konik ucun gerisine manto ünitesini eklemişlerdir (Robertson ve Cabal, 2012) (Şekil 2.5).



Şekil 2.3. Dutch tipi mekanik koni boyutları (Sanglerat, 1972).

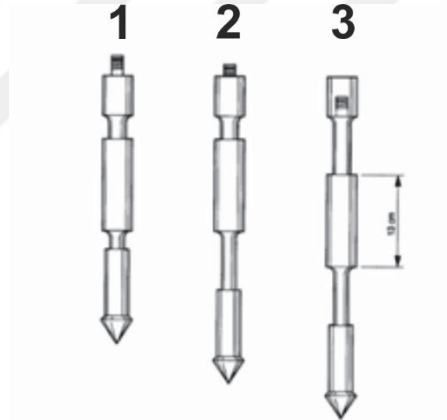


Şekil 2.4. 1935'te üretilen elle çalışan mekanik konik penetrometre cihazı (Robertson ve Cabal, 2012).



Şekil 2.5. Konik Mantolu Hollanda (Delft) konisi (Robertson ve Cabal, 2012).

Begemann (1953), mekanik koniye sürtünme şaftı ekleyerek CPT alanında önemli bir gelişmeye katkı sağlamış olup, uç direncinin yanı sıra yanıl sürtünme direncinin de ölçülmesi için bir düzenek geliştirmiştir (Şekil 2.6). Araştırmacı, bu penetrometreden elde edilen veriden zemin sınıflamasının yapılmasına yönelik önerilerde bulunmuştur.

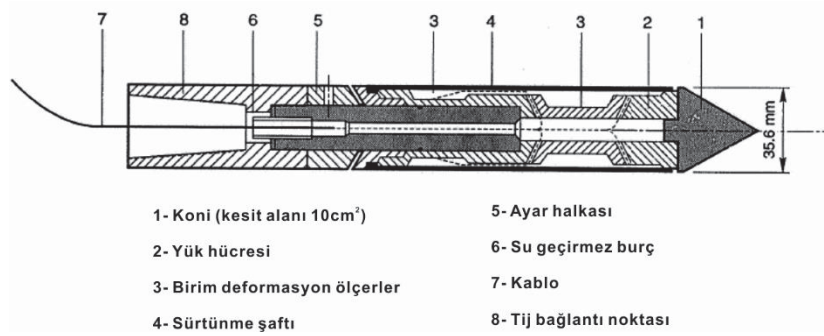


Şekil 2.6. Begemann tipi mekanik sürtünme konisi: (1) kapalı konumda (2) yarı açık konumda ve (3) tamamen açık konumda (Begemann, 1953).

2.2.2. Elektrikli Konik Penetrometreler

Delft zemin mekaniği laboratuvarında elektrikli penetrometre çalışmalarına 1949 yılında başlanmış ve 1957 yılında ilk elektrikli konik penetrometre üretilmiştir (Vlasblom, 1985). Bu penetrometreyle konik uç direncine ilişkin ölçümlerin koninin hemen üst kısmına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerler veya sensörler aracılığıyla yüzeydeki kayıt cihazlarına aralıksız aktarılması sağlanmıştır (Clayton, 1995). 1965 yılında Fugro ve Hollanda Devlet Araştırma Enstitüsü işbirliğiyle uç ve

sürtünme dirençlerini ölçebilen bir elektrikli penetrometre (Şekil 2.7) geliştirilmiştir (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

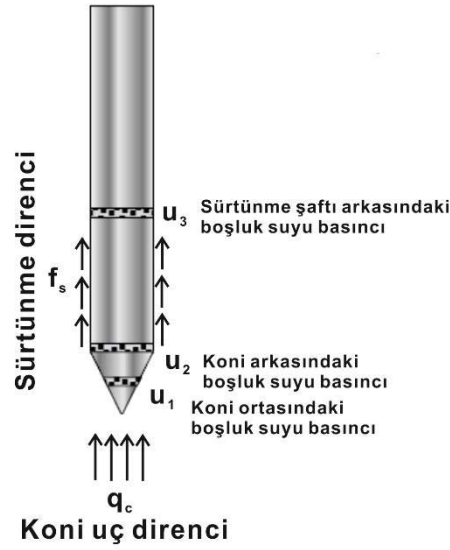


Şekil 2.7. Fugro tipi elektrikli CPT penetrometresi (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

2.2.3. Piyezometrik Elektrikli CPT (CPTu)

1974 yılında Norveç Jeoteknik Enstitüsü (Norwegian Geotechnical Institute) tarafından penetrasyon sırasında boşluk suyu basıncını ölçebilen ilk elektrikli piyezometrik CPT geliştirilmiştir (Lunne, Robertson ve Powell, 1997). Hemen hemen eş zamanlı olarak 1975 yılında Torstensson (1975) ve Wissa, Martin ve Garlanger (1975), hem penetrasyon süresi boyunca hem de penetrasyon duraklatıldığında boşluk suyu basınçlarını ölçebilen elektrikli konik penetrometreyi (Şekil 2.8) geliştirmişlerdir (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

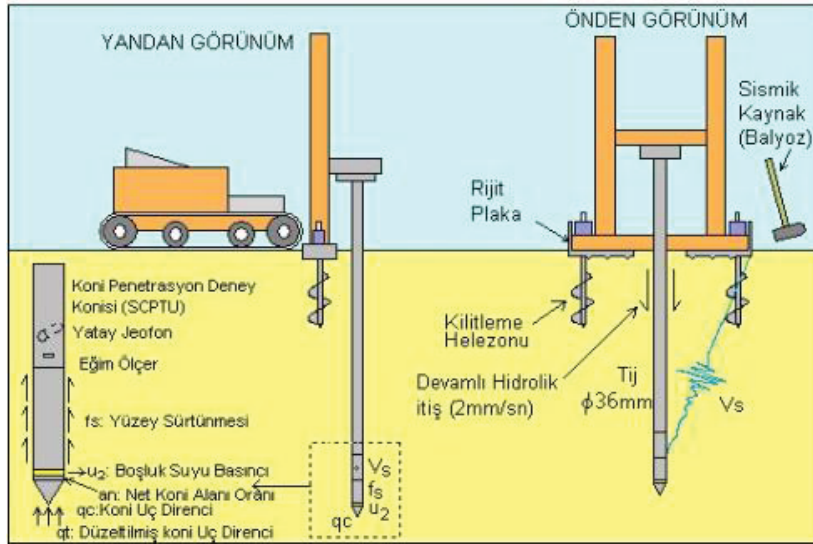
Piyezometrik konik penetrometre sabit bir hızla zemine itilirken kaydedilen boşluk suyu basınçları (sensörlerin penetrometre üzerindeki konumlarına bağlı olarak ve deneyde ilerleme anında ölçülen boşluk suyu basınçları) dinamik değerlerdir. Burada dinamik terimi, penetrometre hareket halindeyken ölçülen boşluk suyu basınçlarını ifade etmek için kullanılmaktadır. CPTu uygulanırken, istenilen derinliklerde penetrasyon durdurulup, boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi izlenerek zeminin geçirimsizlik özellikleri hakkında bilgi edinilebilmekte ve aynı zamanda statik boşluk suyu basınçları da belirlenebilmektedir.



Şekil 2.8. Elektrikli piyezometrik konik penetrometre (Robertson ve Cabal, 2012).

2.2.4. Sismik Piyezometrik Elektrikli CPT (SCPTu)

Sismik Piyezometrik Elektrikli CPT (SCPTu)'de, konik penetrome üzerine yerleştirilen jeofonlar aracılığıyla sismik dalgalar algılanabilmekte ve sismik dalga hızları tahmin edilerek zeminlerin rijitliği hakkında yorum yapılabilmektedir (Clayton, 1995; Bol, Özocak ve Sert, 2014). Zemin yüzeyinde balyoz vuruşu ile oluşturulan sismik dalgalar penetrometre içindeki alıcıya ulaşmakta (Şekil 2.9) ve bilgisayar belleğine kaydedilen veriden makaslama dalgası hızları (S dalga hızları) hesaplanabilmektedir (Bol, Özocak ve Sert, 2014). Ayrıca, deney sırasında istenilen derinliklerde penetrasyon durdurularak çok sayıda S-dalga hızı ölçümü mümkün olabilmektedir.



Şekil 2.9. SCPTu uygulamasının temsili bir görünümü (Bol, Özocak ve Sert, 2014).

2.2.5. CPT/CPTu ile Elde Edilen Veri ve Yapılan Düzeltmeler

CTP/CPTu ile elde edilen konik uç direnci (q_c), yanal sürtünme direnci (f_s), dinamik ve statik boşluk suyu basınçları (u_i) belirlenebilmektedir. Aşağıda, söz konusu deneyde belirlenen temel parametrelere ve bunların fiziksel anlamlarına ilişkin değerlendirmelere yer verilmiştir.

Konik uç direnci (q_c); deney sırasında konik penetrometre ucunda ölçülen zemin tepki kuvvetinin konik uç iz düşüm alanına oranı olarak tanımlanmakta olup, Eşitlik 2.4 yardımıyla belirlenmektedir.

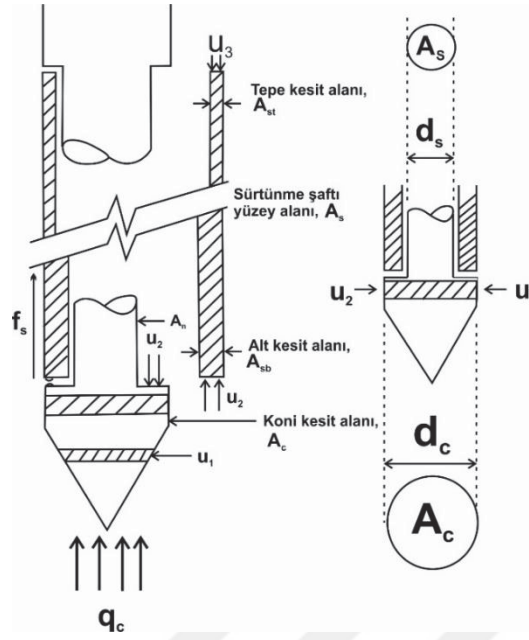
$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (2.4)$$

Burada,

Q_c : Koninin ucunda ölçülen kuvvet

A_c : Koni iz düşüm alanı ($A_c = \frac{\pi d_c^2}{4}$)

d_c : Koni çapı (bkz. Şekil 2.10)



Şekil 2.10. Piyezometrik elektrikli koni iç geometrisi (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

Sürtünme direnci (f_s); sürtünme şaftı yüzeyinde ölçülen kuvvetin, sürtünme çubuğu yüzey alanına oranı olup, Eşitlik 2.5'teki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.5)$$

Burada,

F_s : Sürtünme şaftı yüzeyinde ölçülen kuvvet.

A_s : Sürtünme şaftı yüzey alanıdır (bkz Şekil 2.10).

Düzeltilmiş sürtünme direnci (f_t);

Sürtünme çubuğunun alt ve üst yüzeylerine etkiyen boşluk suyu basıncı için yapılan bir düzeltmedir (Eş. 2.6).

$$f_t = f_s - (u_2 A_{sb} - u_3 A_{st}) / A_s \quad (2.6)$$

A_{sb} : Sürtünme çubuğu alt kesit alanı (bkz Şekil 2.10)

A_{st} : Sürtünme çubuğu tepe kesit alanı (bkz Şekil 2.10)

u_1 : Boşluk suyu basıncı (Koni ortasındaki) (bkz Şekil 2.10)

u_2 : Boşluk suyu basıncı (Koni arkasındaki) (bkz Şekil 2.10)

u_3 : Boşluk suyu basıncı (Sürtünme şaftı tepesindeki) (bkz Şekil 2.10).

U_2 ve U_3 'ün aynı anda ölçülemediği CPTu sistemlerinde $f_t=f_s$ olarak kabul edilebilir (ASTM D5778, 2012).

Düzeltilmiş konik uç direnci (q_t);

Boşluk suyu basıncının konik uç üzerindeki etkisi için yapılan düzeltmedir (Eş. 2.7).

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (2.7)$$

a: Koni Alan oranı (A_n/A_c). (A_n : Koni gerisindeki çubuğun kesit alanı $A_n = \pi d_s^2/4$ 0.50 ile 1.00 arasında bir değer).

Normalize edilmiş koni direnci (Q_t);

Örtü yükü etkisi için yapılan düzeltmedir (Eş. 2.8).

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad (2.8)$$

Burada,

σ_{v0} ve σ'_{v0} : Değerlendirilen derinlikteki zeminin toplam ve efektif örtü yükü gerilmeleridir.

Ölçülen CPT parametreleri ve yapılan düzeltmelere ek olarak gerek zemin sınıflamasında, gerekse bazı jeomekanik parametrelerin belirlenmesinde yararlanılan parametreler mevcut olup (Eş. 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13), bunlara aşağıda değinilmiştir.

Sürtünme oranı (R_f);

Boşluk suyu basıncının ölçülmediği durumda (CPT'de),

$$R_f(\%) = \left(\frac{f_s}{q_c} \right) \times 100 \quad (2.9)$$

Boşluk suyu basıncının ölçüldüğü durumda (CPTu'da),

$$R_f(\%) = \left(\frac{f_s}{q_t} \right) \times 100 \quad (2.10)$$

Normalize edilmiş sürtünme oranı (F_R);

$$F_R(\%) = \left[\frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \right] \times 100 \quad (2.11)$$

Net boşluk suyu basıncı (Δu);

$$\Delta u = u_2 - u_0 \quad (2.12)$$

u_0 : Denge halindeki boşluk suyu basıncı

u_2 : Koni gerisinde deney sırasında ölçülen boşluk suyu basıncı

Boşluk suyu basıncı oranı (B_q);

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (2.13)$$

3. SPT VE CPT VERİSİYLE DRENAJSIZ MAKASLAMA DAYANIMI TAYİNİNE YÖNELİK ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

SPT ve CPT verilerinden makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla literatürde önerilen teorik ve görgül ilişkiler bulunmaktadır. Ancak bu ilişkilerin çokluğu ve aynı tür zemin için farklı sonuçların alınabilmesi gibi nedenlerle, mühendislik çalışmalarında tahmin amacıyla kullanılacak görgül ilişkinin seçiminde tereddüte düşülebilmekte ya da keyfi seçimler yapılabilmektedir.

Daha önce de değinildiği gibi, tez çalışmasının ana hedeflerinden birisi, önerilen bu ilişkiler arasında en iyi performansı gösteren ilişki ya da ilişkilerin ayırtlanmasıdır. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, öncelikle SPT ve CPT verisinden ince taneli zeminlerin drenajsız makaslama dayanımının (s_u) belirlenmesi amacıyla yapılmış önceki çalışmalar derlenmiş ve ana hatlarıyla aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

3.1. Drenajsız Makaslama Dayanımının Tayinine Yönelik SPT Verisini Esas Alan Yöntemler

SPT-N sayısından s_u 'nun çıkarımına yönelik gerçekleştirilen önceki çalışmalarda, s_u değerlerinin ya arazi kanatlı kesici deneyinden ya da laboratuvarda tek eksenli ve/veya üç eksenli sıkışma dayanımı (konsolidasyonsuz-drenajsız, UU) deneylerinden elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle, kronolojik bir sıralamayla aşağıda değinilen önceki çalışmalarda bu farklılıklarla ilgili açıklamalara da yer verilmiştir.

Tek eksenli sıkışma dayanımından belirlenmiş s_u ile SPT-N sayısı arasındaki ilk değerlendirme Terzaghi ve Peck (1967) tarafından Çizelge 3.1'de verilen karşılaştırmalar şeklinde yapılmıştır. Kulhawy ve Mayne (1990), Terzaghi ve Peck (1967) tarafından önerilen bu ilişkilerin kabaca $s_u = 6N$ ilişkisine karşılık geldiği ifade etmelerine rağmen, Çizelge 3.1'deki sınır değerler dikkate alınarak yapılan değerlendirmede bu ilişkinin $s_u = 6.6N$ olduğu görülmüştür.

Sanglerat (1972) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tek eksenli sıkışma dayanımından elde edilmiş s_u değerinin killer için 12.5N'e, siltli killler içinse 10N'e karşılık geldiği belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. SPT-N ve s_u arasındaki ilişki (Terzaghi ve Peck, 1967).

SPT-N	Kıvam	s_u (kPa)
0 – 2	Çok yumuşak	<12.5
2 – 4	Yumuşak	12.5 - 25
4 – 8	Orta katı	25 - 50
8 -15	Katı	50 - 100
15 - 30	Çok katı	100 - 200
>30	Sert	>200

Stroud (1974; Sivrikaya ve Toğrol 2006'dan), birçok bölgeden alınan hassas olmayan killer üzerinde gerçekleştirdiği ve UU üç eksenli sıkışma dayanımı deneyinden elde ettiği değerleri referans alarak SPT-N sayısı ile s_u arasında geçerli bir ilişkinin var olduğunu (Eşitlik 3.1) ve elde edilen sonuçlarda meydana gelen kimi aşırı sapmaların killerin fisürlü yapısından kaynaklandığını belirtmiştir. Sivrikaya ve Toğrol (2006) tarafından, bu eşitlikteki N değeri için enerji düzeltmesi yapıp yapılmadığının bilinmediği belirtilmiştir. Bununla birlikte, Terzaghi, Peck ve Mesri (1996) tarafından bu eşitlikteki N sayılarının N_{60} olduğu ifade edilmiştir.

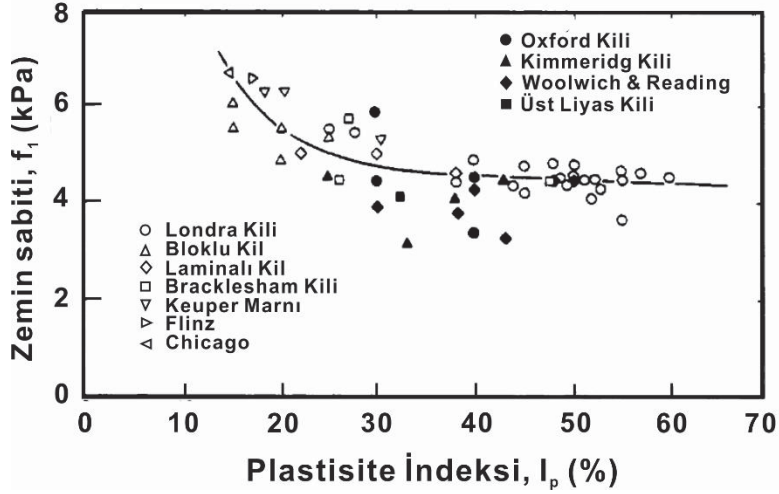
$$s_u = \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = f_1 * N \quad (3.1)$$

Burada,

f_1 : Zeminin plastisite indeksine (I_p) bağlı bir değer olup, ortalama 4.2 ile 7 kPa arasında değişmektedir (Şekil 3.1).

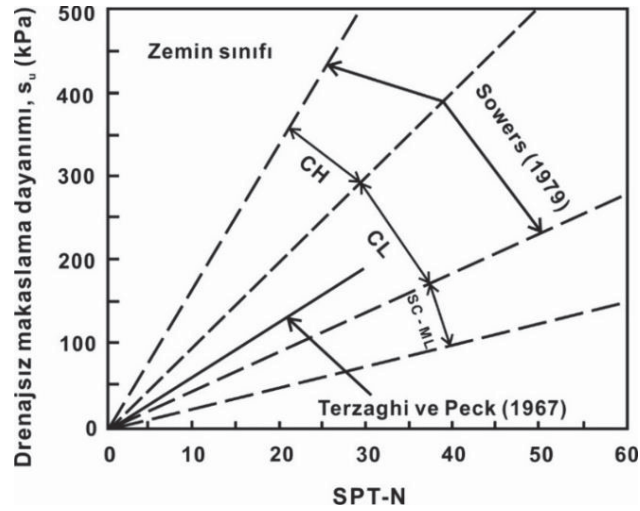
Hara ve ark. (1974), kohezyonlu zeminlere ait örnekler üzerinde gerçekleştirdikleri UU üç eksenli deneylerden belirlenmiş s_u değerleri ile SPT-N sayısı arasındaki ilişkiyi en küçük kareler yöntemini kullanarak Eşitlik 3.2'de olduğu gibi önermişlerdir.

$$s_u = 29N^{0.72} \quad (3.2)$$



Şekil 3.1. f_1 ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki (Stroud, 1974).

Sowers (1979), ince taneli zeminlerin plastiklik özelliklerine bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinden belirlenmiş s_u ile SPT-N sayıları arasındaki ilişki için Şekil 3.2'deki grafikleri önermiştir. Bu grafiklerden genel bir yaklaşımla s_u 'nun kestirimi için yüksek orta ve düşük plastisiteli malzemeler için sırasıyla 12.5N, 7.5N ve 3.5N ilişkileri önerilmiştir. Nixon (1982) ise, tüm ince taneli zeminler için s_u 'nun 12N'e karşılık geldiğini belirtmiştir.



Şekil 3.2. Terzaghi ve Peck (1967) ve Sowers (1979) tarafından önerilen SPT-N s_u grafikleri.

İyisan ve Ansal (1990), Türkiye'nin çeşitli yerlerinden elde edilen 96 örnek üzerinde gerçekleştirdikleri tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçlarını kullanarak s_u ile SPT-N arasında Eşitlik 3.3'teki ilişkiyi bulmuşlardır.

$$s_u = 4.43N + 8.07 \quad (3.3)$$

Decourt (1990), Brezilya'nın Sao Paulo eyaletinden aşırı konsolide ve hassas olmayan killerden aldığı örnekler üzerinde yaptığı UU üç eksenli deneylerin sonuçlarını referans alarak, s_u ile SPT-N ve N_{60} sayıları arasındaki ilişkiyi Eşitlik 3.4 ve 3.5'te olduğu gibi önermiştir.

$$s_u = 12.5N \quad (3.4)$$

$$s_u = 15N_{60} \quad (3.5)$$

Sivrikaya ve Toğrol (2002), ince taneli zeminlere ait 226 örnek üzerinde yaptıkları tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçlarını esas alarak s_u ile SPT-N sayısı ve N_{60} arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Bu çalışmada, N_{60} sayısı Eşitlik 2.3'e göre hesaplanmış olup, bu eşitlikteki C_A katsayısı için 0.85, C_c ve C_{BF} katsayıları içinse 1 değeri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak araştırmacılar, yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killer (CH ve CL) için ve ayrıca ince taneli zeminler için korelasyon katsayıları (r) 0.73 ile 0.83 arasında değişen eşitlikler önermişlerdir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Sivrikaya ve Toğrol (2002) tarafından ince taneli ve kil zeminler için önerilen s_u - N ve N_{60} ilişkileri.

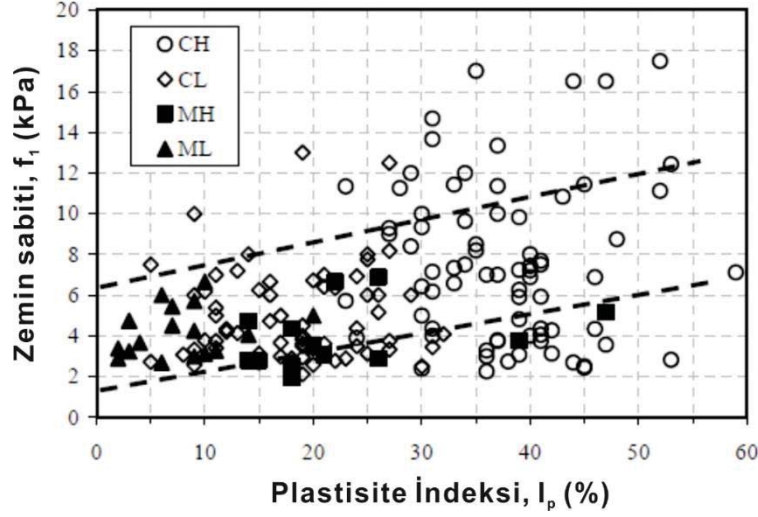
Zemin Türü	Drenajsız Makaslama Dayanımı s_u (kPa)	Korelasyon Katsayısı (r)
Yüksek plastisiteli killer (CH) n=113	4.85N	0.83
	6.82 N_{60}	0.80
	3.35N	0.76
Düşük plastisiteli killer (CL) n=72	4.93 N_{60}	0.73
	4.32N	0.80
İnce taneli zeminler n=226	6.18 N_{60}	0.78

n: Veri sayısı

Sivrikaya ve Toğrol (2006), 2002 yılındaki çalışmalarında kullandıkları veri tabanına, UU üç eksenli ve kanatlı kesici deneylerini de ekleyerek elde ettikleri 478 adet s_u verisi ile SPT-N ve N_{60} sayıları arasında basit regresyon analizleri yapmışlardır (Çizelge 3.3). Araştırmacılar, N_{60} sayısı'nın belirlenmesinde 2002 yılındaki çalışmalarında yararlandıkları eşitlik (bkz. Eş 2.3) ve bu eşitlikteki katsayılar için dikkate aldıkları değerleri kullanmışlardır. Bu araştırmacılar ayrıca, ince taneli zeminler için geliştirdikleri ilişkilerdeki katsayıların Terzaghi ve Peck (1967) ve Stroud (1974)'un önerdikleri ile uyumlu olduğunu, diğer araştırmacıların önerdiklerinin ise oldukça yüksek değerler verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, Stroud (1974)'un f_1 katsayısının plastisite indeksi ile azaldığı yaklaşımına (bkz. Şekil 3.1) katılmanın oldukça güç olduğunu ve I_p 'nin artmasıyla f_1 değerinin artma eğiliminde olduğunu da belirtmişlerdir (Şekil 3.3).

Çizelge 3.3. SPT - N ve N_{60} ile s_u arasındaki ilişkiler (Sivrikaya ve Toğrol, 2006).

Zemin Türü	s_u (kPa) Tek Eksenli Sıkışma Dayanım Deneyi	s_u (kPa) Üç Eksenli Sıkışma Dayanım Deneyi	s_u (kPa) Kanatlı Kesici Deneyi	s_u (kPa) Ortalama
Yüksek Plastisiteli Kil (CH)	4.85N (r=0.83) s=±80	5.90N (r=0.80) s=±39	6.17N (r=0.80) s=±10	5.50N
	6.82 N_{60} (r=0.80) s=±86 n=113	8.76 N_{60} (r=0.80) s=±39 n=80	8.27 N_{60} (r=0.80) s=±10 n=13	7.80 N_{60}
Düşük Plastisiteli Kil (CL)	3.35N (r=0.76) s=±64	3.97N (r=0.75) s=±21	3.58N (r=0.83) s=±6	3.70N
	4.93 N_{60} (r=0.73) s=±68 n=72	5.82 N_{60} (r=0.75) s=±21 n=67	4.88 N_{60} (r=0.80) s=±5 n=11	5.35 N_{60}
Kil	4.33N (r=0.82) s=±82	5.13N (r=0.76) s=±36	4.97N (r=0.73) s=±12	4.75N
	6.19 N_{60} (r=0.77) s=±85 n=185	7.57 N_{60} (r=0.76) s=±36 n=147	6.72 N_{60} (r=0.75) s=±11 n=24	6.90 N_{60}
İnce Taneli Zemin	4.32N (r=0.80) s=±78	4.68N (r=0.72) s=±35	4.18N (r=0.76) s=±10	4.45N
	6.18 N_{60} (r=0.78) s=±81 n=226	6.97 N_{60} (r=0.71) s=±35 n=190	5.77 N_{60} (r=0.79) s=±10 n=62	6.35 N_{60}
n: Veri sayısı	s: Standart hata	r: Korelasyon katsayısı		



Şekil 3.3. Stroud (1974) tarafından önerilen f_1 katsayısı ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki (Sivrikaya ve Toğrol, 2006).

Kalantary, Ardalan ve Nariman-Zadeh (2008), İran'ın çeşitli bölgelerinde ince taneli zeminlerden elde ettikleri örnekler üzerinde yaptıkları üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçlarını kullanarak 50 ile 250 kPa aralığında değişen etkin gerilme değerleri için s_u ile N_{60} ve I_p arasında Çizelge 3.4'te sunulan eşitlikleri önermişlerdir. Araştırmacılar, N_{60} 'ı Eşitlik 2.3'teki ilişki aracılığıyla belirlemiş olup, C_A , C_c ve C_{BF} katsayılarını çalışmalarında dikkate almadıklarını ifade etmişlerdir.

Çizelge 3.4. Etkin gerilmelerin değişimine bağlı s_u ile N_{60} ve I_p arasındaki ilişkiler (Kalantary, Ardalan ve Nariman-Zadeh, 2008).

Etkin Gerilme ($\sigma_{v0'}$)	Drenajsız Makaslama Dayanımı s_u (kPa)
50 kPa	$s_u = I_p^2(0.0055N_{60} - 0.008) - I_p(0.176N_{60} - 0.3) + 1.7N_{60} + 41$
100 kPa	$s_u = I_p^2(0.0125N_{60} - 0.1) - I_p(0.425N_{60} - 3.4) + 4.1N_{60} + 16.5$
150 kPa	$s_u = I_p^2(0.0216N_{60} - 0.222) - I_p(0.721N_{60} - 7.4) + 6.9N_{60} - 19$
200 kPa	$s_u = I_p^2(0.0306N_{60} - 0.33) - I_p(1.016N_{60} - 11.1) + 9.4N_{60} - 50.5$
250 kPa	$s_u = I_p^2(0.0371N_{60} - 0.423) - I_p(1.22N_{60} - 14) + 11.1N_{60} - 75$

I_p : Plastisite indeksi

Kalantary, Ardalan ve Nariman-Zadeh (2008) Çizelge 3.4'te önerdikleri ilişkilerdeki sapmaları en aza indirmek için yaptıkları anlamlılık analizleri sonucunda söz konusu bu ilişkileri, Çizelge 3.5'te verilen parametre aralıkları için sınırlandırmışlardır.

Çizelge 3.5. Kalantary, Ardalan ve Nariman-Zadeh, (2008) tarafından önerilen s_u eşitliklerindeki girdi parametrelerinin değişim aralıkları.

Değişken	Değer aralığı
N_{60}	5-30
$\sigma_{vo'}$	50-250 (kPa)
I_p	5-20 (%)
w_n	5-25 (%)

I_p : Plastisite indeksi $\sigma_{vo'}$: Etkin gerilme w_n : Doğal su içeriği

Hettiarachchi ve Brown (2009), farklı bir bakış açısıyla SPT çarığının minyatür bir çakma kazığı gibi davrandığını düşünerek enerji dengesi yaklaşımından yararlanmışlardır. SPT esnasında giriş enerjisinin bir kısmının zemine iletildiğini ve bu enerjinin örnek alıcı çarık yüzeyinin etrafında sürtünme kuvvetini ve çarık ucunda meydana gelen uç direncini yenmek için harcandığını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar enerji yöntemini kullanarak, s_u ile N_{60} arasında Eşitlik 3.6'daki ilişkiyi önermişlerdir.

$$s_u \text{ (kPa)} = \frac{N_{60}}{(1+5\alpha)} = \alpha' N_{60} = 4.1 N_{60} \quad (3.6)$$

Burada,

α : Sabit

α' : Deneysel katsayı, ortalama olarak 4.1 değerine karşılık gelmektedir.

Sivrikaya (2009), yapay sinir ağı yöntemi ile kohezyonlu zeminlerde 150 örnek üzerinde yapılan tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçlarını kullanarak s_u ile SPT-N ve N_{60} sayıları, doğal su içeriği (w_n), likit limit (LL) ve plastisite indeksi (I_p) arasında Çizelge 3.6'daki ilişkileri önermiştir. Sivrikaya (2009) tarafından, N_{60} 'ın belirlenmesinde Sivrikaya ve Toğrol (2002)'un yararlandığı yöntem ve değerler kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. Sivrikaya (2009) tarafından, kohezyonlu zeminler için önerilen s_u ile SPT-N, N_{60} , w_n , LL ve I_p arasındaki ilişkiler.

Deney Türü	Drenajsız Makaslama Dayanımı s_u (kPa)	Korelasyon Katsayısı (r)
UCS n=50	$2.41N - 0.82W_n + 0.14LL + 1.44I_p$	0.86
	$3.24N_{60} - 0.53W_n - 0.43LL + 2.14I_p$	0.87
UU n=100	$3.33N - 0.75W_n + 0.2LL + 1.67I_p$	0.82
	$4.43N_{60} - 1.29W_n + 1.06LL + 1.02I_p$	0.81

n: Veri sayısı I_p : Plastisite indeksi LL: Likit limit w_n : Doğal su içeriği

Nassaji ve Kalantari (2011), Tahran'daki (İran) ince taneli zeminlerden alınan 60 örnek üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleriyle s_u ları belirlemişler ve bunlar ile SPT-N, N_{60} , w_n , LL ve I_p arasında yapılan basit ve çoklu lineer regresyon analizlerinden yararlanarak Çizelge 3.7'de verilen ilişkileri önermişlerdir. Bu ilişkilerin oluşturulmasında kullanılan zemin örneklerinin I_p 'sinin 20'den küçük olması sebebiyle, önerilen ilişkilerin kullanımını I_p değeri en fazla 20 olan zeminlerle sınırlandırılmıştır. Araştırmacılar, çalışmalarında elde ettikleri sonuçların en çok Sivrikaya (2009)'nın önerdiği ilişkilerle uyumlu olduğunu, Sowers (1979) tarafından önerilenler ile karşılaştırma yaptıklarında ise, oldukça büyük farklılıkların görüldüğünü ifade etmişlerdir. Bu farklılıkların nedenlerinin ise, ülkeden ülkeye değişen deney yöntemlerinden ve zeminlerin fiziksel özelliklerinden kaynaklanmış olabileceğini belirtmişlerdir.

Çizelge 3.7. Nassaji ve Kalantari (2011) tarafından, ince taneli zeminler için önerilen s_u ile SPT-N, N_{60} , w_n , LL ve I_p arasındaki ilişkiler.

Deney Türü	Zemin Türü	Drenajsız Makaslama Dayanımı s_u (kPa)	Korelasyon Katsayısı (r)
Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi	İnce taneli zeminler n=60 $I_p < 20$	$1.6N + 15.4$ $r=0.72$	0.72
		$2.1N_{60} + 17.6$ $r=0.73$	0.73
		$1.5N - 0.1W_n - 0.9LL + 2.4I_p + 21.1$	0.80
		$2N_{60} - 0.4W_n - 1.1LL + 2.4I_p + 33.3$	0.81

n: Veri sayısı, I_p : Plastisite indeksi, LL: Likit limit, w_n : Doğal su içeriği

Cangir ve Dipova (2017), Konyaaltı siltli killlerinden aldıkları örselenmemiş örnekler üzerinde yaptıkları üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleriyle belirledikleri s_u değerleri ve N_{70} sayıları arasında Eşitlik 3.7'deki gibi bir ilişkiyi önermişlerdir. Araştırmacılar elde ettikleri bu sonucun, Sivrikaya ve Toğrol (2006)'un CH sınıfı killer için önerdikleri $6.82N_{60}$ katsayısı ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

$$s_u = 6.932N_{70} \quad (3.7)$$

Balachandran ve ark. (2017) ise, Toronto'da (Kanada), ince taneli zeminlerde kanatlı kesici deneyinden elde ettikleri değerleri esas alarak, s_u ile N_{60} arasında aşağıda verilen eşitliği önermişlerdir.

$$s_u = 8.32N_{60} \quad (3.8)$$

Daha önce de değinildiği gibi, tez çalışması kapsamında derlenen SPT, CPT ve s_u verisi, literatürde önerilen ilişkilerin performanslarının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Ulaşılabilen literatür çalışmalarına yukarıda nispeten ayrıntılı olarak değinilmiş olmasına rağmen, okuyucunun tüm eşitlikleri ve araştırmacıların N_{60} 'ın belirlenmesinde kullandığı yöntemleri ve deney aletlerini bir arada görmesinin Bölüm 5'te değinilen performans değerlendirmeleriyle ilişkilendirme yapılırken kolaylık sağlayacağı düşünülmüştür. Bu nedenle, yukarıda değinilen çalışmalarda s_u 'nun belirlenmesine yönelik önerilen tüm eşitlikler Çizelge 3.8'de bir arada verilmiştir.

Çizelge 3.8. Literatürde s_u 'nun belirlenmesine yönelik önerilen ilişkiler.

Araştırmacılar	Şahmerdan Türü	Enerji Oranı (E_r)	N_{60} Belirleme Eşitliği	s_u Belirleme Şekli	Zemin Türü	s_u (kPa) Tahmin İlişkisi
Terzaghi ve Peck* (1967)				UCS	İnce taneli zeminler	6.6N
Sanglerat (1972)*				UCS	Kil	12.5N
					Siltli killler	10N
Hara ve ark. (1974)				UU	Kohezyonlu Zeminler (Japonya)	$29N^{0.72}$
Stroud (1974)*		60*	$N \left(\frac{E_r}{60} \right)^*$	UU	Katı-Sert fissürlü killler ve zayıf kayalar (İngiltere) - Chicago buzul killeri	$I_p > 30 \approx 4.2N$ $20 < I_p < 30 \quad 4 \sim 5N$ $I_p < 20 \quad 6 \sim 7N$
Sowers (1979)*				UCS	Yüksek plastisiteli killler (CH)	12.5N
					Orta plastisiteli killler	7.5N
					Düşük plastisiteli killler (CL)	3.5N
Nixon (1982)*				UCS	İnce taneli zeminler	12N
İyisan ve Ansal (1990)				-	Kohezyonlu zeminler (Türkiye) $n=106$	$4.43N + 8.07$
Decourt (1990)	İğne Ağırlıklı	72	$N \left(\frac{E_r}{60} \right)$	UU	Aşırı konsolide hassas olmayan killler (Brezilya-Sao paulo)	12,5N $15N_{60}$
Sivrikaya ve Toğrol (2002)	Halatlı	45	$N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_0 C_c C_A C_C C_{BF}$	UCS	(Türkiye) Yüksek plastisiteli killler (CH) $n=113$	$4.85N \quad r=0.83$ $6.82N_{60} \quad r=0.80$
					Düşük plastisiteli killler (CL) $n=113$	$3.35N \quad r=0.76$ $4.93N_{60} \quad r=0.73$
					İnce taneli zeminler $n=226$	$4.32N \quad r=0.80$ $6.18N_{60} \quad r=0.78$
Sivrikaya ve Toğrol (2006)	Halatlı	45	$N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_0 C_c C_A C_C C_{BF}$	UCS	(Türkiye) Yüksek plastisiteli kil (CH) $n=113$	$4.85N \quad r=0.83$ $6.82N_{60} \quad r=0.80$
					Düşük plastisiteli killler (CL) $n=72$	$3.35N \quad r=0.76$ $4.93N_{60} \quad r=0.73$
					Kil $n=185$	$4.33N \quad r=0.82$ $6.19N_{60} \quad r=0.77$
					İnce taneli zeminler $n=226$	$4.32N \quad r=0.80$ $6.18N_{60} \quad r=0.78$
				UU	Yüksek plastisiteli killler (CH) $n=80$	$5.90N \quad r=0.80$ $8.76N_{60} \quad r=0.80$
					Düşük plastisiteli killler (CL) $n=67$	$3.97N \quad r=0.75$ $5.82N_{60} \quad r=0.75$
					Kil $n=147$	$5.13N \quad r=0.76$ $7.57N_{60} \quad r=0.76$
					İnce taneli zeminler $n=190$	$4.68N \quad r=0.72$ $6.97N_{60} \quad r=0.71$
				Kanatlı kesici	Yüksek plastisiteli kil (CH) $n=13$	$6.17N \quad r=0.80$ $8.27N_{60} \quad r=0.80$
					Düşük plastisiteli kil (CL) $n=11$	$3.58N \quad r=0.83$ $4.88N_{60} \quad r=0.80$
					Kil $n=24$	$4.97N \quad r=0.73$ $6.72N_{60} \quad r=0.75$
					İnce taneli zemin $n=62$	$4.18N \quad r=0.76$ $5.77N_{60} \quad r=0.79$
				Ortalama (Deneyler)	Yüksek plastisiteli kil (CH)	$5.50N$ $7.80N_{60}$
					Düşük plastisiteli kil (CL)	$3.70N$ $5.35N_{60}$
					Kil	$4.75N$ $6.90N_{60}$

					İnce taneli zemin	4.45N 6.35N ₆₀ r=0.79
Kalantary, Ardalan ve Nariman-Zadeh (2008)	Emniyetli	50	$N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_\phi C_\gamma C_A C_C C_{BF}$	UU	Etkin gerilme (σ_{vo}) ince taneli zemin (İran)	
					50 (kPa)	$I_p^2(0.0055N_{60} - 0.008) - I_p(0.176N_{60} - 0.3) + 1.7N_{60} + 41$
					100 (kPa)	$I_p^2(0.0125N_{60} - 0.1) - I_p(0.425N_{60} - 3.4) + 4.1N_{60} + 16.5$
					150 (kPa)	$I_p^2(0.0216N_{60} - 0.222) - I_p(0.721N_{60} - 7.4) + 6.9N_{60} - 19$
					200 (kPa)	$I_p^2(0.0306N_{60} - 0.33) - I_p(1.016N_{60} - 11.1) + 9.4N_{60} - 50.5$
					250 (kPa)	$I_p^2(0.0371N_{60} - 0.423) - I_p(1.22N_{60} - 14) + 11.1N_{60} - 75$
Hettiarachchi ve Brown (2009)	Belirtilmemiş	60-65	$N \left(\frac{E_r}{60} \right)$	UCS	Kil zeminler	4.1N ₆₀
Sivrikaya (2009)	Halatlı	45	$N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_\phi C_\gamma C_A C_C C_{BF}$	UCS	(Türkiye) Kohezyonlu zeminler n=50	$2.41N - 0.82W_n + 0.14LL + 1.44I_p$ r=0.86 $3.24N_{60} - 0.53W_n - 0.43LL + 2.14I_p$ r=0.87
				UU	Kohezyonlu zeminler n=100	$3.33N - 0.75W_n + 0.2LL + 1.67I_p$ r=0.82 $4.43N_{60} - 1.29W_n + 1.06LL + 1.02I_p$ r=0.81
Nassaji ve Kalantari (2011)	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	$N \left(\frac{E_r}{60} \right) C_t C_\phi C_\gamma C_A C_C C_{BF}$	UCS	İnce taneli zeminler (İran-Tahran)	$1.6N + 15.4$ r=0.72 $2.1N_{60} + 17.6$ r=0.73 $1.5N - 0.1W_n - 0.9LL + 2.4I_p + 21.1$ r=0.8 $I_p < 20$ n=60 $2N_{60} - 0.4W_n - 1.1LL + 2.4I_p + 33.3$ r=0.81
Cangir ve Dipova (2017)	Emniyetli	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	UU	Lagünel Siltli killi zeminler (Türkiye-Konyaaltı)	$6.932N_{70}$ R ² =0,77
Balachandran ve ark. (2017)	Otomatik	60	$N \left(\frac{E_r}{60} \right)$	Kanatlı kesici Deneyi	Kohezyonlu buzul çökelleri (Kanada-Toronto)	$8.32N_{60}$ R ² =0,79 $4 < I_p < 14$

*: Terzaghi, Peck ve Mesri (1996)'den +: Sivrikaya ve Toğrol (2006)'dan σ_{vo} : Etkin gerilme UCS: Tek eksenli sıkışma dayanım deneyi

UU: Konsolidasyonsuz- Drenajsız üç eksenli sıkışma dayanım deneyi I_p : Plastisite indeksi r: Korelasyon katsayısı R²: Belirleme katsayısı

3.2. Drenajsız Makaslama Dayanımının Tayinine Yönelik CPT Verisini Esas Alan Yöntemler

s_u ; yenilme modeline, zeminin anizotropisine, birim deformasyon hızına ve gerilme tarihçesine bağlıdır (Lunne, Robertson ve Powell, 1997). Bu nedenle, analizlerde kullanılacak s_u değeri aslında tasarım problemine bağlıdır. Literatürde, CPT ve CPTu sonuçlarından yararlanılarak ince taneli zeminlerde s_u 'nun belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaları, aşağıdaki bölümlerde verildiği gibi, teorik ve görgül yaklaşımlar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür.

3.2.1. Teorik Yaklaşımlar

CPT deneyinden elde edilen konik uç direnci ve drenajsız makaslama dayanımı arasındaki ilişkiyi belirlemek için literatürde önerilen teorik çözümler aşağıda verilen beş başlık altında toplanabilmektedir (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

- 1) Klasik taşıma gücü kapasitesi teorisi
- 2) Boşluk genişleme teorisi
- 3) Boşluk genişleme teorisi ile enerjinin korunumu
- 4) Doğrusal ve doğrusal olmayan gerilme eğrisi ilişkilerini kullanan analitik ve sayısal yaklaşımlar.
- 5) Gerilme koşulu teorisi

Bu çözümlerinin tamamında konik uç direnci ve s_u arasındaki teorik ilişki, Eşitlik 3.9'da verilen forma uygun olduğu belirtilmektedir (Lunne, Robertson, ve Powell, 1997).

$$q_c = N_c s_u + \sigma_0 \quad (3.9)$$

Burada,

q_c : Konik uç direnci

N_c : Teorik koni faktörü

σ_0 : Yerinde toplam gerilme (σ_0 , kullanılan teoriye bağlı olarak, σ_{vo} , σ_{ho} ve σ_{ort} olarak kullanılabilir).

Çizelge 3.9'da literatürde teorik koni faktörü (N_c) için yapılan çözümlemelere ilişkin bir özet sunulmuştur. Bu çizelgede, N_c için rakamsal değerler ya da ilişkiler ile bunların belirlenmesi için yararlanılan teorik yaklaşımların isimleri de verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde, N_c değerlerinin rakamsal olarak 7 ile 10 arasında değiştiği ya da zeminin elastik özellikleri, yarı tepe açısı, makaslama dayanımı vb. özelliklerden yararlanılarak teorik ilişkilerle belirlenebileceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.9. Teorik koni faktörü (N_c) değerleri (Konrad ve Law, 1987; Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

$N_c (\Phi=0)$	σ_o	Çözüm Sınıfı	Açıklamalar	Araştırmacılar
7.41	σ_{vo}	1	-	Terzaghi (1943)
7.0	σ_{vo}	1	-	Caquot ve Kerisel (1956)
9.34	σ_{vo}	1	Pürüzsüz taban	Meyerhof (1951)
9.74	σ_{vo}	1	Pürüzlü taban	Meyerhof (1951)
9.94	σ_{vo}	1	-	De beer (1977)
$\frac{4}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{E_t}{3s_u} \right) \right] + 1$	σ_{vo}	2	Küresel boşluk genişlemesi	Meyerhof (1951)
$\frac{4}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{E_s}{s_u} \right) \right] + 1$	σ_{vo}	2	Küresel boşluk genişlemesi	Skempton (1951)
$\frac{4}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{E_s}{3s_u} \right) \right] + \cot \theta$	σ_{vo}	2	Küresel boşluk genişlemesi	Gibson (1950)
$\frac{4}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{E_s}{s_u} \right) \right] + \cot \theta$	σ_{vo}	2	Küresel boşluk genişlemesi, sonlu birim deformasyon teorisi	Gibson (1950)
$\frac{4}{3} [1 + \ln(I_r)]$	σ_{vo}	2	Küresel boşluk genişlemesi	Vesic (1972)
$\frac{4}{3} [1 + \ln(I_r)] + 2.57$	σ_o	3	Küresel boşluk genişlemesi	Vesic (1975)
$[1 + \ln(I_r)] + 11$	σ_{ho}	3	Silindirik boşluk genişlemesi	Baligh (1975)
$\left(\frac{s_a}{s_u} \right) + \frac{4}{3} \left(\frac{s_r}{s_u} \right) \left[1 + \ln \left(\frac{E_r}{s_u} \right) \right] + \frac{4}{3}$	σ_{vo}	4	Üç düzlemsel gerilme birim deformasyon ilişkisi	Ladanyi (1967)
$\left[\frac{E_u - E_r}{s_u - s_{ur}} \times \frac{s_{ur}}{s_u} \right] \ln \frac{E_u s_{ur}}{s_u E_r} + 0.19 + 2.64 \ln(I_r) - \frac{\sigma_{vo}^1}{s_u} - (1 - K_0) + 2\alpha$	σ_{vo}	5	Elastik mükemmel plastik-Birim deformasyon yaklaşımı	Teh (1987)

N_c : Teorik koni faktörü Φ : İçsel sürtünme açısı I_r : Rijidite indeksi = $(E_u/3s_u)$ E_t : İksel tanjant modülü E_s : %50 yenilme gerilmesindeki secant modülü E_u : Killerin drenajsız young modülü E_r : Rezidüel young modülü s_u : Drenajsız makaslama dayanımı s_{ur} : Rezidüel drenajsız makaslama dayanımı θ : Yarı tepe açısı K_0 : Yerinde gerilme oranı σ_o : Ortalama toplam gerilme = $(\sigma_{vo} + 2\sigma_{ho})/3$ α : Koni pürüzlülük katsayısı

3.2.2. Görgül Yaklaşımlar

Geçmişte araştırmacıların önerdiği çoğu teorik yöntem; zemin sınır koşulları, zemin gerilim koşulları ve zeminlerin yenilme kriterleri hakkında basit çıkarımlar yapmasından dolayı bazı sınırlamaları bulunmaktadır (Konrad ve Law, 1987). Bu nedenle, s_u 'nun tahminine yönelik daha uygulanabilir olduğu düşünülen görgül yöntemler kimi araştırmalarda tercih edilmiştir (Lunne, Robertson ve Powell, 1997). Önerilen mevcut görgül yaklaşımların, toplam koni direnci, efektif koni direnci ve boşluk suyu basıncı değişimine bağlı olarak 3 kategori altında toplanabileceği Lunne, Robertson ve Powell (1997) tarafından ifade edilmiştir.

Koni faktörü N_k 'nın belirlenmesine yönelik çalışmalar:

Eşitlik 3.9'da verilen ilişkide s_u çekildiği taktirde eşitlik aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir. Literatürde farklı araştırmacılar tarafından CPT deney sonuçları dikkate alınarak yapılan görgül değerlendirmeler sonucunda N_k koni faktörünün farklı ortamlardaki ince taneli zeminler için 5 ile 23 arasında değiştiği belirlenmiş olup, söz konusu bu araştırmacıların çalışmalarına aşağıda kısaca değinilmiştir.

$$s_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_k} \quad (3.10)$$

Burada,

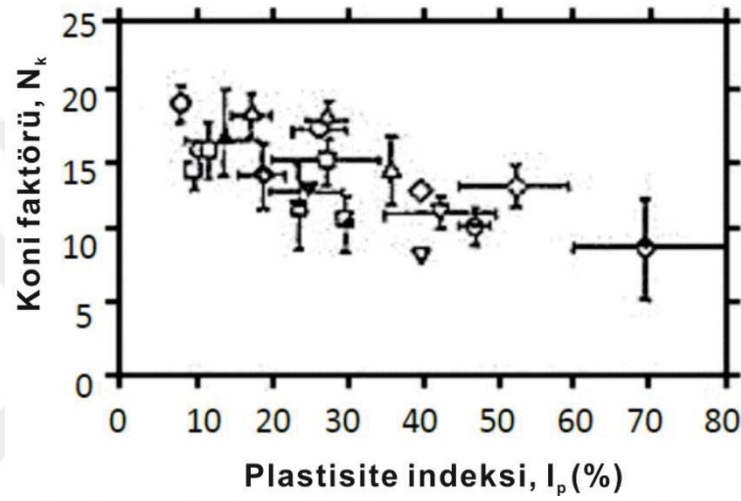
q_c : Toplam koni direnci

σ_{vo} : Ölçüm derinliğindeki toplam örtü yükü

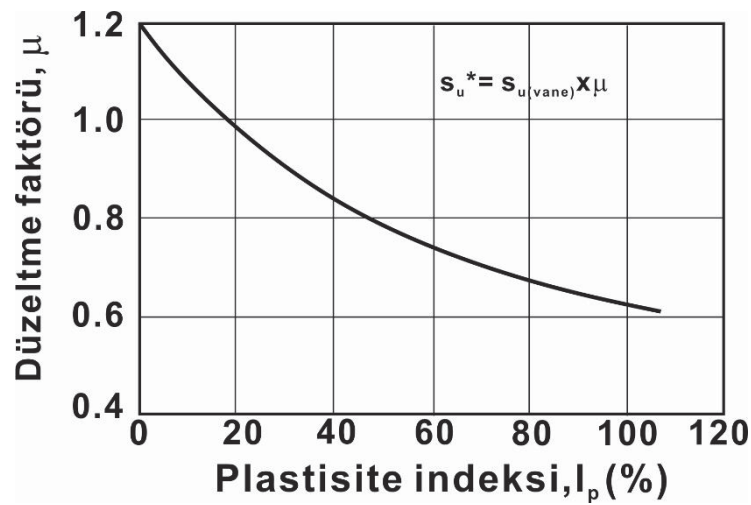
$N_k=N_c$: Koni faktörü

N_k koni faktörünü belirlemeye yönelik ilk çalışma Lunne, Eide ve Ruiter (1976) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, N_k koni faktörünün, İskandinavya'nın yumuşak ve sert özellikteki denizel killeri için 15 ile 19 arasında bir değer aldığını ve artan plastisite indeksi (I_p) ile birlikte artma eğiliminde olduğunu ifade etmişlerdir. Kjekstad, Lunne ve Clausen (1978) ise, N_k 'nın, fisür içermeyen aşırı konsolide Kuzey denizi killeri için 17 değerini aldığını ve likit limit (LL) ile arasında bir ilişki olmadığını belirtmişlerdir.

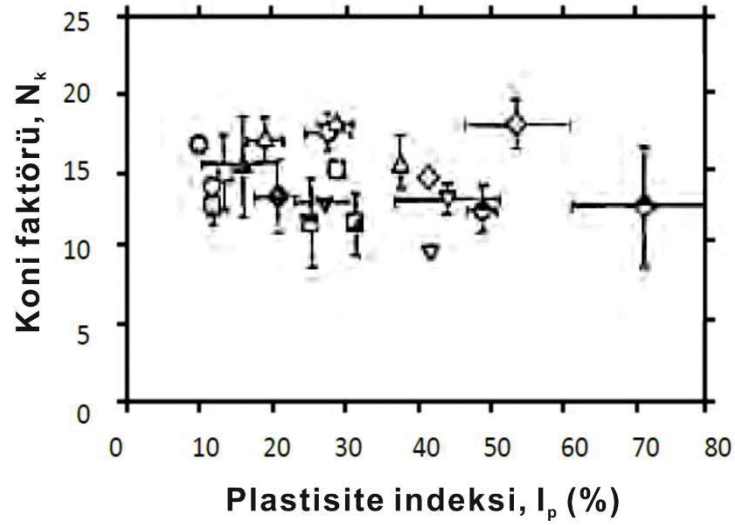
Lunne ve Kleven (1981), normal konsolide Kuzey denizi killerinin drenajsız makaslama dayanım değerlerinin kanatlı kesici deneyi ile belirlendiği bir veri tabanını değerlendirerek N_k 'nın, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi I_p 'nin artışına bağlı olarak düştüğünü belirtmişlerdir. Bununla birlikte araştırmacılar, elde ettikleri s_u değerlerinin Bjerrum (1973)'ün önerdiği grafiğe (Şekil 3.5) göre düzeltilmesi durumunda, N_k verisinin Şekil 3.6'da gösterildiği gibi ortalama 15 değeri etrafında dağıldığı ve I_p 'ye bağlı bir değişim göstermediği sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 3.4. Normal konsolide killer için kanatlı kesici deneyinden belirlenen s_u dikkate alınarak hesaplanmış N_k 'nın I_p 'ye bağlı değişimi (Lunne ve Kleven, 1981).



Şekil 3.5. Kanatlı kesici deneyinden elde edilen s_u değeri için düzeltme katsayısı (μ) belirleme grafiği (Bjerrum, 1973).



Şekil 3.6. Kanatlı kesici deneyinden belirlenen s_u değerlerine düzeltme uygulandıktan sonra hesaplanan N_k 'ların I_p 'ye göre değişimi (Lunne ve Kleven, 1981).

Chen (2001) tarafından, Malezya'nın Klang şehrinde üç farklı sahada gerçekleştirilen CPT ve kanatlı kesici deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Chen (2001) tarafından s_u , I_p ve N_k arasında belirlenen değişim aralıkları

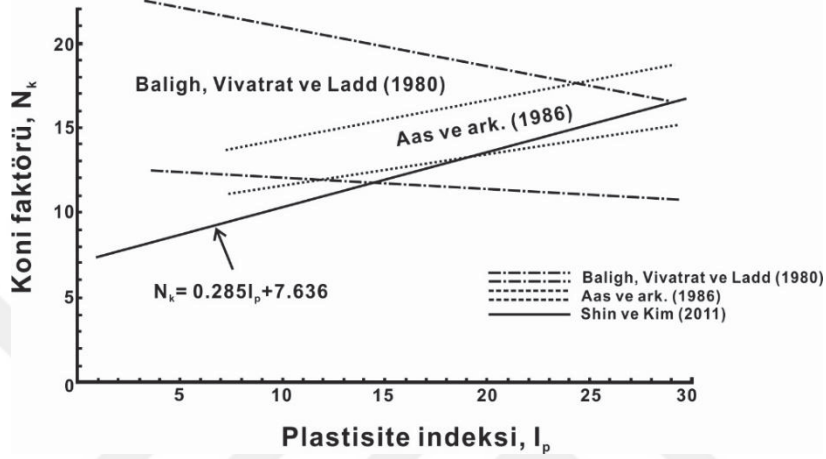
Saha	Derinlik (m)	I_p (%)	s_u (kPa)	N_k
A	5-18	25-50	10-70	7-12
B	4-18	70-90	10-70	6-10
C	1-13	40-60	7-50	5-9

N_k : Koni faktörü I_p : Plastisite İndeksi

Dipova ve Cangir (2005) UU üç eksenli sıkışma deneylerinin sonuçlarına ilişkin değerlendirmelerinde Konyaaltı killeri için N_k için 18.93 değerini önermişlerdir. Shin ve Kim (2011), Hindistan'da killi zeminler için N_k 'nın belirlenmesine yönelik aşağıda verilen eşitliği önermişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca, N_k 'nın 8 ile 13.4 arasında değiştiğini rapor etmişlerdir.

$$N_k = 0.285I_p + 7.636 \quad (R^2 = 0.75) \quad (3.11)$$

Shin ve Kim (2011), N_k 'nin I_p 'nin artmasıyla birlikte arttığını ve elde edilen bu sonucun, Aas ve ark. (1986)'nın elde ettikleri sonuçlarla benzerlik gösterirken, Baligh, Vivatrat ve Ladd (1980) ile Lunne, Eide ve Ruiter (1976)'in sonuçlarıyla çeliştiğini göstermişlerdir (Şekil 3.7). Çizelge 3.11'de yukarıda değinilen araştırmacıların önerdikleri N_k değerleri ve eşitlikleri özetlenerek bir arada sunulmuştur.



Şekil 3.7. I_p ve N_k arasındaki ilişkiler (Shin ve Kim, 2011).

Çizelge 3.11. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen N_k 'nin değişimi.

Araştırmacı(lar)	N_k	s_u için Referans Deneyler	Zemin Türü	Yorumlar/Önerilen İlişkiler
Lunne, Eide ve Ruiter (1976)	15-19	Kanatlı Kesici Deneyi	Normal konsolide denizel killeri (İskandinav ülkeleri)	N_k artan plastisite indeksine bağlı olarak azalıyor
Kjekstad, Lunne ve Clausen (1978)	17	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Fisür içermeyen aşırı konsolide killeri (Kuzey denizi killeri)	N_k ve LL arasında ilişki yok
Lunne ve Kleven (1981)	11 - 19	Kanatlı Kesici Deneyi	Normal konsolide killeri (Kuzey denizi killeri)	N_k ve I_p arasında ilişki yok
Chen (2001)	5 - 12	Kanatlı Kesici Deneyi	Kil (Malezya)	-
Dipova ve Cangir (2005)	18.93	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Lagünel Siltli killi zeminler (Türkiye-Konyaaltı)	N_k artan I_p 'ye bağlı olarak artıyor
Shin ve Kim (2011)	8 - 13.4	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Kil (Hindistan)	$N_k = 0.285I_p + 7.636$ $7.8 < I_p < 20$

N_k : Koni faktörü LL: Likit limit I_p : Plastisite İndeksi

Koni faktörü N_{kt} 'nin belirlenmesine yönelik çalışmalar:

Campanella ve Robertson (1981) tarafından, CPTu cihazlarının kullanımıyla birlikte belirlenebilen boşluk suyu basınçlarının toplam koni direnci (q_c) üzerindeki etkileri dikkate alınarak düzeltilmiş koni direnci (q_t)'nin kullanımının daha gerçekçi sonuçlar vereceği öngörülmüş ve bu nedenle Eşitlik 3.10'daki q_c yerine q_t ve N_k yerine N_{kt} kullanılarak s_u ilişkisi Eşitlik 3.12'deki gibi değiştirilmiştir. Bu gelişme sonrasında N_{kt} 'nin görgül olarak belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

$$N_{kt} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{s_u} \quad (3.12)$$

$$q_t = q_c + u_2(1 - \alpha) \quad (3.13)$$

Burada,

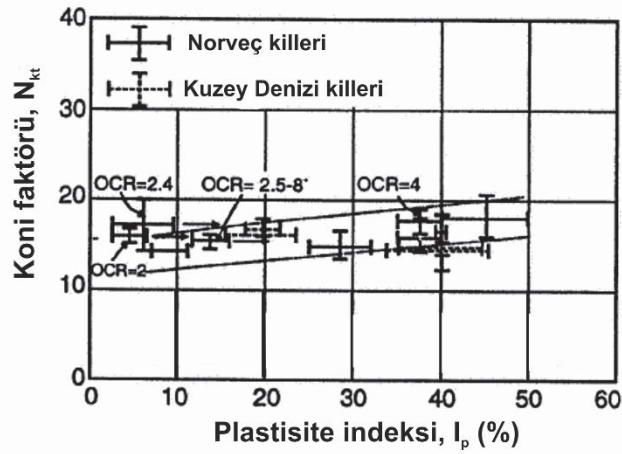
α : Koni alan oranı(0.5 ile 1.0 aralığında bir değer)

u_2 : Konik ucun hemen arkasında ölçülen boşluk suyu basıncıdır.

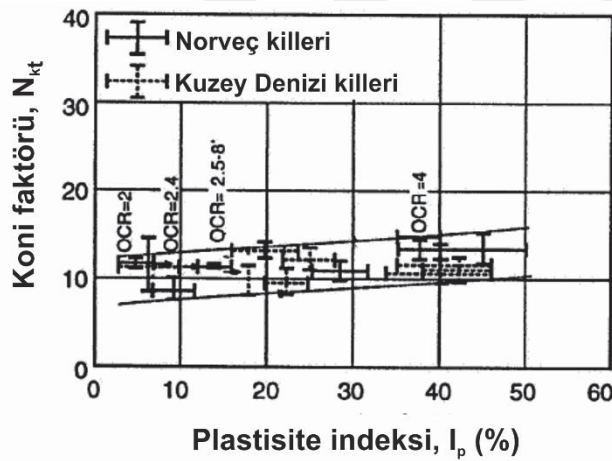
N_{kt} , teorik bir temele dayanan koni faktörü olup, uygulanan zemin türüne göre değişmekle birlikte genel olarak 4 ile 29 aralığında bir değer almaktadır (Konrad ve Law, 1987). N_{kt} 'nin belirlenmesiyle ilgili çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Aas ve ark. (1986), N_{kt} ile I_p arasındaki ilişkiyi araştırmak amacıyla laboratuvarında üç eksenli sıkışma, üç eksenli çekme ve doğrudan makaslama ve kıvamlilik deneyleri gerçekleştirmişler ve belirledikleri s_u 'ların ortalamaları ile CPTu'dan elde ettikleri q_t 'leri esas alarak, I_p 'nin artmasıyla birlikte N_{kt} değerinin arttığını ifade etmişlerdir (Şekil 3.8a). Sadece üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonucundaki veriler ile ilişkilendirme yapıldığında ise, I_p 'nin %3 ile %50 arasındaki değer aralığına karşılık N_{kt} 'nin 8 ile 16 arasında değiştiğini ifade etmişlerdir (Şekil 3.8b).

(a)



(b)



Şekil 3.8. I_p 'ye bağlı N_{kt} değerlerinin değişimi: (a) Üç eksenli sıkışma ve çekme deneyleri ile doğrudan makaslama deneylerinin sonuçları kullanılarak, (b) sadece üç eksenli sıkışma deneyi sonuçları kullanılarak (Aas ve ark. 1986).

Larsson ve Mulabdic (1991), İsveç killerinde yaptıkları doğrudan makaslama dayanımı deneyinden belirledikleri s_u 'ları esas alarak, N_{kt} 'nin belirlenmesine ilişkin Eşitlik 3.14'teki ilişkiyi önermişlerdir. Bu çalışmaların yanı sıra, N_{kt} 'nin belirlenmesi amacıyla 2018 yılına kadar araştırmalar gerçekleştirilmiş olup, bunlar yukarıda değinilenlerle birlikte Çizelge 3.12'de özetlenerek sunulmuştur.

$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL \quad (3.14)$$

Çizelge 3.12. Farklı araştırmacılar tarafından N_{kt} 'nin belirlenmesi için önerilen ilişkiler ve değer aralıkları.

Araştırmacı(lar)	N_{kt} Değerleri	s_u için Referans Deneyler	Zemin Türü	Yorumlar/ Önerilen İlişkiler
Lunne, Christoffersen ve Tjelta (1985)	8-20	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı Konsolide kuzey denizi killeri (Norveç)	N_{kt} ile B_q arasında ters orantılı ilişki mevcut
Aas ve ark. (1986)	8 - 16	Üç Eksenli Sıkışma Dayanım Deneyi	Kil (Norveç)	N_{kt} , artan plastisite indeksine bağlı olarak artıyor
Powell ve Quaternmann (1988)	10 - 20	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Sert -fisürlü denizel Killer ve Buzul çökelleri (İngiltere)	N_{kt} , I_p 'ye bağlı olarak değişmekte fisürlü killerde 10-30 aralığında bir değer
Rad ve Lunne (1988)	8 - 29	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	-	N_{kt} OCR ile birlikte değişiyor
La Rochelle ve ark. (1988)	11 - 18	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Hassas killer (Kanada)	N_{kt} ile I_p arasında ilişki yok
Larsson ve Mulabdic (1991)	-	Doğrudan makaslama Deneyi	Kil (İsveç)	$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL$ OCR<1.3
Karlsrud, Lunne ve Brattlien (1996)	6 - 15	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı konsolide killeri (Norveç)	N_{kt} ile B_q arasında ters orantılı ilişki mevcut
Larsson ve Ahnberg (2005)	-	Doğrudan makaslama Deneyi	Normal - Aşırı konsolide Kil (İsveç)	$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}} \left[\frac{OCR}{1.3} \right]^{-0.2}$ $N_{kt} = 13.4 + 6.65LL$ $OCR = \frac{\sigma^t c}{\sigma^t_{vo}}$ $\sigma^t c = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}(\sigma^t c)}$ $N_{kt}(\sigma^t c) = 1.21 + 4.4LL$
Wei,Pant ve Tumay (2010)	13.9	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Normal konsolide kil (New Orleans)	-
Almeida, Marques ve Baroni (2010)	3 - 16	Kanatlı Kesici Deneyi	Yüksek plastisiteli yumuşak killeri (Brezilya)	-
Remai (2013)	23.3	Üç ve Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Holosen yaşlı Silt ve Kil (Macaristan)	N_{kt} ile I_p arasında ilişki yok
Westerberg, Müller ve Larsson (2015)	20	Doğrudan Makaslama Deneyi	Silt ve Kil (İsveç)	$s_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{20} \left(\frac{OCR}{1.3} \right)^{-0.2}$ OCR: Larsson ve Ahnberg (2005)'in eşitlikleriyle belirlenebilmektedir
Mayne ve Peuchen (2018)	10 – 25	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı ve Normal konsolide killeri (Karasal ve Denizel)	$N_{kt} = 10.5 - 4.6 \ln(B_q + 0.1)$ $B_q > -0.1$

N_{kt} : Koni faktörü LL: Likit limit I_p : Plastisite İndeksi OCR: Aşırı konsolidasyon oranı B_q : Boşluk suyu basıncı
 q_t : Düzeltilmiş konik uç direnci σ_{vo} : Toplam örtü gerilmesi σ^t_{vo} : Efektif örtü gerilmesi $\sigma^t c$: Ön konsolidasyon basıncı

Koni faktörü N_{ke} 'nin belirlenmesine yönelik çalışmalar:

Senneset, Janbu ve Svano (1982), drenajsız makaslama dayanımını belirlemek için efektif koni direnci kavramı (q_e)'nin kullanılmasını önermişlerdir. q_e 'yi belirlemek için CPT sırasında belirlenen q_c ile koni arkasında ölçülen boşluk suyu basıncı (u_2) arasındaki farkın alınması gerektiğini belirten bu araştırmacılar, bu düzeltme sonrasında N_{ke} olarak ifade ettiği koni faktörünün 6-12 arasında bir değer aldığını belirtmişlerdir.

Campenella, Gillespie ve Robertson (1982) ise, CPTu verisini esas alarak, q_e 'nin düzeltilmiş koni direnci (q_t) kullanılarak belirlenmesi gerektiğini ve s_u eşitliğini aşağıdaki gibi modifiye etmişlerdir. Literatürde, N_{ke} 'yi temel alarak yapılan görgül değerlendirmelerin sonuçları Çizelge 3.13'te verilmiştir.

$$s_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{(q_t - u_2)}{N_{ke}} \quad (3.15)$$

Çizelge 3.13. Farklı araştırmacılar tarafından N_{ke} için önerilen değer aralıkları.

Araştırmacı(lar)	N_{ke} Değerleri	Su için Referans Deneyler	Zemin Türü	Yorumlar/ Önerilen ilişkiler
Senneset, Janbu ve Svano (1982)	6 - 12	-	Kil $3 < I_p < 50$	-
Lunne, Christoffersen ve Tjelta (1985)	1 - 13	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı Konsolide Kuzey Denizi killeri (Norveç)	N_{ke} değeri B_q 'ya bağlı olarak değişiyor
Karlsrud, Lunne ve Brattlien (1996)	2 - 10	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı konsolide killeri (Norveç)	N_{ke} ile B_q arasında ters orantılı ilişki mevcut
Remai (2013)	18.3	Üç ve Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Holosen yaşlı Silt ve Kil (Macaristan)	-

N_{ke} : Koni faktörü I_p : Plastisite İndeksi B_q : Boşluk suyu basıncı oranı

Koni faktörü $N_{\Delta u}$ 'nun belirlenmesine yönelik çalışmalar:

Boşluk genişleme kuramını temel alan, teorik ve yarı teorik yaklaşımlarla s_u ile Δu arasında birçok ilişki önerilmiş olup (Vesic, 1972; Battaglio ve ark., 1981; Randolph ve Wroth, 1979; Massarch ve Broms, 1981; Campanella ve ark., 1985), bu ilişkilerin Eşitlik 3.16'da verilen şekle uygun olduğu belirtilmektedir (Lunne, Robertson ve Powell, 1997).

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (3.16)$$

$$\Delta u = u_2 - u_0$$

Burada,

Δu : Aşırı boşluk suyu basıncı

u_0 : Statik boşluk suyu basıncı

$N_{\Delta u}$: Boşluk suyu basıncına göre tanımlı koni faktörü

Lunne, Robertson ve Powell (1997), q_t ve u_2 ölçümlerinde meydana gelen hataların düşük q_e değerlerine sebep olması nedeniyle, aşırı konsolide ve yumuşak normal konsolide killerde s_u 'nun tahmini için efektif koni direncinin kullanılmamasını ve bu tip zeminlerde s_u 'nun aşırı boşluk suyu basıncı (Δu)'ndan kestiriminin daha doğru sonuçlar verebileceğini ifade etmişlerdir.

Bazı araştırmacıların $N_{\Delta u}$ için önerdikleri değer aralıkları Çizelge 3.14'te verilmiştir. Bunlara ek olarak Remai (2013), Macaristan'da sitli ve killi zeminlerden aldığı örnekler üzerindeki çalışmaları sonucunda Eşitlik 3.17'de verilen ilişkiyi önermiştir.

$$N_{\Delta u} = 24.3B_q \quad (R^2 = 0.81) \quad (3.17)$$

B_q : Boşluk suyu basıncı oranı (bkz. Eş 2.13)

Çizelge 3.14. Farklı araştırmacılar tarafından $N_{\Delta u}$ için önerilen değer aralıkları ve ilişkiler.

Araştırmacı(lar)	$N_{\Delta u}$ Değerleri	s_u için Referans Deneyler	Zemin Türü	Yorumlar/ Önerilen ilişkiler
Lunne, Christoffersen ve Tjeltha (1985)	4 - 10	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı Konsolide kuzey denizi killeri (Norveç)	$N_{\Delta u}$ ile B_q arasında iyi bir korelasyon mevcut
La Rochelle ve ark. (1988)	7 - 9	Kanatlı Kesici Deneyi	Hassas killeri (Kanada)	$1.2 < OCR < 50$
Karlsrud, Lunne ve Brattlien (1996)	6 - 8	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Aşırı konsolide killeri (Norveç)	$N_{\Delta u}$ ile B_q arasında doğru orantılı ilişki mevcut
Wei, Pant ve Tümay (2010)	8.6	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Normal konsolide kil (New Orleans-Amerika)	-.
Remai (2013)	6.3	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Holosen yaşlı Silt ve Kil (Macaristan)	$N_{\Delta u} = 24.3B_q$

$N_{\Delta u}$: Koni faktörü OCR: Aşırı konsolidasyon oranı B_q : Boşluk suyu basıncı oranı

Yukarıdaki paragraflarda gerek CPT deney düzeneği, gerekse parametre kullanımı dikkate alınarak önerilmiş farklı koni faktörlerinin (N_k , N_{kt} , N_{ke} , $N_{\Delta u}$) görgül yaklaşımlarla kestirimine yönelik önceki çalışmalara ayrı ayrı değinilmiştir. Bununla birlikte, literatürdeki bazı çalışmalarda bu faktörlerin tamamı birlikte değerlendirilmiş olup, bu çalışmalardaki bulgulara aşağıdaki paragraflarda ayrıca yer verilmesi tercih edilmiştir.

Karlsrud ve ark. (2005), Norveç'te 17 farklı bölgede yumuşak ve orta sertlikteki denizel killerden alınmış örnekler üzerinde uyguladıkları üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleriyle elde ettikleri s_u 'ları referans alarak, literatürde önerilen koni faktörlerine ilişkin değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Araştırmacılar, koni faktörlerinin (N_{kt} , N_{ke} , $N_{\Delta u}$), aşırı konsolidasyon oranı (OCR), duyarlılık (S_t), boşluk suyu basıncı oranı (B_q) ve plastisite indeksi (I_p)'nden önemli ölçüde etkilendiğini ifade ederek, Eşitlik 3.18 ile 3.28 arasında verilen ilişkileri önermişlerdir. Araştırmacılar, zeminlerin duyarlılık değerlerini düşen koni deneyiyle belirlediklerini ifade etmişlerdir.

$S_t < 15$ için:

$$N_{kt} = 7.8 + 2.5 \log(\text{OCR}) + 0.082I_p \quad (3.18)$$

$$N_{\Delta u} = 6.9 - 4.0 \log(\text{OCR}) + 0.07I_p \quad (3.19)$$

$$N_{ke} = 11.5 - 9.05B_q \quad (3.20)$$

$$B_q = 0.88 - 0.51 \log(\text{OCR}) \quad (3.21)$$

$$\text{OCR} = \left(\frac{Q_t}{3}\right)^{1.2} \quad (3.22)$$

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad (3.23)$$

$S_t > 15$ için:

$$N_{kt} = 8.5 + 2.5 \log(\text{OCR}) \quad (3.24)$$

$$N_{\Delta u} = 9.8 - 4.5 \log(\text{OCR}) \quad (3.25)$$

$$N_{ke} = 12.5 - 11.0B_q \quad (3.26)$$

$$B_q = 1.15 - 0.67 \log(\text{OCR}) \quad (3.27)$$

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad (3.28)$$

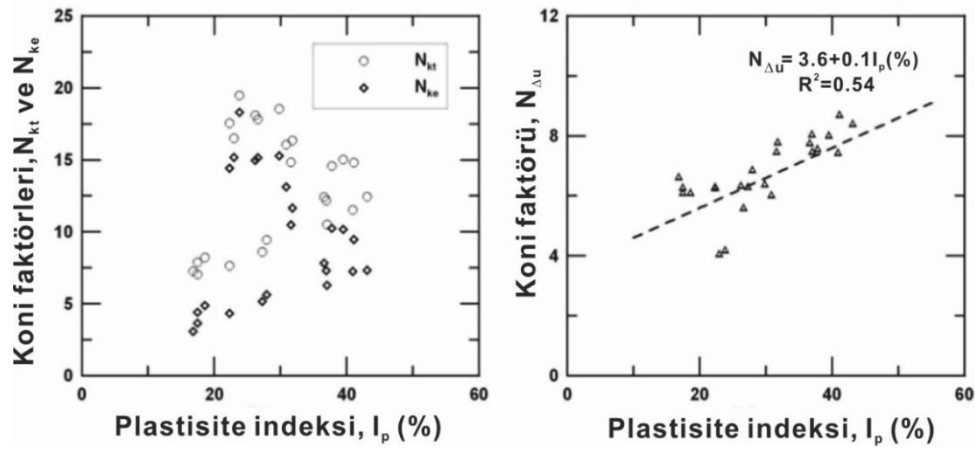
Hong ve ark. (2010), Güney Kore'nin Busan şehrinde killi zeminlerde gerçekleştirilen CPTu ve ilgili seviyelerden alınan örnekler üzerindeki UU üç eksenli sıkışma deneyleri neticesinde koni faktörü N_{kt} 'nin 7-20, N_{ke} 'nin 3-18 ve $N_{\Delta u}$ 'nun 4-9 aralığında bir değer aldığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, koni faktörlerinin I_p ve B_q ile olan ilişkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu araştırmacıların elde ettikleri ilişkiler Eşitlik 3.29 - 3.32 arasında sunulmuş olup, bu eşitliklere ait grafikler Şekil 3.9 ve 3.10'da verilmiştir.

$$N_{kt} = 24 - 19B_q \quad (3.29)$$

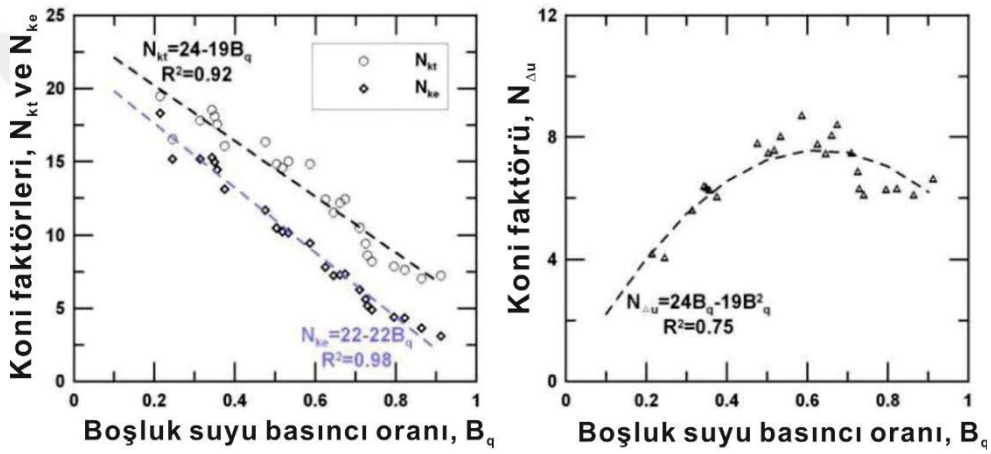
$$N_{ke} = 22 - 22B_q \quad (3.30)$$

$$N_{\Delta u} = 3.6 + 0.1I_p(\%) \quad (3.31)$$

$$N_{\Delta u} = 24B_q - 19B_q^2 \quad (3.32)$$



Şekil 3.9. Koni faktörleri ve plastisite indeksi arasındaki ilişkiler (Hong ve ark., 2010).

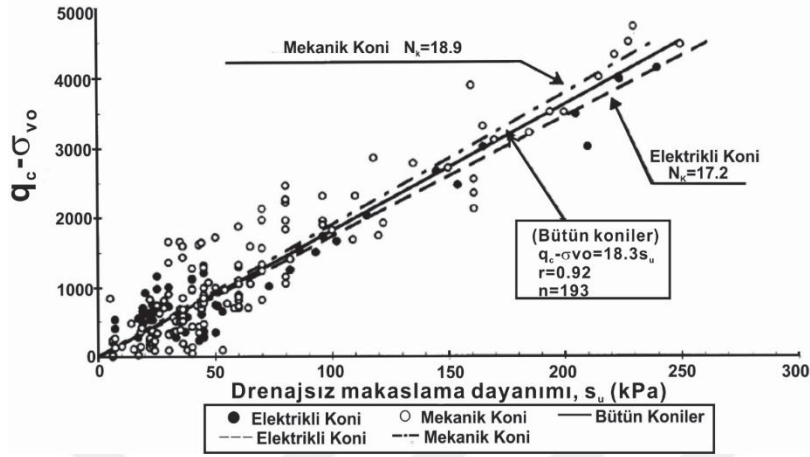


Şekil 3.10. Koni faktörleri ve boşluk suyu basıncı oranı arasındaki ilişkiler (Hong ve ark., 2010).

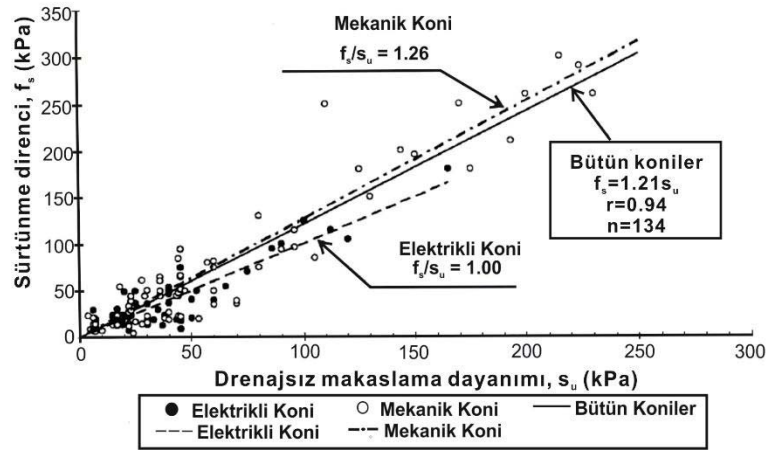
Yukarıdaki paragraflarda özetlendiği gibi, literatürde CPT/CPTu ile s_u arasındaki ilişkilerin görgül yaklaşımlarla araştırıldığı çalışmalar, genel olarak koni faktörlerinin belirlenmesine yönelik olmuştur. Bununla birlikte, Anagnostopoulos ve ark. (2003), doğrudan CPT parametreleri ile s_u değerleri arasındaki görgül ilişkileri araştırmıştır. Bu kapsamda; araştırmacılar Yunanistan'da killi zeminlere ait örnekler üzerinde gerçekleştirdikleri UU üç eksenli deneyler ile elde ettikleri s_u 'ları esas alarak, N_k koni faktörünü elektronik CPT'ler için 17.2, mekanik CPT'ler için ise, 18.9 gibi sabit değerler önermiş olup, bu değerlere ait grafik Şekil 3.11'de verilmiştir. Ayrıca bu araştırmacılar, mekanik ve elektronik CPT sistemleri için sürtünme direnci (f_s)'ne bağlı olarak zeminin drenajsız makaslama dayanımı (s_u)'nın tahmini için Eşitlik 3.33 ve 3.34'teki ilişkileri önermiş ve Şekil 3.12'deki grafiği sunmuşlardır.

$$s_u = \frac{f_s}{1.26} \quad (\text{Mekanik CPT için}) \quad (3.33)$$

$$s_u = f_s \quad (\text{Elektronik CPT için}) \quad (3.34)$$



Şekil 3.11. Kohezyonlu zeminlerde q_c ve s_u arasındaki ilişki (Anagnostopoulos ve ark., 2003).



Şekil 3.12. Kohezyonlu zeminlerde koni tiplerine göre f_s ve s_u arasındaki ilişki (Anagnostopoulos ve ark., 2003).

4. SPT VE CPT VERİSİNİN DERLENMESİ

Tez çalışmasının amaç ve kapsamı doğrultusunda SPT, CPT ve makaslama dayanımı verilerinin temini için, özel bir firmanın veri tabanından yararlanılmıştır. İlgili firma tarafından Türkiye’de iki farklı lokasyonda gerçekleştirilen toplam 745 m uzunluğunda 36 adet SPT kuyusu, iki farklı lokasyonda gerçekleştirilen 780 m uzunluğunda 17 adet CPT kuyusu ve 845 m uzunluğunda 17 adet sondaj kuyusundan elde edilen veri taranarak, SPT-N - s_u ve CPT parametreleri - s_u çiftleri ile bazı diğer indeks özelliklerin mevcut olduğu killi zemin seviyeleri ayırtlanmıştır. Söz konusu parametre çiftlerinin oluşturulmasında aşağıda değinilen yaklaşımlar izlenmiştir.

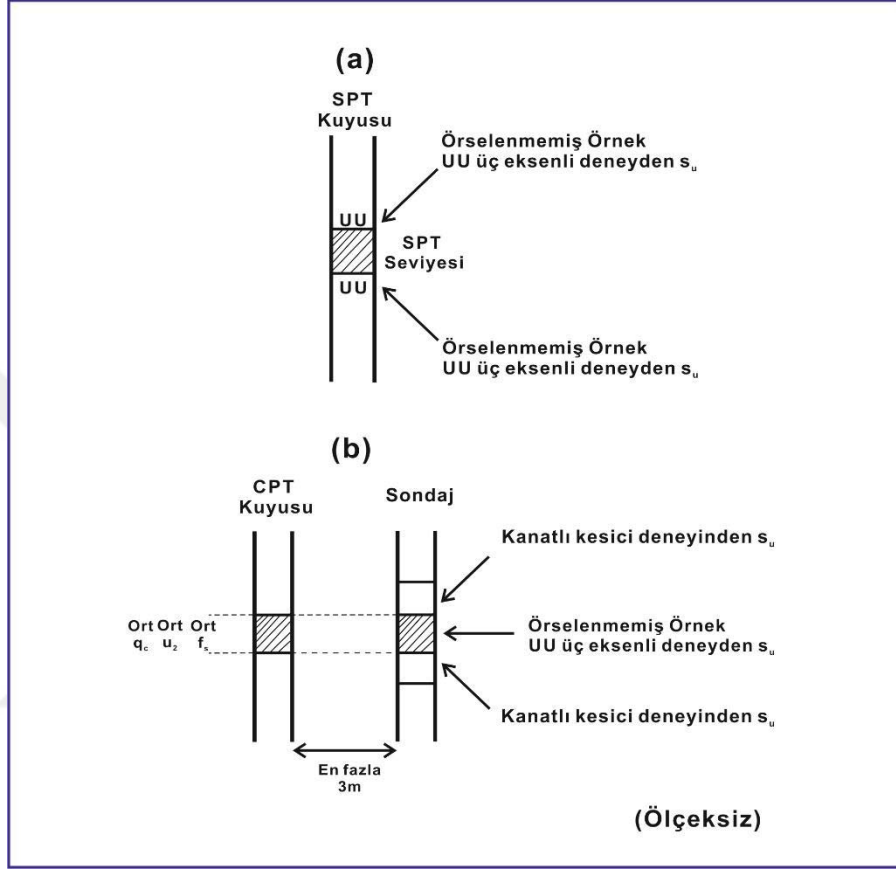
(a) SPT-N – s_u çiftlerinin oluşturulması:

Veri tabanında SPT kuyularının yanında ayrıca bir sondajın yapıldığı uygulamaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, deney seviyesine karşılık gelen s_u verileri, tam olarak SPT’nin yapıldığı seviyedeki killi zemin yerine deney seviyesinin hemen altında ya da üstündeki aynı birimden alınan örselenmemiş örneklerdeki UU üç eksenli deneylerden belirlenen değerlerdir (Şekil 4.1a).

(b) CPT parametreleri – s_u çiftlerinin oluşturulması:

SPT-CPT verilerinin karşılaştırılması amacıyla literatürde yapılan çalışmalarda iki sondaj kuyusu arasında 1 ile 5 m arasındaki kuyuların verisinden yararlanıldığı görülmektedir (Robertson, Campanella ve Wightman, 1983; Kulhawy ve Mayne, 1990; Tuncay ve Ulusay, 2007; Hong ve ark., 2010;). Tez çalışması kapsamında ise, bu mesafe biraz daha azaltılarak, öncelikle, CPT kuyusuna uzaklığı 1 ile 3 m olan sondaj kuyuları belirlenmiştir. Bu durumda olan CPT ve sondaj kuyularındaki veri dikkate alınarak CPT parametreleri – s_u çiftleri oluşturulmuştur. s_u değerleri, kanatlı kesici deneyleriyle ya da alınan örselenmemiş örneklerde yapılan UU üç eksenli sıkışma deneylerinden belirlenmiş olup, veri tabanında kanatlı kesici deneyleriyle örselenmemiş örnek alım seviyelerinin aynı özellikteki killi birimde ardışık konumda (kanatlı kesici deneyi, örnek alınan seviyenin altında ya da

üstünde) oldukları görülmüştür. Bu nedenle, örselenmemiş örneklerin alındığı derinlik aralığında CPT’de ölçülen parametrelerin ortalama değerleri UU’dan belirlenen s_u ’larla çiftleştirilmiş (Şekil 4.1b), ayrıca bu ortalama değerlerin kanatlı kesici deneyinden elde edilen s_u ’larla da ilişkilendirilebileceği düşünülmüştür.

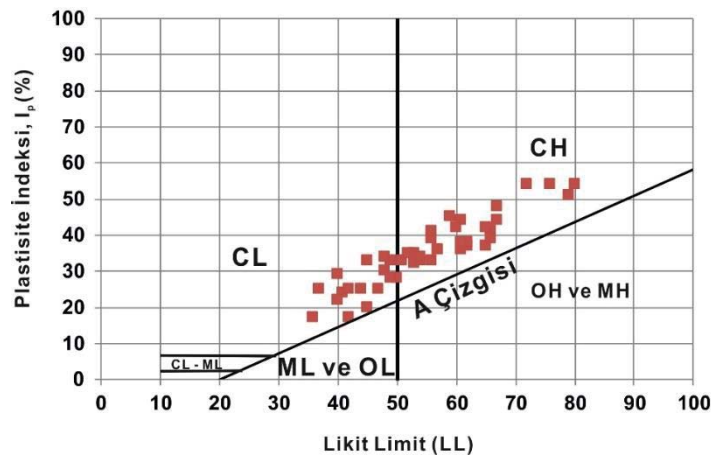


Şekil 4.1. (a) SPT-N - s_u ve (b) CPT parametreleri - s_u çiftlerinin oluşturulmasında izlenen yöntem.

Söz konusu veri çiftlerinin yanı sıra, ilgili killi zeminlerde belirlenmiş bazı fiziksel özellikler de derlenmiştir. Derlenen veriye ilişkin daha ayrıntılı bilgiler aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

4.1. SPT Veri Tabanı

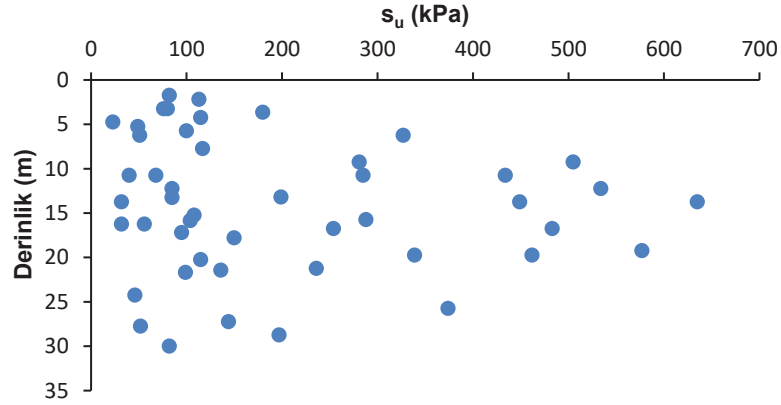
Veri tabanında değerlendirilen birinci lokasyona ait SPT'lerin 122.6 mm çaptaki kuyularda yapıldığı, deneylerde standart örnekleyicinin ve ASTM D1586 no'lu standarda (ASTM, 2000) uygun olarak % 60 enerji verimi olan otomatik şahmerdanın kullanıldığı, ikinci lokasyona ait SPT'lerin ise, 89 mm çaptaki kuyularda yapıldığı, standart örnekleyicinin ve % 45 enerji verimi olan halatlı (donut) şahmerdanın kullanıldığı tespit edilmiştir. Birinci lokasyonda Holosen - Neojen yaşlı çökeller, ikinci lokasyonda ise sığ derinliklerde alüvyon ve alüvyon birimlerin alt seviyelerinde Neojen yaşlı sert-katı killer bulunmaktadır. Toplam olarak 36 SPT kuyusundan ayıklanan killi zeminler için Şekil 4.1a'da gösterilen yaklaşım izlenerek toplam 47 adet SPT-N - s_u veri çifti oluşturulmuştur. Aynı seviyeler için belirlenen bazı fiziksel ve indeks özellikler de derlenerek tüm veri EK 1a'da sunulmuştur. Derlenen verideki ince tane oranlarının tamamının %50'den yüksek olması nedeniyle, Atterberg limitleri Şekil 4.2'de verilen plastisite abağı üzerine işlenmiş ve zemin örneklerinin 16 adedinin düşük plastisiteli kil (CL), 31 adedinin ise yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (bkz. EK 1a). EK 1a'da sunulan parametrelerin değişim aralıkları zemin sınıfına bağlı olarak Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca, SPT-N, N_{60} (Eş. 2.1 ile hesaplanmış) ve s_u değerlerinin derinlikle değişimleri Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'teki grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, ilgili parametrelere ait verinin derinliğe bağlı olarak (yaklaşık 30m derinliğe kadar) herhangi bir eğilime sahip olmayıp gelişigüzel dağıldığı anlaşılmaktadır.



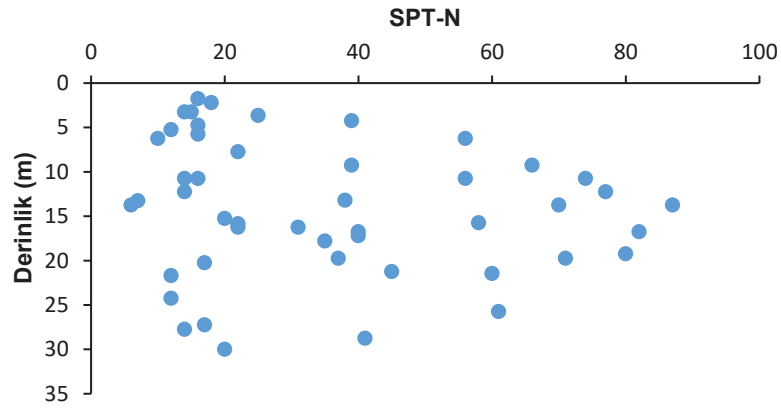
Şekil 4.2. SPT'nin uygulandığı zemin örneklerinin plastisite abağındaki (Wagner, 1957) konumları.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan SPT verisine ait genel bilgiler.

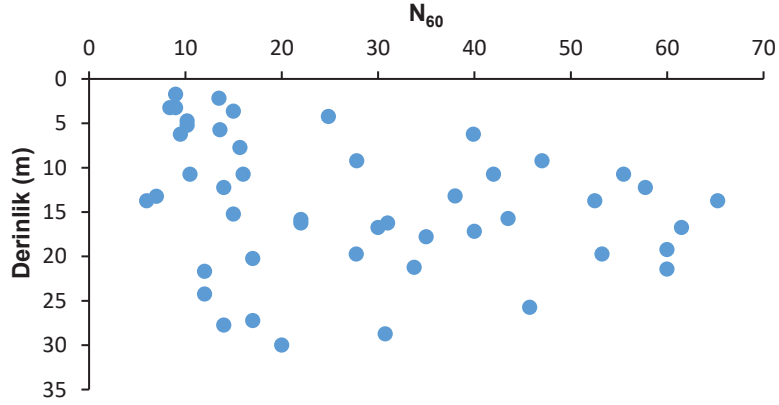
Zemin Sınıfı	Veri Sayısı (n)	İnce Tane Oranı (İTO)	Likit Limit (LL)	Plastik Limit (PL)	Plastisite İndeksi (I _p) (%)	Su İçeriği (w _n) (%)	Birim Hacim Ağırlık γ (kN/m ³)	N	N ₆₀	s _u (kPa)
CH	31	60-100	50-80	14-28	28-54	17-46	17.5- 20.4	6-82	6-61	32-505
CL	16	53-94	36-49	11-25	17-34	15-30	18.12-22.1	12-87	9.65	23-635



Şekil 4.3. s_u değerlerinin derinlikle değişimi.



Şekil 4.4. SPT-N darbe sayısının derinliğe göre değişimi.

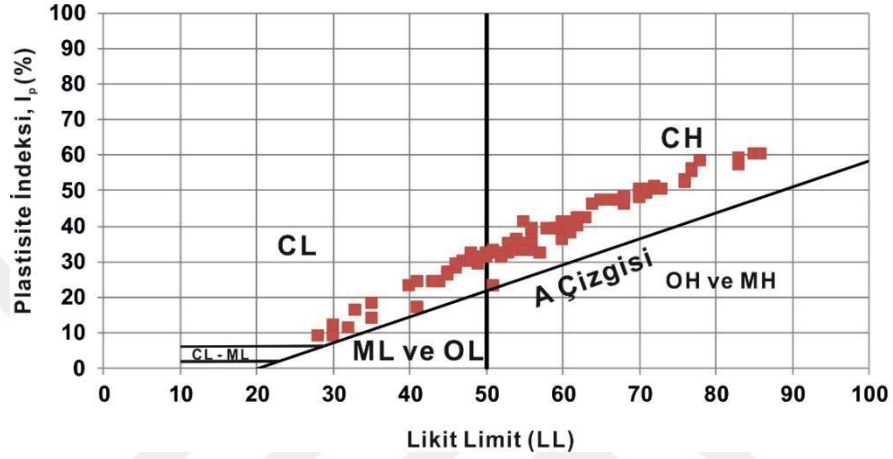


Şekil 4.5. Enerji düzeltmesi yapılmış N_{60} darbe sayılarının derinliğe göre değişimi.

4.2. CPT Veri Tabanı

Şekil 4.1b'deki yaklaşım esas alınarak, iki ayrı lokasyondaki 17 CPT kuyusunun yanında açılan sondajlardan ayıklanan killi zeminler için toplamda 100 adet CPT parametreleri - s_u veri çiftleri oluşturulmuştur (EK 1b). Ek 1b'deki 1ile 13 no'lar arasındaki CPT kuyularına ait veriler, Erken Holosen yaşlı ve Neojen yaşlı çökellerden oluşmaktadır. Ancak, 13 ile 17'nolu CPT kuyularındaki verilere ilişkin bilgi orijinal kaynakta bulunmadığından dolayı bu kuyulardan derlenen veri için yaş bilgisi sunulamamıştır. Verinin derlenmesi sırasında bazı CPT lokasyonlarında kuyu sonlarında konik uç dirençlerinin aşırı miktarda arttığı görülmüştür. Her ne kadar sondajlardaki bu seviyeler kil olarak tanımlanmış olsa da, verinin kuyu sonunda olması ve çok yüksek q_c değerlerinin ölçülmesi nedeniyle zemin – kaya geçiş ortamını temsil edebileceği düşüncesiyle bu seviyelerdeki veri dikkate alınmamıştır (bkz. EK 1b: CPT-6 (71.9 m), CPT-7 (68.9 m - 71.5 m), CPT-10 (43.3 m) ve CPT-17 (17.3 m)). Bu veri tabanındaki s_u değerleri, yukarıda değinilen ayıklama yapıldıktan sonraki toplam 95 kil seviyesinin 55'inde sadece UU üç eksenli deneylerden, 32'sinde hem kanatlı kesici hem de UU üç eksenli deneylerden, 8'inde ise sadece kanatlı kesici deneylerinden belirlenmiştir. Aynı seviyeler için belirlenen bazı fiziksel ve indeks özellikler de veri tabanına katılmıştır (bkz. EK 1b). Bu veri tabanında bazı kil seviyeleri için (25 veri çifti için) Atterberg limitlerinin belirlenmediği görülmektedir. Atterberg limitleri bilinen seviyeler için ince tane oranlarının tamamının %50'den yüksek olması nedeniyle, Atterberg limitleri Şekil 4.6'da verilen plastisite abağı üzerine işlenmiş ve zemin örneklerinin 20 adedinin düşük plastisiteli

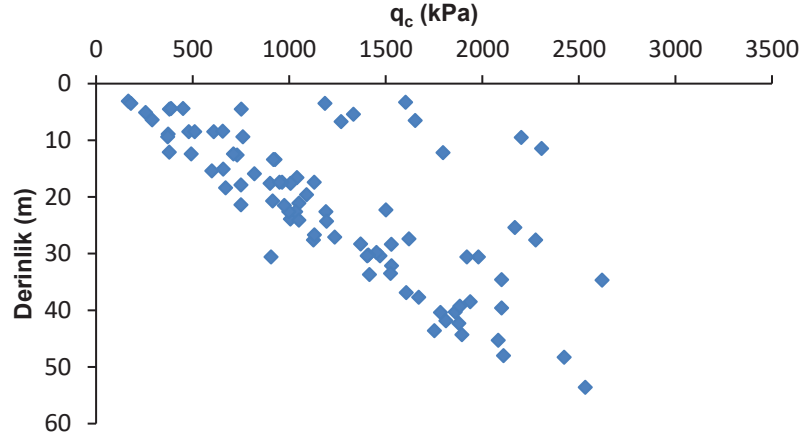
kil (CL), 50 adedinin ise yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (bkz. EK 1b). EK 1b'de sunulan parametrelerin değişim aralıkları zemin sınıfına bağlı olarak Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca, CPT parametreleri ve s_u değerlerinin derinlikle değişimleri Şekil 4.7 ile 4.11 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, ilgili parametrelere ait verinin derinliğe bağlı olarak (yaklaşık 55m derinliğe kadar) artış gösterdiği anlaşılmaktadır.



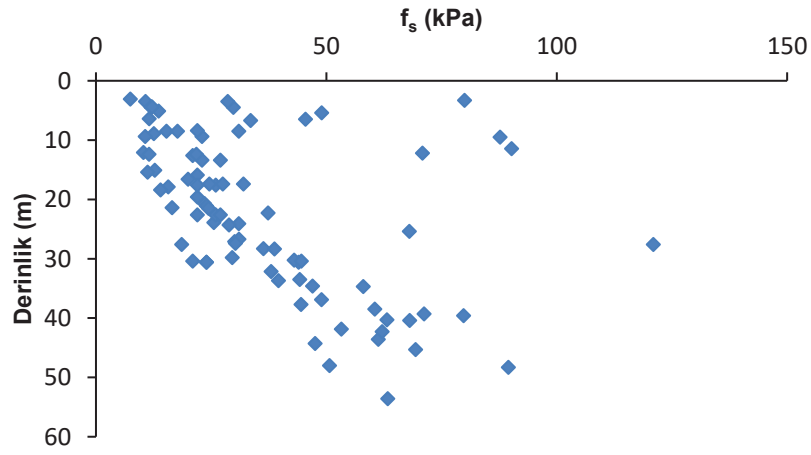
Şekil 4.6. CPT'nin uygulandığı zeminlerin plastisite abağındaki konumları.

Çizelge 4.2. CPT parametreleri ve bazı zemin özelliklerinin değişim aralıkları.

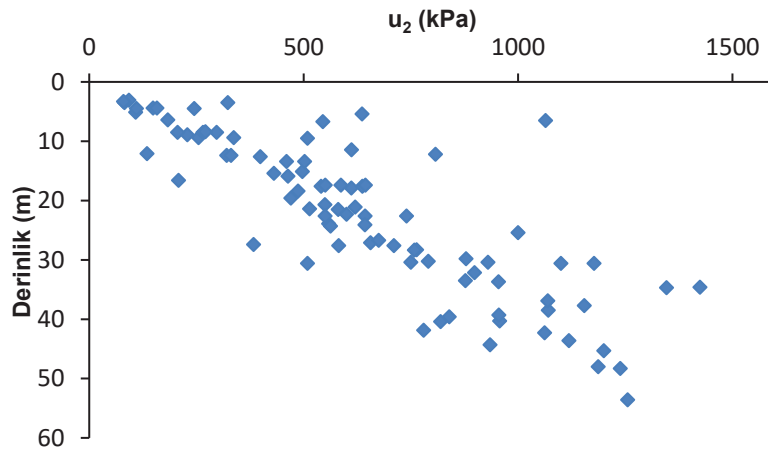
Zemin Sınıfı	Veri Sayısı (n)	Konik uç direnci (q_c) (MPa)	Sürtünme direnci (f_s) (MPa)	Boşluk suyu basıncı (u_2) (MPa)	s_u (kPa) (UU)	s_u (kPa) (Vane)	Likit Limit (LL)	Plastik Limit (PL)	Plastisite İndeksi (I_p) (%)	İnce Tane Oranı (i_{TO})	Su içeriği (w_n) (%)	Birim Hacim Ağırlık (γ) (KN/m ³)
CH	50	0.17-2.62	0.0075-0.12	0.08-1.26	13-154	13-123	50-85	14-60	23-60	52-100	20-38	17.2-19.9
CL	20	0.52-2.17	0.01-0.068	0.21-1.4	28-182	35-51	28-49	16-21	9-32	56-90	18-50	16.8-21.8
Kil (Sınıf belli değil)	25	0.256-2.11	0.001-0.08	0.07-1.18	16-94.5	9-38	-	-	-	-	28-55	16.8-19.7



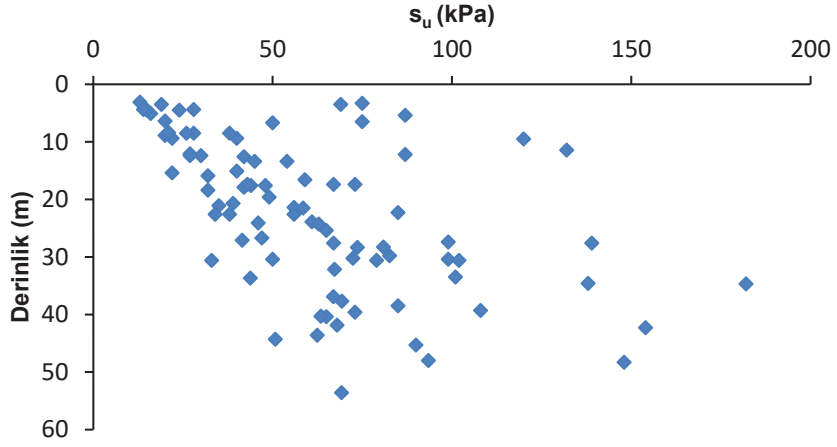
Şekil 4.7. Konik uç direnci (q_c)'nin derinliğe göre değişimi.



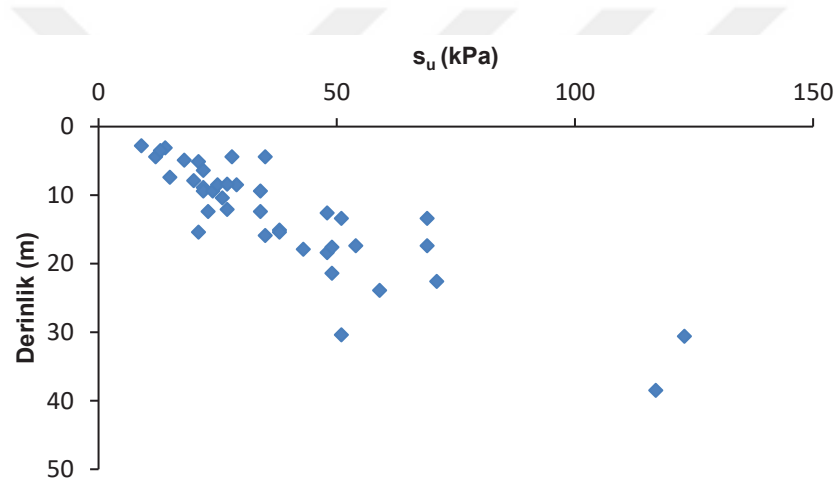
Şekil 4.8. Sürtünme direnci (f_s)'nin derinliğe göre değişimi.



Şekil 4.9. Koni arkasındaki boşluk suyu basıncı (u_2)'nin derinliğe göre değişimi.



Şekil 4.10. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen drenajsız makaslama dayanımı değerlerinin derinliğe göre değişimleri.



Şekil 4.11. Kanatlı kesici deneylerinden elde edilen drenajsız makaslama dayanımı değerlerinin derinliğe göre değişimleri.

5. LİTERATÜRDE ÖNERİLEN İLİŞKİLERİN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışmasının amacı doğrultusunda bu bölümde, SPT ve CPT verilerinden killerin drenajsız makaslama dayanımının tahminine yönelik literatürde önerilen ilişkilerin performanslarının belirlenmesi için değerlendirmeler yapılmıştır. Bu kapsamda, 4. Bölüm'de sunulan veri tabanı esas alınarak, 3. Bölüm'de değinilen s_u eşitlikleriyle tahmin edilen s_u 'lar ile deneylerle belirlenen s_u 'lar karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmeler ve elde edilen bulgular, aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

5.1. SPT Verisini Esas Alan Yöntemler

Literatürde önerilen s_u belirleme eşitliklerinin performanslarının değerlendirilmesi amacıyla, EK 1a'daki veri tabanı kullanılarak SPT-N ve N_{60} sayılarından Çizelge 3.8'deki görgül ilişkilerle s_u değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 3.8'den de görülebileceği gibi, bazı eşitliklerde girdi olan N_{60} sayıları farklı araştırmacılar tarafından farklı şekilde hesaplanmaktadır. Örneğin; bazı ilişkilerdeki N_{60} hesabında tij uzunluğu, iç gömlek ve kuyu çapı gibi düzeltmeler yapılırken, bazılarında sadece enerji düzeltilmesi yapıldığı görülmektedir. Bu nedenle, bu eşitliklerden s_u değerlerinin tahmini sırasında, ilişkiyi öneren araştırmacıların N_{60} hesaplama biçimlerine sadık kalınmıştır. Tahmin edilen bu s_u 'ların ($s_{u(tahmin)}$) laboratuvar deneylerinden belirlenenlerle ($s_{u(ölçülen)}$) karşılaştırılması amacıyla hazırlanan grafikler EK 2a'da kronolojik sırayla sunulmuştur. EK 2a incelendiğinde, literatürde önerilen eşitliklerin her biri için, aşağıda ayrıntılı olarak sunulan değerlendirmeleri yapmak mümkündür.

Terzaghi ve Peck (1967)'in ince taneli zeminler için önerdikleri ilişkiden tahmin edilen s_u değerlerinin genellikle 1:1 çizgisiyle uyumlu olduğu, bazı değerlerin 2:1 çizgisi altında dağıldığı, Sanglerat (1972)'in killeri için önerdiği ilişkiden belirlenenlerin ise 2:1 çizgisi ve altında yoğunlaştığı görülmüştür. Dolayısıyla, Sanglerat (1972) tarafından önerilen ilişkiden belirlenen s_u 'lardaki fark daha fazla olmak üzere, bu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u 'ların ölçülen s_u 'lardan bir miktar

daha büyük olacağı anlaşılmaktadır. Stroud (1974)'un önerisinden elde edilen sonuçların Sanglerat (1972)'a kıyasla daha iyi, Terzaghi ve Peck (1967)'e oranla ise nispeten daha tutucu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte, genel olarak verinin 1:1 ve 1:2 sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. Hara ve ark. (1974), Sowers (1979) (yüksek plastisiteli killler için), Nixon (1982) ve Decourt (1990)'un önerilerinin birbirine benzer sonuçlar verdiği ve verinin 2:1 çizgisi ve bunun altında yoğunlaştığı görülmektedir. Dolayısıyla, bu araştırmacıların önerilerinden olması gerekenden çok daha büyük s_u 'ların tahmin edildiği söylenebilir. Sowers (1979)'ın düşük plastisiteli (CL) killler için önerdiği ilişkiyle belirlenen verinin ise, 1:2 çizgisi ile uyumlu olduğu görülmekte ve bu ilişki aracılığıyla tahmin edilen s_u 'ların ölçülen s_u 'lara kıyasla daha düşük değerler verdiği anlaşılmaktadır.

İyisan ve Ansal (1990)'ın önerisinden belirlenen verinin, Stroud (1974)'un önerisinden belirlenenlere benzer şekilde, 1:1 ile 1:2 çizgisi arasında dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Sivrikaya ve Toğrol (2002) tarafından SPT-N ve N_{60} sayıları ile önerilen ilişkilerden elde edilen s_u tahminlerinin ise, birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, düşük plastisiteli killler (CL) haricinde diğer zemin grupları için belirlenen s_u verileri 1:1 çizgisiyle uyumlu olup, genellikle 1:1 ve 1:2 çizgileri arasında dağılım göstermektedir. Sivrikaya ve Toğrol (2006), 2002 yılındaki çalışmalarında kullandıkları UCS deneyinden belirlenmiş s_u veri tabanına ek olarak UU üç eksenli ve kanatlı kesici deneylerinden belirlenenleri de eklemişler ve gerek her bir deney sonucunu gerekse tüm deneylerden belirlenen s_u 'ların ortalamasını dikkate alarak ayrı ayrı s_u tahmin ilişkileri önermişlerdir (bkz. Çizelge 3.8). Her bir deney verisi için belirlenen s_u tahmin eşitliklerindeki katsayıların birbirine yakın olması nedeniyle, sadece ortalama değerler dikkate alınarak oluşturulan eşitliklerin performansı araştırılmıştır (EK 2a). Bu ilişkilere göre belirlenen verilerin 1:2, 1:1 ve 2:1 çizgilerindeki dağılımları, araştırmacıların 2002 yılındaki çalışmalarından elde edilenlere oldukça benzerdir.

Bölüm 3'te de değinildiği gibi, Kalantary, Ardalani ve Nariman-Zadeh (2008) çalışmalarında $I_p < 20$ olan zeminler için etkin gerilmenin değişimine bağlı olarak ve N_{60} 'ın yanı sıra I_p 'nin de bir girdi parametresi olduğu ilişkiler önermişlerdir. EK 2a'daki ilgili grafikten görüldüğü üzere, veri tabanındaki I_p değerleri 20'nin altında olan zeminler ile tüm veri dikkate alınarak ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır.

Hesaplanan s_u değerlerinin bir kısmının 1:2 ve 2:1 çizgileri arasında dağıldığı, bazı verilerin ise aşırı sapmalar göstererek 1:2 ile 2:1 sınırlarını aştığı belirlenmiştir. Hettiarachchi ve Brown (2009) tarafından önerilen ilişki için yapılan değerlendirmede verinin genel olarak 1:2 çizgisine yakın yoğunlaştığı ve bir kaç verinin 1:2 sınırını aştığı, dolayısıyla bu araştırmacıların önerdiği ilişkinin s_u 'yu tahmin etmekte tutucu kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sivrikaya (2009) tarafından ise, UCS ve UU üç eksenli deneylerden belirlenen s_u 'lar dikkate alınarak her bir deney sonucu için ayrı ayrı ilişkiler oluşturulmuştur (bkz. Çizelge 3.8 ve EK 2a). Bu araştırmacıların önerileri için EK 2a'da yapılan değerlendirme sonucunda, UU üç eksenli deney verisi esas alınarak önerilen ilişkilerden tahmin edilen s_u değerlerinin genel olarak 1:1 çizgisi ile uyumlu veya yakın olduğu, hesaplanan s_u değerlerinden yaklaşık 300/350 kPa'dan büyük olanların ise 1:2 çizgisine yakın bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Aynı araştırmacı tarafından UCS verisi kullanılarak önerilen ilişkilerin tahmin gücünün ise göreceli olarak biraz daha düşük olduğunu ve bazı verilerin 1:2 çizgisini aştığının söylenmesi mümkündür.

Nassaji ve Kalantari (2011)'nin basit regresyon analizlerinden yararlanarak N ve N_{60} sayılarından s_u 'nun tahmini için önerdiği ilişkilerden belirlenmiş verilerin 1:2 çizgisi ve bu çizginin üzerinde yoğunlaştığı, dolayısıyla bu ilişkiden s_u 'nun tahmininde olması gerekenden çok daha düşük değerler elde edildiği görülmüştür. Bu araştırmacıların zeminlerin Atterberg limitlerini ve nem içeriklerini girdi olarak kullandıkları çoklu regresyon analizlerinden önerdikleri ilişkilerle belirlenen s_u 'ların dağılımı ise, basit regresyon analizleriyle belirlenenlere benzemekle birlikte, 1:2 çizgisi üzerinde sapma gösteren verinin nispeten daha az olduğunu söylemek mümkündür. Cangir ve Dipova (2017) ile Balachandran ve ark. (2017)'nin önerdikleri eşitlikler için oluşturulan karşılaştırma grafiklerindeki verilerin bir kaçının 2:1 sınırı altında dağılım göstermesine rağmen, genellikle 1:1 çizgisine yakın konumda yoğunlaştığı görülmüş olup, bu nedenle bu ilişkilerin s_u 'yu tahmin etmede iyi sonuçlar verebileceği anlaşılmıştır.

Yukarıda yapılan değerlendirmelerle; literatürde önerilen s_u tahmin ilişkilerinden bazılarının (Terzaghi ve Peck, 1967; Stroud, 1974; İyisan ve Ansal, 1990; Sivrikaya ve Toğrol, 2002 ve 2006; Sivrikaya 2009, Balachandran ve ark., 2017; Cangir ve Dipova, 2017) tez kapsamında derlenen veri tabanındaki laboratuvar deneylerinden belirlenen s_u 'ları nispeten daha iyi tahmin ettiği belirlenirken, diğerlerinin daha düşük bir tahmin performansı gösterdikleri sonucuna ulaşılmıştır. Bu belirlemelerin ışığında, nispeten daha iyi performans gösteren ilişkilerden belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların, veri tabanında bulunan $s_{u(ölçülen)}$ 'lara göre yüzde değişimleri/sapmaları hesaplanarak (Eşitlik 5.1) elde edilen sayısal değerlerin histogramları oluşturulmuştur (Şekil 5.1 - 5.4).

$$\% \text{ Değişim/Sapma} = \left(\frac{s_{u(tahmin)} - s_{u(ölçülen)}}{s_{u(ölçülen)}} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

Burada,

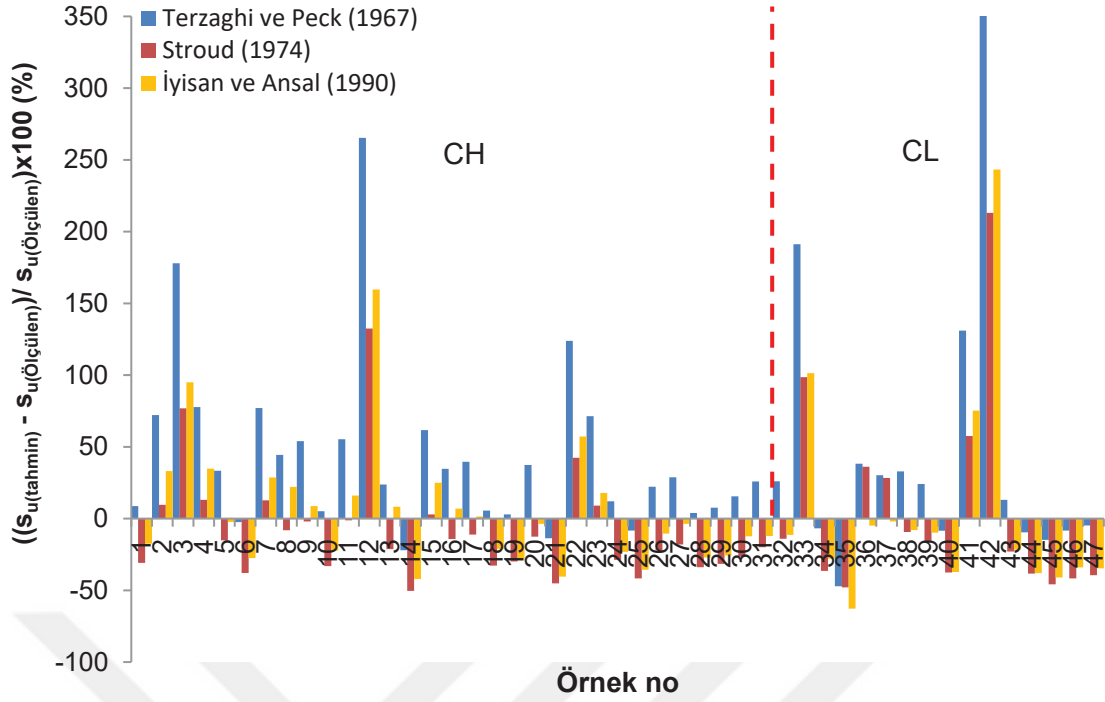
$s_{u(tahmin)}$: Önerilen ilişkilerden tahmin edilen s_u (kPa) değerleri

$s_{u(ölçülen)}$: Tez çalışması kapsamında derlenen veri tabanındaki laboratuvar da UU üç eksenli deneylerle belirlenmiş s_u (kPa) değerleri.

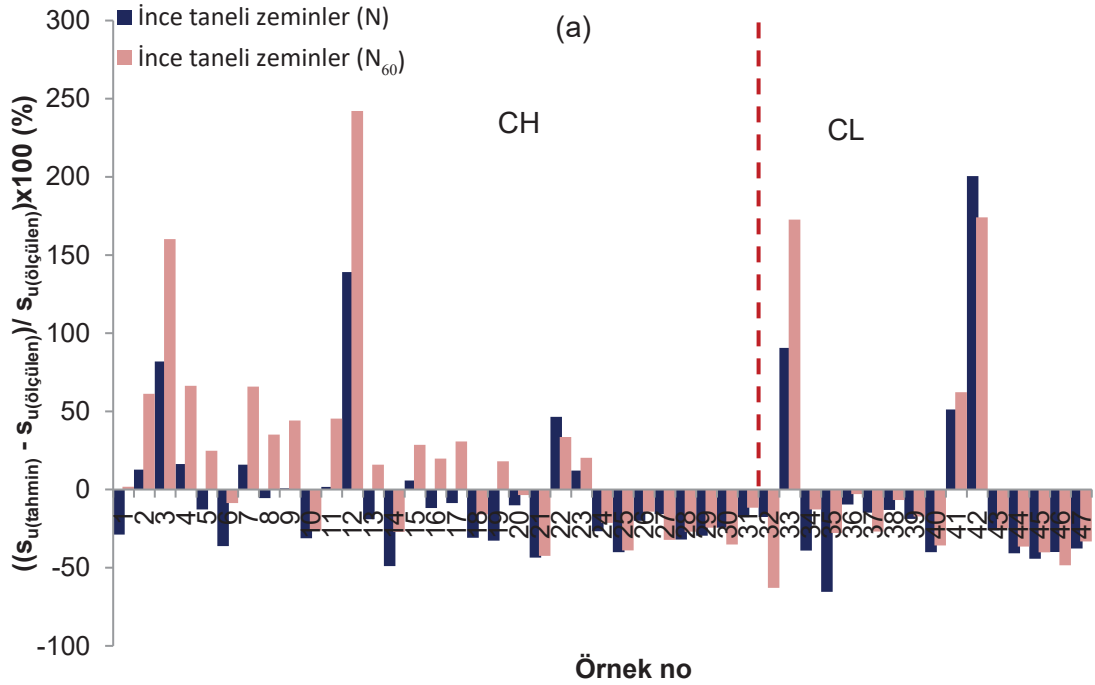
Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974) ve İyisan ve Ansal (1990) tarafından önerilen SPT-N verisiyle s_u tahmin ilişkileri için Eşitlik 5.1 temel alınarak elde edilen yüzde değişim histogramları Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu şekilde, ilk 31 veri CH sınıfındaki, sonraki 16 veri ise CL sınıfındaki zeminlere ait olacak şekilde gruplandırılmıştır. Bu histogramlar incelendiğinde; tez veri tabanındaki gerek CH gerekse CL sınıfındaki killer için Stroud (1974) ile İyisan ve Ansal (1990)'ın önerdikleri eşitliklerin birbirine karşı belirgin bir üstünlüğünün olmadığı ve Terzaghi ve Peck (1967)'in eşitliğine göre nispeten daha düşük yüzde sapmalarla tahmin yaptıkları görülmektedir. Stroud (1974) ile İyisan ve Ansal (1990) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak, tez veri tabanındaki 47 s_u verisinin yaklaşık olarak yarısı (sırasıyla 21 ve 24 s_u verisi) %25, 41 ve 42'si ise %50 ve daha az bir sapmayla tahmin edilebilmektedir.

Sivrikaya ve Toğrol (2002)'un CH ve CL sınıfındaki killer ile ince taneli zeminlerde SPT-N ve N_{60} sayılarından s_u tahmini için ayrı ayrı önerdikleri ilişkiler için elde edilen sapma histogramları Şekil 5.2'de sunulmuştur. İnce taneli zeminler için belirlenen

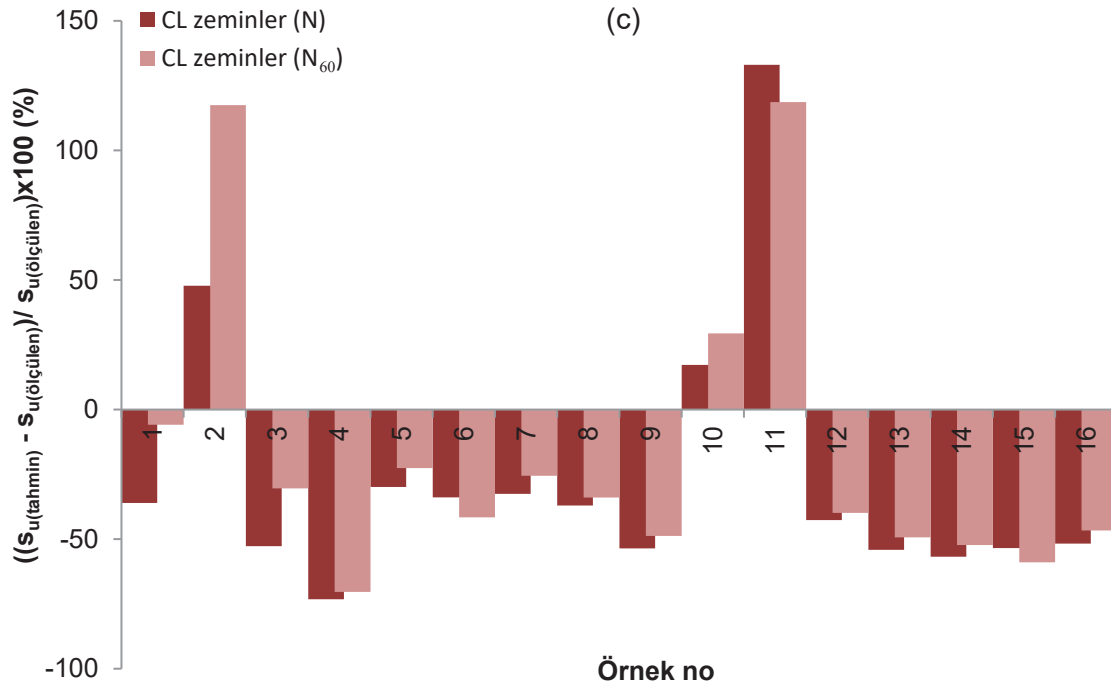
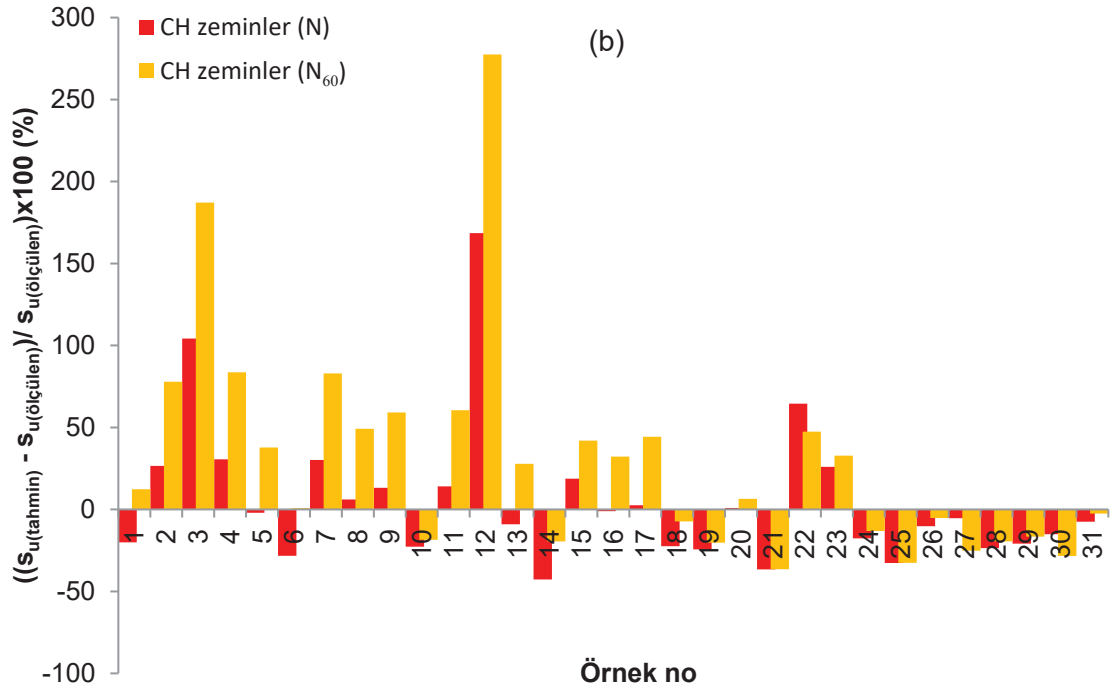
histogramlara göre (Şekil 5.2a), gerek SPT-N gerekse N_{60} 'a bağlı oluşturulmuş eşitliklerle hesaplanan $s_{u(tahmin)}$ 'lerin çoğunluğunun $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan %25'in altında, 40 - 41'inin ise %50'nin altında sapma gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu sonuca bağlı olarak söz konusu çalışmada önerilen eşitliklerin tahmin performanslarının, Stroud (1974) ile İyisan ve Ansal (1990)'ın eşitliklerinden elde edilenlere yakın olduğu görülmüştür. Sivrikaya ve Toğrol (2002) tarafından CH ve CL sınıfı zeminler için önerilen ilişkilerden belirlenen s_u 'lar ise, yaklaşık olarak sırasıyla %80 ve %60'ı, %50'nin altında bir sapmayla tahmin edilmiştir (Şekil 5.2b ve 5c). Sivrikaya ve Toğrol (2006)'un önerdiği ilişkiler kullanılarak belirlenen s_u 'lardaki sapmaların, araştırmacıların 2002 yılındaki önerilerinden belirlenenlere çok benzediği Şekil 5.3'ten görülebilmektedir. Sivrikaya (2009) tarafından SPT-N ve N_{60} sayılarının yanı sıra zeminlerin kıvamlılık özellikleri ve nem içerikleri de katılarak oluşturulan s_u tahmin ilişkilerinin performansları (Şekil 5.4), Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006) tarafından sadece SPT-N ve N_{60} kullanılarak oluşturulan ilişkilerin performanslarından daha yüksek değildir. Bu araştırmacıların eşitlikleriyle hesaplanan $s_{u(tahmin)}$ 'lerin de yaklaşık %75'i (34-35 veri) $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan %50'nin altında sapma göstermektedir. Balachandran ve ark. (2017) ile Cangir ve Dipova (2017) tarafından önerilen eşitliklerden belirlenen yüzde sapma histogramları Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde, Cangir ve Dipova (2017)'nin N_{70} sayısı ile önerdiği eşitliğin, Balachandran ve ark. (2017)'nin eşitliğine göre belirgin bir üstünlüğünün olduğu ve daha düşük sapmalarla tahmin yaptığı görülmekle birlikte, veri tabanındaki 47 s_u verisinin 38'ini %50'nin altında bir sapmayla tahmin edebilmektedir.



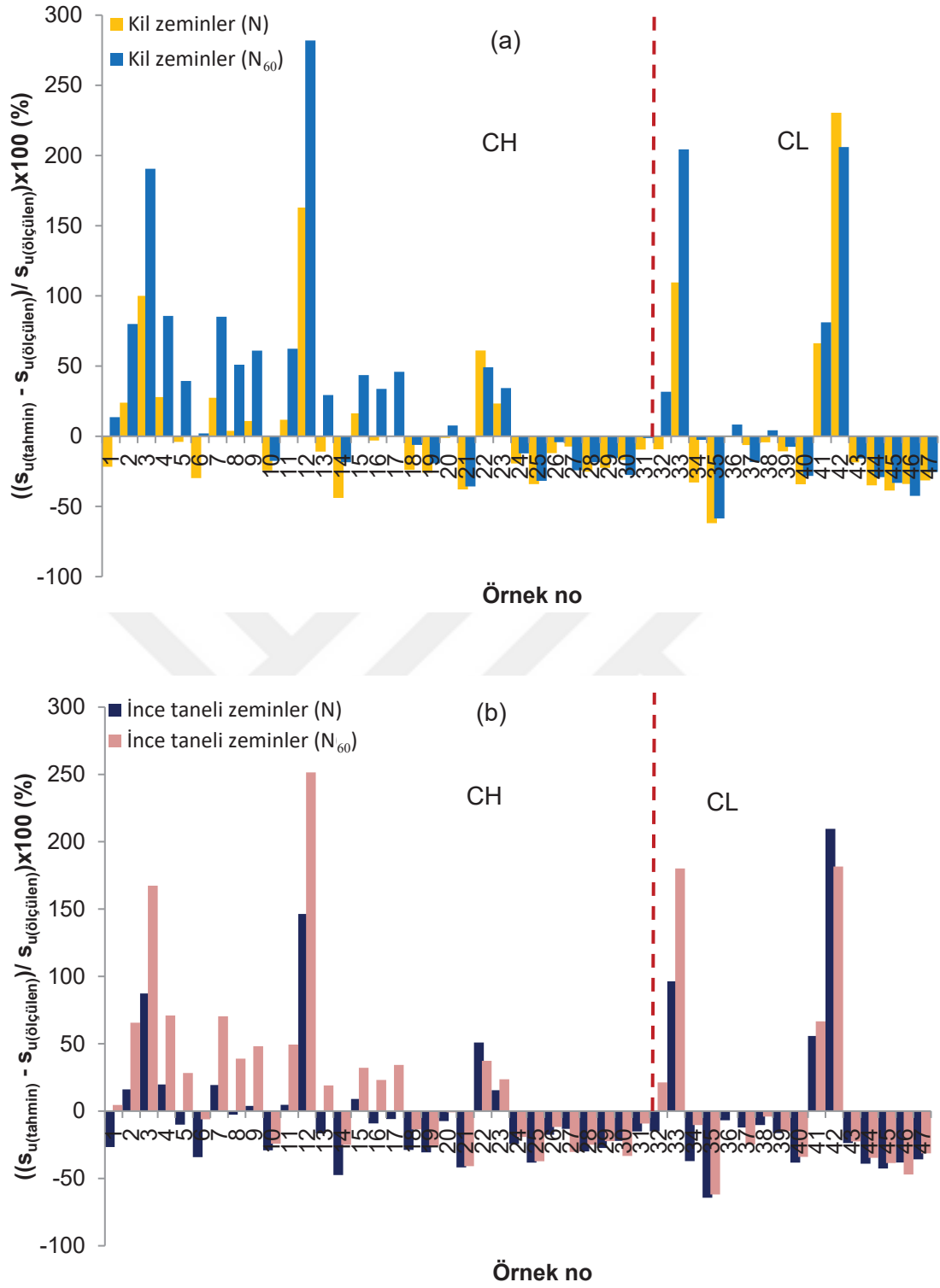
Şekil 5.1. Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974) ve İyisan ve Ansal (1990) tarafından SPT-N sayısı kullanılarak önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların, $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.



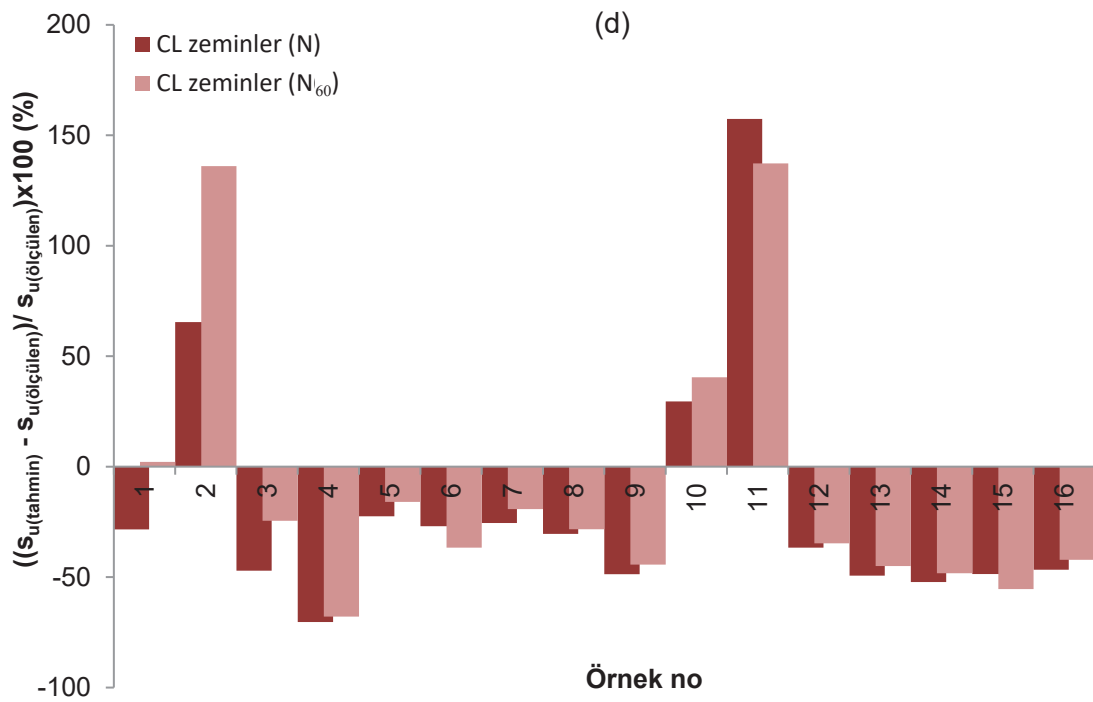
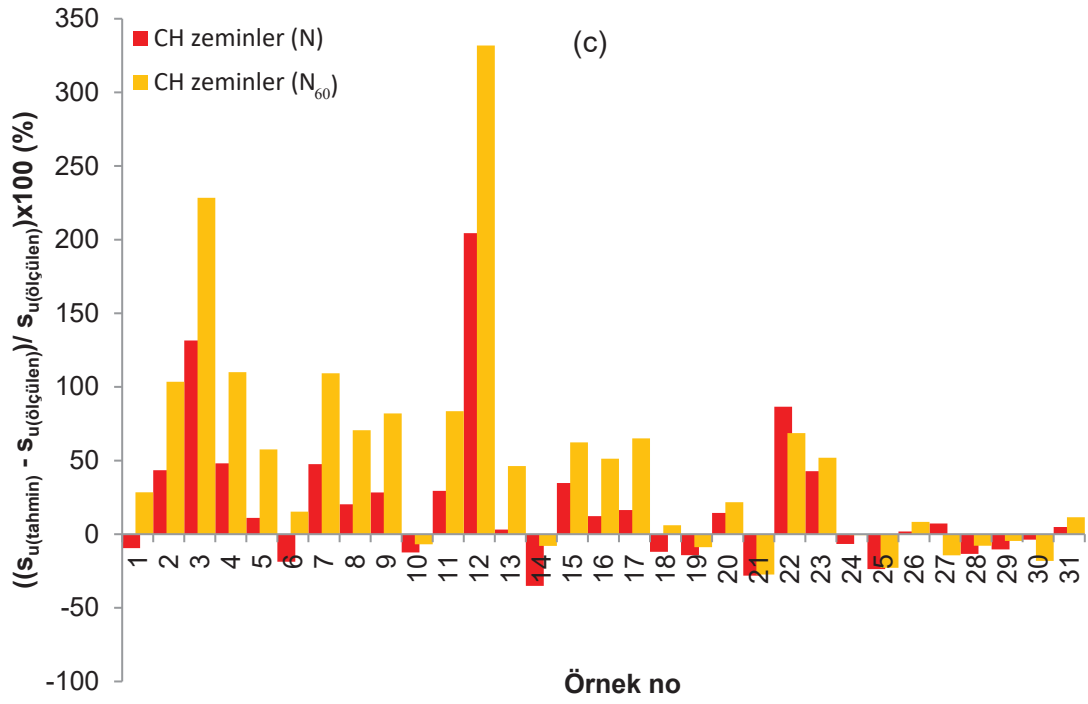
Şekil 5.2. Sivrikaya ve Toğrol (2002) tarafından SPT-N ve N_{60} sayıları esas alınarak, (a) İnce taneli, (b) CH ve (c) CL zeminler için önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.



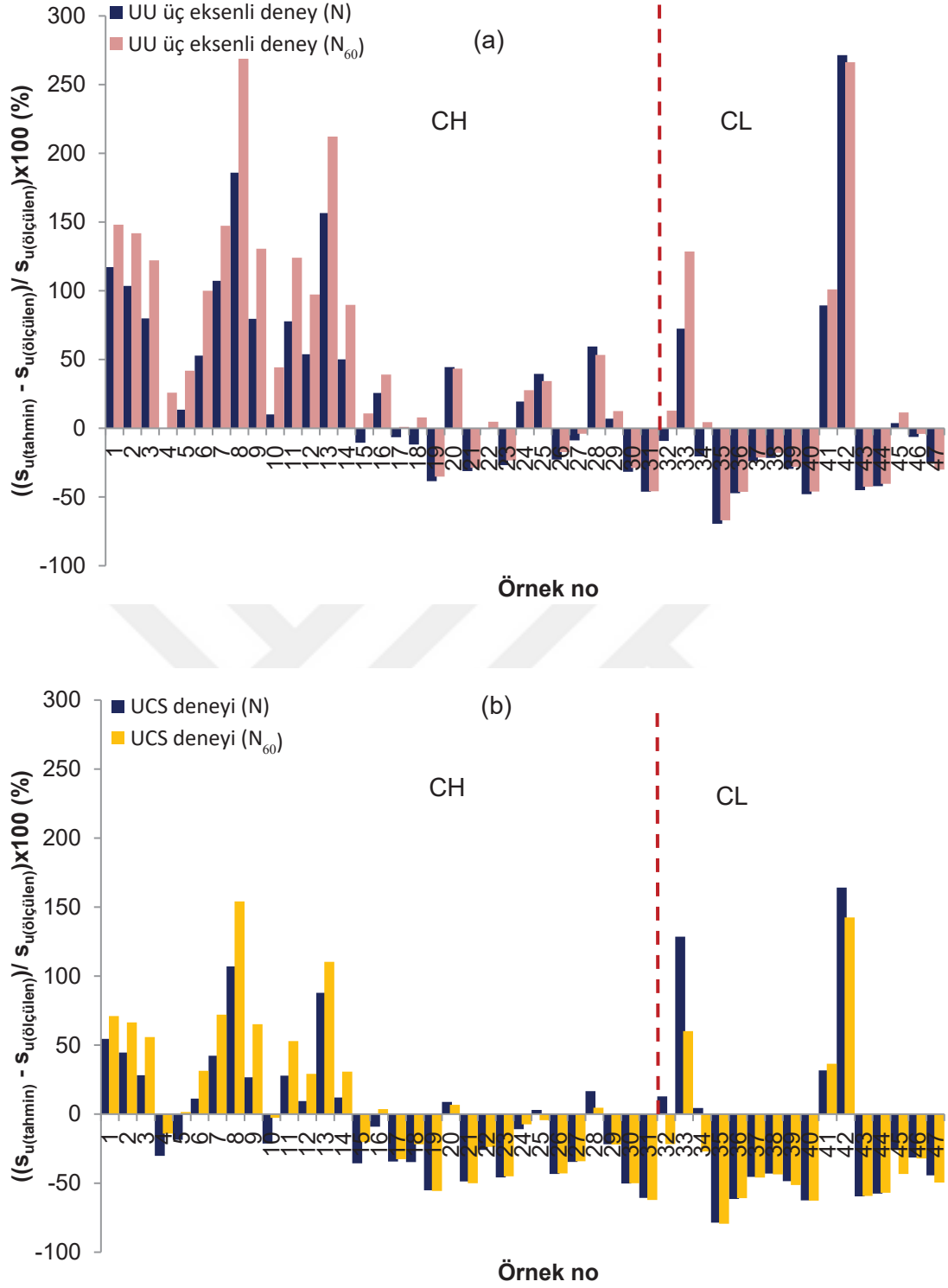
Şekil 5.2. (devam ediyor).



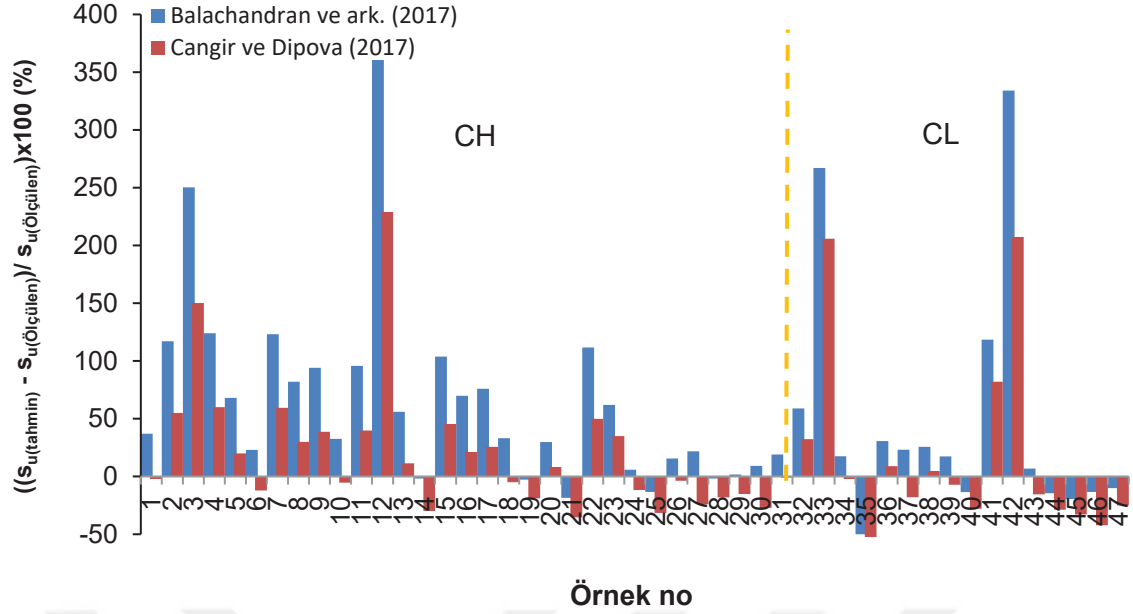
Şekil 5.3. Sivrikaya ve Toğrol (2006) tarafından SPT- N ve N_{60} sayıları esas alınarak, (a) Kil, (b) ince taneli, (c) CH ve (d) CL sınıfındaki zeminler için önerilen ilişkilerle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.



Şekil 5.3. (devam ediyor)



Şekil 5.4. Sivrikaya (2009) tarafından SPT- N, N_{60} sayıları esas alınarak, (a) UU üç eksenli deney verisi kullanılarak ve (b) UCS deney verisi kullanılarak kohezyonlu zeminler için oluşturulmuş ilişkilerle belirlenen $s_{u(tahmin)}$ 'ların, $s_{u(ölçülen)}$ 'lardan olan yüzde değişimleri.



Şekil 5.5. Balachandran ve ark. (2017) tarafından N_{60} ve Cangir ve Dipova (2017) tarafından N_{70} sayısı kullanılarak önerilen ilişkilerle belirlenmiş $S_u(tahmin)$ 'ların, $S_u(ölçülen)$ 'lardan olan yüzde değişimleri.

Yukarıda yapılan değerlendirmelerde, literatürdeki ilişkiler arasından tez kapsamında derlenen s_u verisini en iyi tahmin edenler ayırtlanmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974), İyisan ve Ansal (1990), Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006) tarafından oluşturulan ve sadece SPT-N veya N_{60} 'ın girdi parametresi olarak kullanıldığı ilişkilerin performansları, literatürde önerilen diğer ilişkilerden elde edilenlere nazaran oldukça yüksek çıkmıştır. Sivrikaya (2009) tarafından önerilen ve kıvamlılık ile nem içeriği özelliklerinin de ek girdi olarak kullanıldığı eşitlikler ise, yukarıda değinilen çalışmalarda ilişkiler için belirlenenler kadar iyi bir performans gösterememiştir. Bu nedenle, s_u tahmin eşitliklerinin oluşturulmasında bu özelliklerin girdi olarak kullanılmasının önemli bir katkı sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Özellikle girdi parametresi olarak SPT-N sayısının kullanıldığı literatürdeki eşitliklerin önerildiği çalışmalarda, kullanılan deney ekipmanı ve özellikle E_r değerlerinin belirtilmemiş olması, uygulayıcıların kullanımı için bir sınırlama oluşturmaktadır. Çünkü, E_r değerinin farklılığı, aynı özellikteki bir zemin için SPT-N sayısının farklı tayin edilmesine neden olabilecek bir etkidir. Bu nedenle, belirli bir E_r ile yapılmış deneyden alınan SPT-N verisiyle oluşturulan s_u eşitlikleri, ancak aynı E_r ile yapılmış SPT verisi için dikkate alınabilir. EK 2a'da verilen ve özellikle 2000'li yıllardan önceki çalışmalarda önerilmiş eşitlikler

için hazırlanan 1:1 doğrusu grafiklerinde, birkaçı dışında, SPT-N verisiyle oluşturulan s_u tahmin eşitliklerinden elde edilen verinin dağılımı, dayanım artışına bağlı olarak 1:1 çizgisinden belirli bir eğilimle sapma göstermektedir (bkz. EK 2a: Sanglerat, 1972; Hara ve ark., 1974; Sowers, 1979; Nixon, 1982 tarafından önerilen eşitlikler). Bu durum, tez verisinin alındığı SPT ekipmanı ile önceki çalışmalardaki veriye esas olan ekipman arasında, özellikle E_r değerleri bakımından, farklılıkların olabileceğine işaret etmektedir. Bu eşitliklerin oluşturulması sırasında kullanılan SPT-N sayılarının hangi E_r için belirlendiği bilinmediği için, uygulayıcıların bu eşitliklerden yararlanmaması gerektiği düşünülmektedir. N_{60} kullanılarak oluşturulan ilişkilerin, SPT-N sayılarının 60 enerji oranına göre düzeltme yapılmış olması nedeniyle daha sağlıklı olduğu düşünülebilir. Ancak, EK 2a'da Sivrikaya (2009) ve Nassaji ve Kalantari (2011) tarafından önerilen ve N_{60} 'ın girdi olduğu s_u tahmin eşitlikleri için verilen grafikler incelendiğinde, $s_{u(tahmin)}$ değerlerinin 1:1 çizgisinden bir ölçüde saptıkları görülmektedir. Bu nedenle, E_r 'nin yanı sıra, literatürdeki çalışmalarda SPT'lerin yapıldığı kohezyonlu zeminlerin diğer bazı özelliklerinin de etkili olabileceği akla gelmektedir. Bununla birlikte, kullanılan ekipmanlarla aktardıkları enerji oranları arasındaki olası tutarsızlıklar da bu tür saptamalara neden olabilir, ya da önerilen eşitliklerin performansı gerçekten düşüktür.

5.2. CPT Verisini Esas Alan Yöntemler

Bölüm 3.2’de görüldüğü gibi, literatürdeki bazı çalışmalarda N_k , N_{kt} , N_{ke} ve $N_{\Delta u}$ koni faktörleri için tek bir değer ya da değer aralıkları verilirken, bazılarında zeminlerin diğer özellikleri ya da CPT verisinden türetilen parametreler (B_q gibi) de dikkate alınarak koni faktörlerinin görgül eşitliklerle belirlenmesi önerilmektedir. Bu önerilerin tahmin performanslarının sınanması amacıyla öncelikle, EK 1b’deki CPTu sisteminden elde edilen veri ile Eşitlik 3.12, 3.15 ve 3.16’dan yararlanılarak N_{kt} , N_{ke} ve $N_{\Delta u}$ faktörleri hesaplanmıştır. Bu faktörlerin değişim aralıkları, tüm veri tabanı ve CH ile CL sınıfındaki killer için ayrı ayrı olmak üzere, Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde, killer için belirlenen N_{kt} koni faktörlerinin literatürde önerilen değerleri (bkz. Çizelge 3.12) de kapsayacak şekilde geniş bir aralıkta (7.5 - 30.6 arasında) değiştiği anlaşılmaktadır. Ayrıca bu değişim aralığının, Rad ve Lunne (1988) tarafından önerilenle (8 – 29 arasında) oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. N_{ke} ve $N_{\Delta u}$ koni faktörlerinin de literatürde belirlenen aralıklara (bkz. Çizelge 3.13 ve 3.14) nazaran, özellikle üst limitleri fazla olacak şekilde, daha geniş aralıklarda değiştiği tespit edilmiştir. Çizelge 5.1’den kanatlı kesici deneylerinden belirlenen s_u ’lar baz alınarak hesaplanan koni faktörlerinin daha dar aralıklar sunduğu görülmekle birlikte, bu deney sonuçlarından belirlenen koni faktörleri ile aynı seviyeler için (30 kil seviyesi) UU üç eksenli deneylerden elde edilen koni faktörlerinin oldukça benzer oldukları görülmüştür.

Çizelge 5.1. Koni faktörlerinin tez kapsamındaki veri dikkate alınarak hesaplanan değişim aralıkları.

su’nun Belirlenme Şekli	Zemin Sınıfı	Veri Sayısı (n)	Koni Faktörleri		
			N_{kt}	N_{ke}	$N_{\Delta u}$
UU üç ekseli sıkışma dayanımı deneylerinden	Kil	87	7.5 - 30.6	3.3 - 21.1	1 - 14.7
	CH	50	9.8 - 30.6	4 - 21.1	1.3 - 14.7
	CL	20	7.5 - 26.2	4.9 - 20	1 - 12.1
Kanatlı kesici deneylerinden	Kil	40	7.6-24.1	3.3-14.4	1-13.8
	CH	21	9.8-24.1	4.2-14.3	3.2-10.2
	CL	2	15.9-22	10.8-14.4	3.8-9.2

İkinci aşamada ise, literatürde farklı araştırmacılar tarafından ya önerilen bazı eşitliklerle (bkz. bölüm 3.2) belirlenen koni faktörleri kullanılarak, ya da bazı önerilerdeki gibi, doğrudan diğer CPT parametreleri (f_s gibi) kullanılarak $s_{u(tahmin)}$ 'lar hesaplanmış ve bu değerlerin $s_{u(ölçülen)}$ 'larla karşılaştırılması için 1:1 grafikleri hazırlanmıştır. Söz konusu grafikler, çalışmaların tarihsel sıralamasına uygun şekilde ve her bir çalışma için yararlanılan koni faktörü ve $s_{u(tahmin)}$ eşitlikleriyle birlikte EK 2b'de verilmiştir.

EK 2b incelendiğinde, Larsson ve Mulabdic (1991)'in önerdiği eşitlikten belirlenen s_u değerlerinin, gerek UU üç eksenli sıkışma gerekse kanatlı kesici deneylerinden belirlenen s_u 'larla uyumlu olduğunun söylenmesi mümkündür. Anagnostopoulos ve ark. (2003)'nın önerileriyle f_s 'den belirlenmiş s_u değerlerinin ise, çoğunlukla 1:2 çizgisinin ve bunun üstünde dağılım gösterdiği, dolayısıyla s_u 'nun tahmininde oldukça tutucu sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Karlsrud ve ark. (2005) tarafından önerilen yaklaşımda koni faktörlerinin tahmini için killerin duyarlılığının 15'ten küçük veya büyük olması durumları için ayrı ayrı eşitlikler önerilmiştir (bkz. Bölüm 3.2). Tez veri tabanında derlenen kil seviyeleri için duyarlılık bilgisi mevcut değildir. Bu nedenle, bu araştırmacıların önerilerinin değerlendirilebilmesi için veri tabanındaki killerin duyarlılıkları (S_t), Schmertmann (1978) tarafından önerilen $S_t = N_s / R_f$ eşitliğinden belirlenmiştir. Bu eşitlikte; R_f sürtünme oranı olup Eşitlik 2.10'dan hesaplanmış, N_s sabiti için ise Rad ve Lunne (1986) tarafından önerilen ortalama 7.5 değeri esas alınmıştır. Bu değerlendirme sonucunda veri tabanındaki killerin tamamının 15'ten küçük duyarlılığa sahip oldukları tespit edilmiştir. Karlsrud ve ark. (2005)'nin $S_t < 15$ koşulu için önerdikleri eşitlikler dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde, koni faktörleri N_{ke} ve N_{kt} için tahmin edilen s_u 'ların, ölçülenlere nazaran daha büyük oldukları, $N_{\Delta u}$ ile tahmin edilen verilerin ise genellikle 1:1 çizgisi ile uyumlu olmakla birlikte kimi verinin sapmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu araştırmacıların s_u eşitliğindeki OCR değerleri, kendileri tarafından önerilen ilişki (bkz. Eş 3.22 ve EK 2b) aracılığıyla belirlenmiştir. Larsson ve Ahnberg (2005)'in önerisinden belirlenmiş s_u 'ların, genel olarak 1:2 ve 2:1 çizgileri arasında dağıldığı, bununla birlikte, verinin daha çok 1:1 çizgisi üstünde yer aldığı görülmektedir. Bu araştırmacıların s_u eşitliğinde yer alan OCR değerleri, kendilerinin önerdikleri OCR ilişkileriyle hesaplanmıştır (bkz. Çizelge 3.12 ve EK 2b).

Hong ve ark. (2010)'nın I_p ve B_q 'yu esas alan eşitlikleriyle hesaplanan $N_{\Delta u}$ 'larla belirlenmiş s_u 'ların dağılımları 1:1 çizgisi ile uyumlu olmakla birlikte, özellikle I_p esas alınarak belirlenenlerin nispeten fazla dağılım gösterdiğini söylemek mümkündür. N_{kt} ve N_{ke} 'lerle belirlenmiş s_u 'ların ise, genel olarak 1:1 çizgisiyle uyumlu olduğu söylenebilir. Shin ve Kim (2011)'in önerisi için oluşturulan karşılaştırma grafiği incelendiğinde, verilerin dağılımının Hong ve ark. (2010)'nın grafiklerindekiyle benzer olduğu anlaşılmıştır. Remai (2013)'nin önerisiyle tahmin edilen s_u değerlerinin daha çok 1:2 ve 1:1 çizgileri arasında dağılım gösterdiği, dolayısıyla bu önerilerden s_u 'nun tahmininin nispeten tutucu olacağı görülmüştür. Westerberg, Müller ve Larsson (2015) tarafından önerilen yaklaşımla ise, daha iyi tahmin sonuçları elde edilebilmektedir. Mayne ve Peuchen (2018)'nin önerisinden belirlenen s_u verilerinin ise, çoğunlukla 1:1 ve 2:1 çizgisi arasında dağıldığı ve $s_{u(ölçülen)}$ 'lara göre daha yüksek tahminler verdiği belirlenmiştir.

Bir önceki alt bölümde olduğu gibi bu bölümde de önerilen ilişkilerden tahmin edilmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların, veri tabanında bulunan $s_{u(ölçülen)}$ 'lara göre yüzde değişimleri/sapmaları hesaplanarak (bkz. Eş. 5.1) elde edilen sayısal değerlerin histogramları oluşturulmuştur (Şekil 5.6 - 5.8). UU üç eksenli ve kanatlı kesici deneylerinden belirlenen s_u 'ların birbirine çok benzer olması ve 32 kil seviyesi için her iki deney verisinin de bulunması nedeniyle, aynı kil seviyesinin birden fazla kez değerlendirilmesini önlemek için söz konusu histogramlar sadece üç eksenli deneylerden belirlenen $s_{u(ölçülen)}$ 'lara göre hazırlanmıştır. Sunulan bu grafikler üzerinde 1 ile 50 no'lar arasındaki sapma histogramları CH sınıfı, 51 ile 70 no arasındakiler CL sınıfı, 71 ile 87 no'lar arası ise Atterberg limitleri belirlenmediği için kil olarak tanımlanmış zeminleri temsil etmektedir.

Şekil 5.6a incelendiğinde; Larsson ve Mulabdic (1991) tarafından önerilen N_{kt} görgül ilişkisi dikkate alınarak, gerek teorik s_u eşitliğiyle (bkz. EK 2b) gerekse Larsson ve Ahnberg (2005)'in önerdiği ve OCR'nin de girdi olduğu s_u eşitliğiyle (bkz. Çizelge 3.12 ve EK 2b) belirlenen $s_{u(tahmin)}$ 'ların veri tabanındaki tüm killer için oldukça iyi (70 verinin 42'si %25 sapma, 60-63'ü %50 sapma altında) performans sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, Larsson ve Ahnberg (2005) tarafından önerilen yaklaşımdan bir miktar daha iyi sonuçlar alınabilmektedir. Karlsrud ve ark. (2005)'nin önerilerinde ise, nispeten düşük sapmaların $N_{\Delta u}$ eşitliğiyle tahmin edilen

s_u değerlerinden elde edildiği (70 verinin 40'ı %25 sapma, 63'ü %50 sapma altında), diğer koni faktörlerinden belirlenen s_u 'lardaki sapmaların ise çok yüksek olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.6b).

Yukarıdaki paragrafta yapılan değerlendirmeler, Hong ve ark. (2010), Shin ve Kim (2011), Remai (2013), Westerberg, Müller ve Larsson (2015) ve Mayne ve Peuchen (2018) tarafından yapılan öneriler için de yapılmıştır (Şekil 5.7 ve 5.8). Önceki paragraflardaki ve bu araştırmacılar için yapılan değerlendirmelerden; Karlsrud ve ark. (2005)'nin N_{kt} ve N_{ke} ilişkileri ile Mayne ve Peuchen (2018)'in N_{kt} ilişkisi haricindeki diğer önerilerden, tezin veri tabanındaki UU üç eksenli sıkışma deneyleriyle belirlenmiş s_u 'ların çok daha iyi tahmin edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

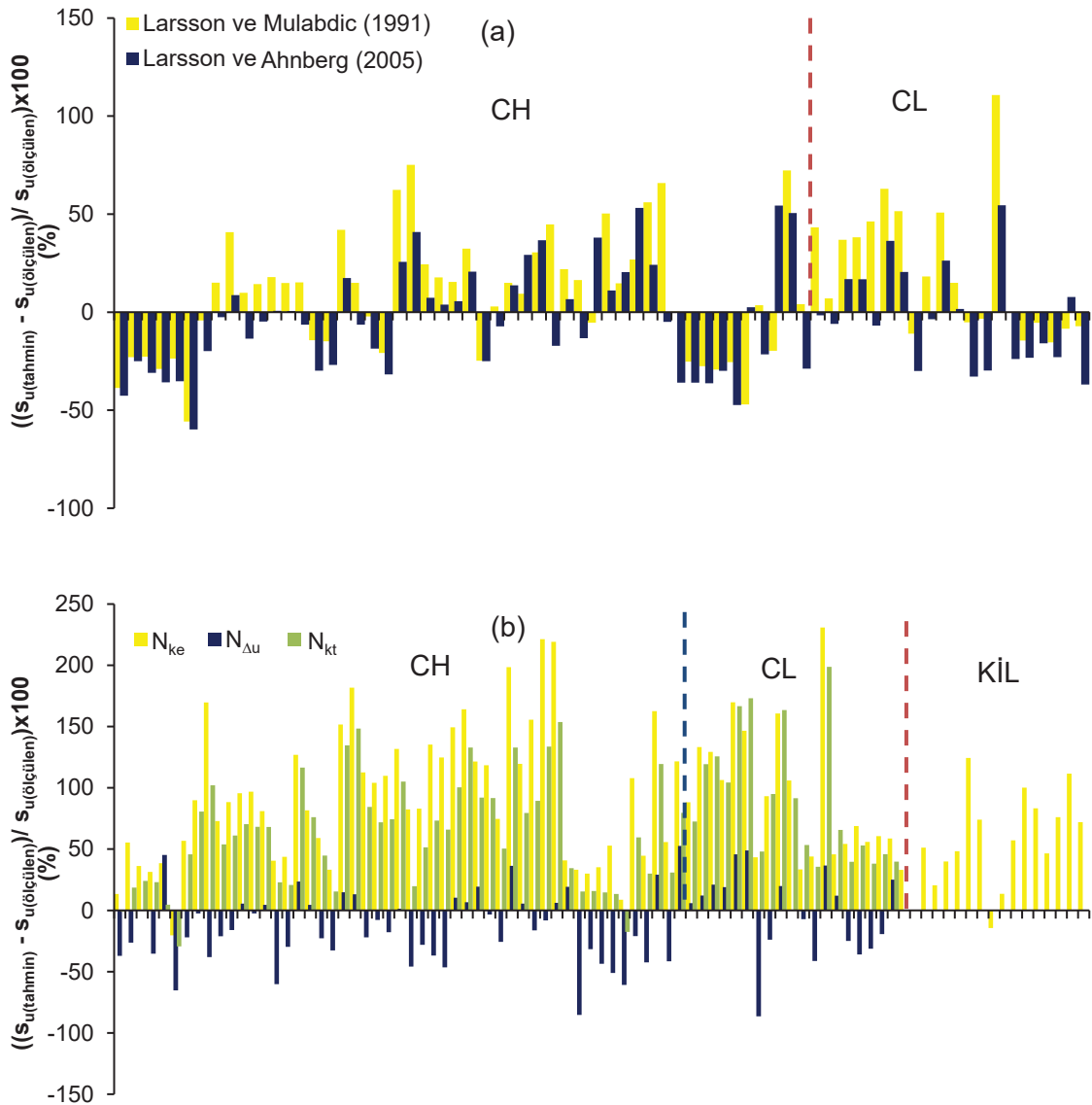
Yukarıda yapılan değerlendirmelerle; CPT parametrelerinden s_u 'ların belirlenmesine yönelik literatürde önerilen yaklaşımlar (bkz. Bölüm 3.2) arasından, tez kapsamında derlenen deneylerle ölçülmüş s_u verisini en iyi tahmin edenler ayırtlanmaya çalışılmıştır.

Bu değerlendirmelerin sonucunda:

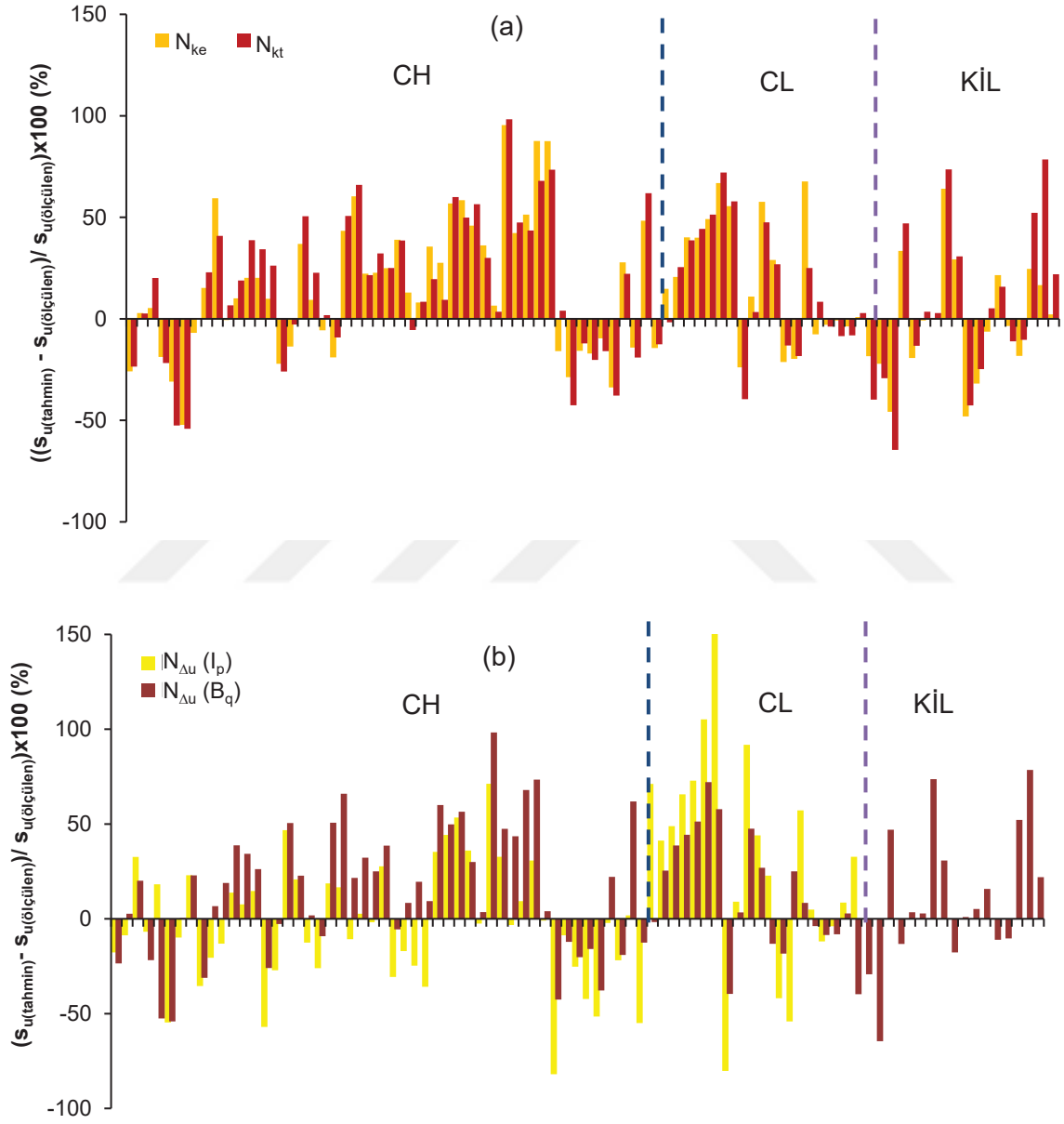
- i) Literatürde önerilen koni faktörlerinin değerlerinin ya da değişim aralıklarının, tez çalışması kapsamında belirlenenlerin içinde kaldığı ve bu çalışmadan belirlenen değişimin biraz daha geniş bir aralık sunduğu tespit edilmiştir.
- ii) Koni faktörlerinin görgül eşitliklerle belirlenmesinin önerildiği yaklaşımlar için yapılan değerlendirmelerde ise, literatürdeki önerilen eşitliklerin, birkaçı dışında tez veri tabanındaki deneylerle belirlenmiş s_u verisini kabul edilebilir düzeylerde tahmin edebildikleri görülmüştür.

Bununla birlikte, CPT verisinden s_u 'nun belirlenmesi için literatürde önerilen yaklaşımların bazılarında, özellikle koni faktörlerinin belirlenmesi için, CPT verisinin yanı sıra zeminlerin Atterberg limitleri ya da geçmiş dönemde etkisinde kaldıkları gerilmelerin dikkate alındığı görülmektedir (bkz. Bölüm 3.2 ve EK 2b). CPT'de örselenmiş ya da örselenmemiş örnek alınamaması nedeniyle, s_u 'nun tahmininde I_p , OCR, vb. parametrelerin kullanılmasının, dolaylı yoldan CPT verisiyle tahmin edilmedikleri sürece, pratikte mümkün olmadığı açıktır. Bu parametrelerden I_p 'nin CPT verisinden belirlenmesi için literatürde görgül bir ilişkiye rastlanmamıştır.

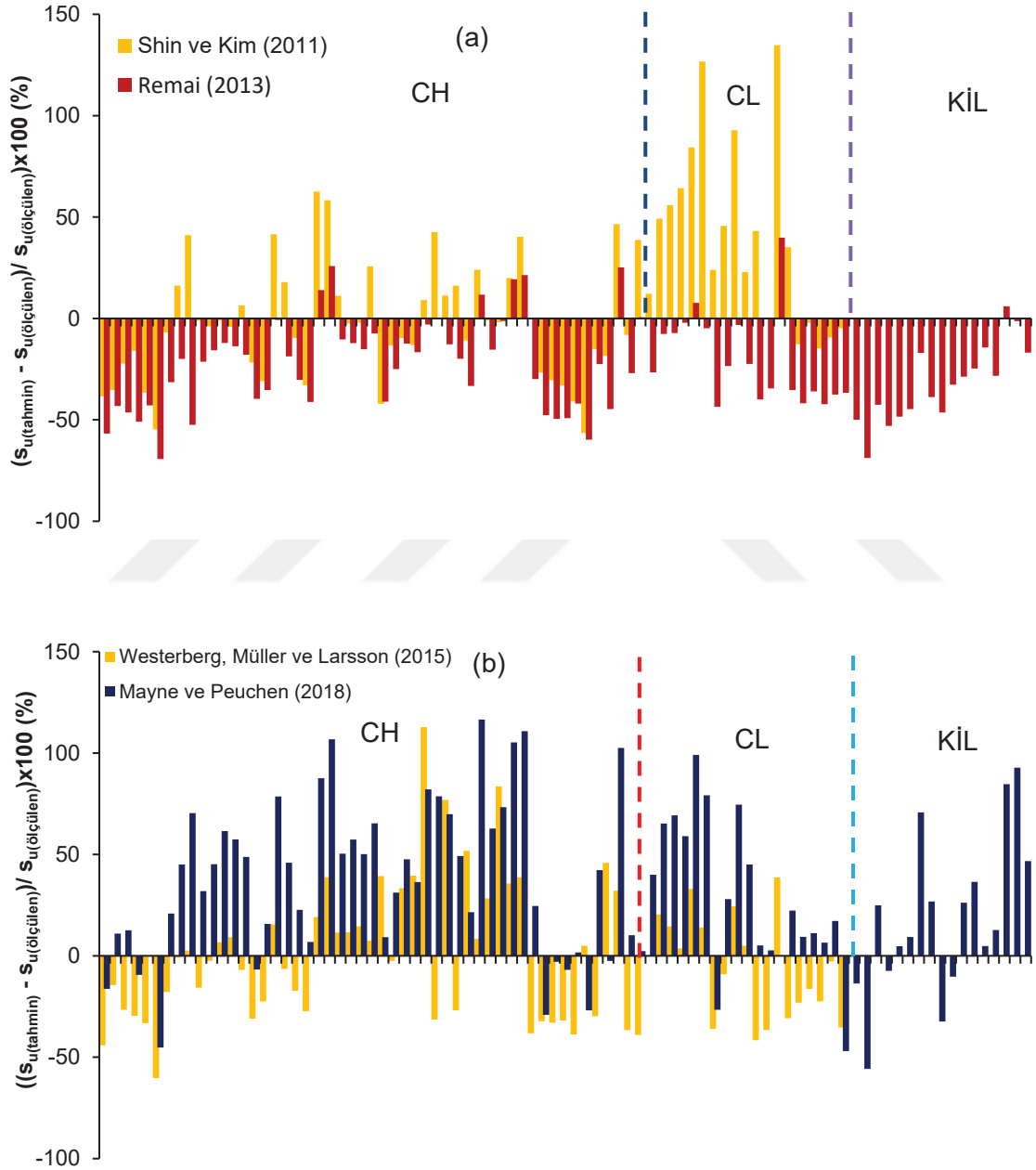
OCR'nin dolaylı yoldan belirlenmesi için önerilen birkaç eşitlikte ise LL ya da I_p 'nin de kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, bu tahmin eşitliklerinin performansı yüksek dahi olsa, sadece CPT parametreleri kullanılarak önerilen s_u tahmin eşitliklerinden daha iyi tahmin ettikleri söylenemez. Bu nedenlerle, CPT verisinden s_u 'nun güncel uygulamalardaki tahmini için doğrudan CPT'den elde edilen parametrelerin kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Bu değerlendirmelere dayanarak, s_u 'yu CPT verisinden belirlemek için, Hong ve ark. (2010) tarafından yapılan önerilerin öne çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 5.6. (a) Larsson ve Mulabdic (1991) ve Larsson ve Ahnberg (2005) tarafından önerilen N_{kt} ve (b) Karlsrud ve ark. (2005) tarafından önerilen koni N_{ke} , $N_{\Delta u}$ ve N_{kt} eşitlikleriyle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'dan yüzde değişimleri.



Şekil 5.7. Hong ve ark. (2010) tarafından önerilen (a) N_{ke} ve N_{kt} ve (b) $N_{\Delta u}$ eşitlikleriyle belirlenmiş $s_{u(tahmin)}$ 'ların $s_{u(ölçülen)}$ 'dan yüzde değişimleri.



Şekil 5.8. (a) Shin ve Kim (2011) N_k ve Remail (2013) $N_{\Delta u}$ ile (b) Westerberg, Müller ve Larsson (2015) ve Mayne ve Peuchen (2018) tarafından önerilen eşitliklerle belirlenmiş $s_u(tahmin)$ 'ların $s_u(ölçülen)$ 'dan yüzde değişimleri.

6. SPT VE CPT VERİSİ İLE DRENAJSIZ MAKASLAMA DAYANIMININ TAHMİNİ

Bu bölümde; öncelikle SPT ve CPT parametrelerinden s_u 'nun belirlenmesi için literatürde önerilen yaklaşımlardaki görgül eşitliklerin formatları ve kullanılan girdi parametreleri esas alınarak, s_u 'nun tahmini için tez verisini en iyi temsil eden görgül eşitlikler regresyon analizleriyle araştırılmıştır. Sonraki aşamada, bazı birleştirilmiş parametreler oluşturularak, bu parametrelerle de s_u 'nun tahmini için değerlendirmelere gidilmiştir. Ayrıca, en yüksek belirleme katsayılarının elde edildiği eşitliklerin tahmin etme performanslarının ve anlamlılık düzeylerinin test edilmesi amacıyla, SPSS (2015) programı kullanılarak ANOVA (Analysis of Variance) analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

6.1. SPT Verisiyle Drenajsız Makaslama Dayanımının Belirlenmesi

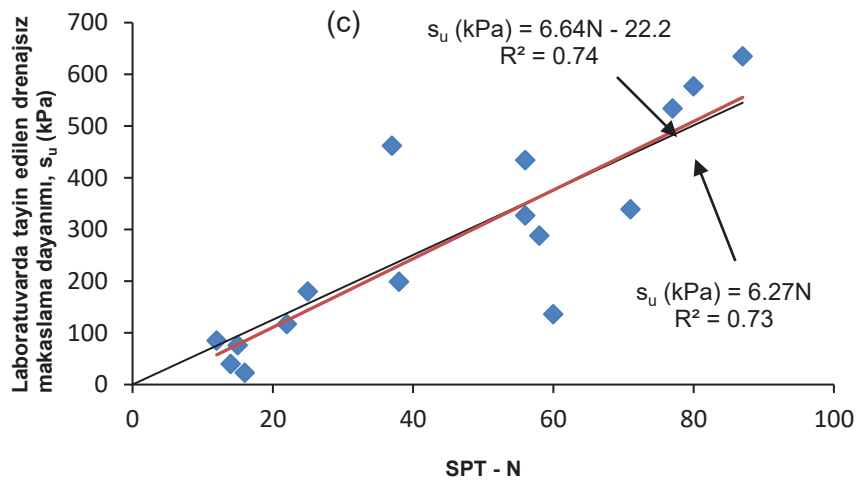
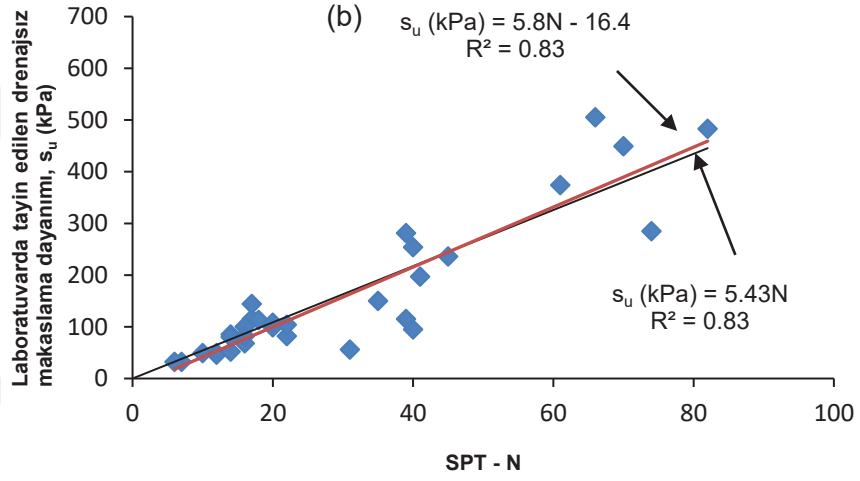
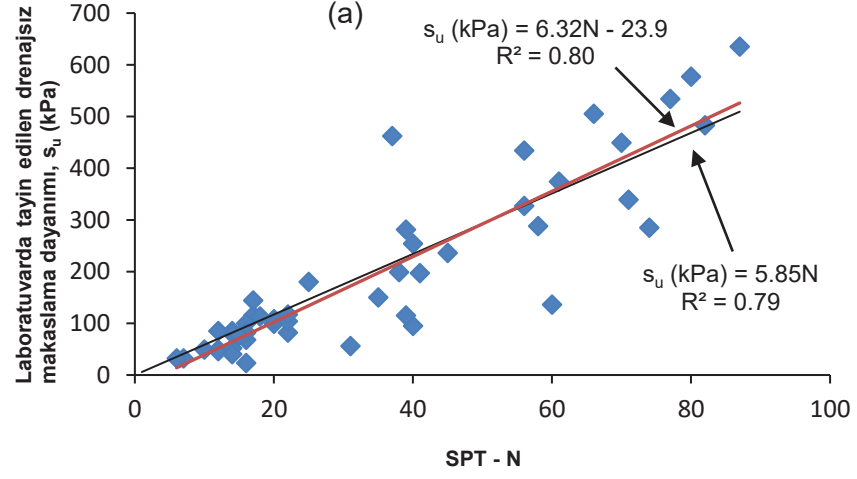
6.1.1. Basit regresyon analizleri

Bu kapsamda; SPT veri tabanında bulunan killerin tamamı, CH ve CL sınıfındaki killeri için ayrı ayrı olmak üzere, derlenen s_u değerleri ile SPT-N ve N_{60} sayıları arasında basit regresyon analizleri yapılmıştır. Önceki çalışmalarda N_{60} 'ı farklı yöntemlerle değerlendiren araştırmacılar olmakla birlikte (bkz. Çizelge 3.8), tij uzunluğu, kuyu çapı ve iç gömlek düzeltmelerinin etkili olması nedeniyle N_{60} 'ın hesaplanmasında Bölüm 2.1'de verilen Eşitlik 2.1 dikkate alınmıştır. Literatürde $N_{1(60)}$ sayısı ile s_u arasında bir ilişkiye rastlanmamıştır. Saran (1996) ve McGregor ve Duncan (1998), $N_{1(60)}$ sayısının belirlenmesi için gerekli olan örtü gerilmesi düzeltme faktörü (C_N)'nün kumlu zeminlerde gerçekleşen boşluk suyu basıncı etkilerini gidermek için gerekli olduğunu, ancak killi zeminlerde deney boyunca drenajsız koşulların devam ettiğini belirterek, bu faktörün kullanımının uygun olmayacağını ifade etmişlerdir. Araştırmacılarından bazıları ise (örneğin, Sivrikaya ve Toğrol, 2002 ve 2006; Kalantary, Ardalani ve Nariman-Zadeh, 2008), bu görüşü gerekçe göstererek ve C_N faktörünün kil zeminlerde kullanımının tartışmalı olmakla birlikte pratikte kullanılmadığını belirterek çalışmalarında $N_{1(60)}$ sayısını dikkate almamışlardır. Bununla birlikte, yukarıda değinilen tespitlerin doğruluğunun

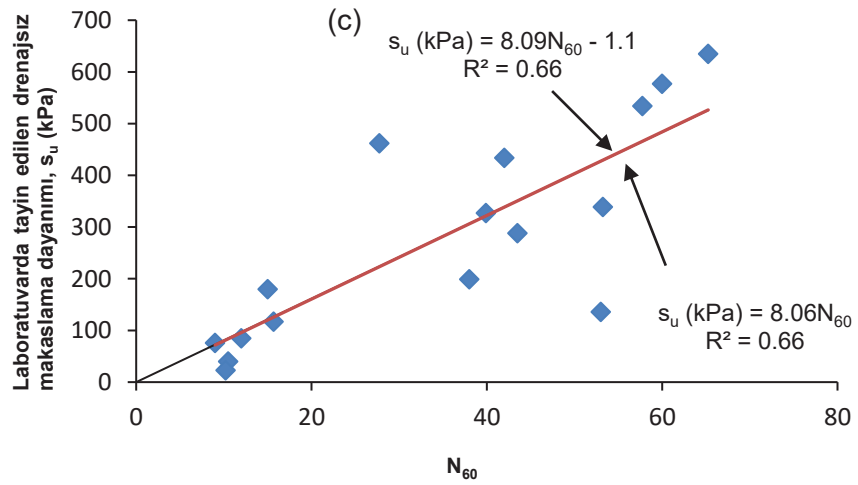
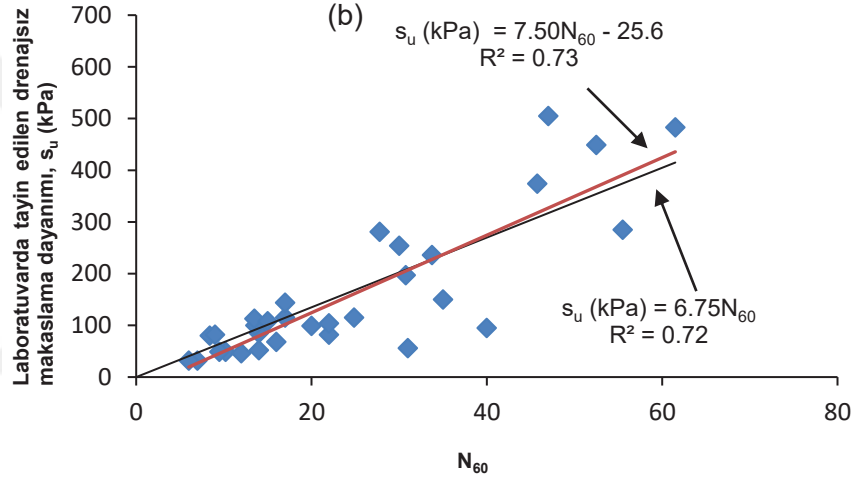
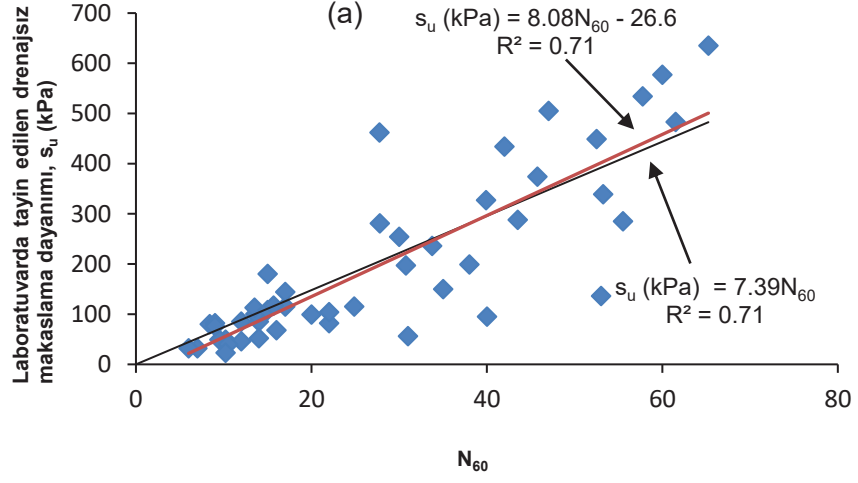
araştırılması amacıyla, tez çalışması kapsamında $N_{1(60)}$ sayıları Eşitlik 2.2 dikkate alınarak hesaplanmış ve regresyon analizleri bu parametre kullanılarak da yapılmıştır.

SPT-N, N_{60} ve $N_{1(60)}$ ile s_u arasında en yüksek belirleme katsayılarının elde edildiği ilişkiler, Şekil 6.1 ile 6.3 arasındaki grafiklerde sunulmuştur. Sunulan bu grafiklerden belirlenen ilişkiler ve bunlara ait yapılan tanımlamalar, Çizelge 6.1’de ayrıca özet olarak verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde, SPT-N sayıları ile s_u arasında oluşturulan ilişkilerin belirleme katsayılarının, N_{60} sayıları ile oluşturulana göre daha yüksek olduğu, en yüksek R^2 ’lerin ise yüksek plastisiteli killere (CH) ait ilişkilerden elde edildiği görülmektedir. $N_{1(60)}$ sayıları ile oluşturulan ilişkilerin R^2 ’leri, düşük plastisiteli killere (CL) için düşüktür ($R^2=0.50$ ve $R^2=0.51$). Yüksek plastisiteli killere (CH) ve tüm kil grubu için nispeten biraz daha yüksek ($R^2=0.56$ ve $R^2=0.58$) olmakla birlikte, SPT-N ve N_{60} sayılarından belirlenenlere oranla belirgin şekilde düşük kaldığı anlaşılmaktadır. Bu sonuç, bir önceki paragrafta değinilen ve literatürdeki çalışmalarda $N_{1(60)}$ sayılarının s_u tahmin eşitliklerinde kullanılmama gerekçesini teyit eder niteliktedir.

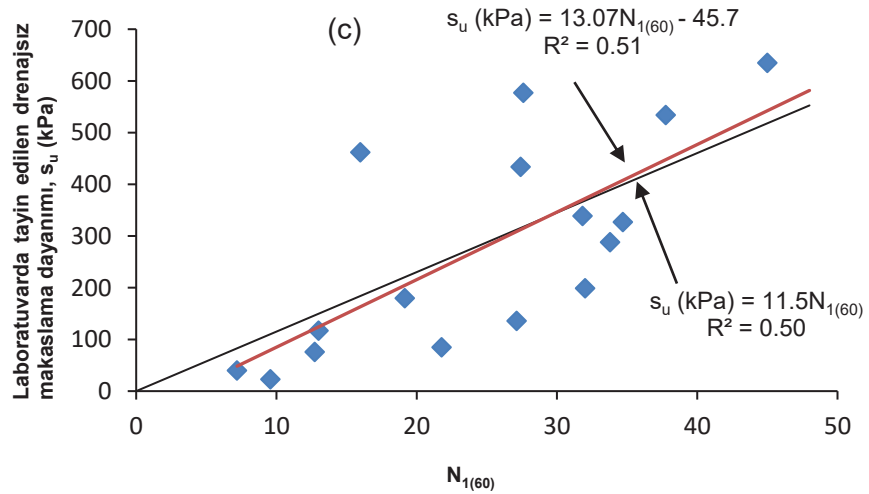
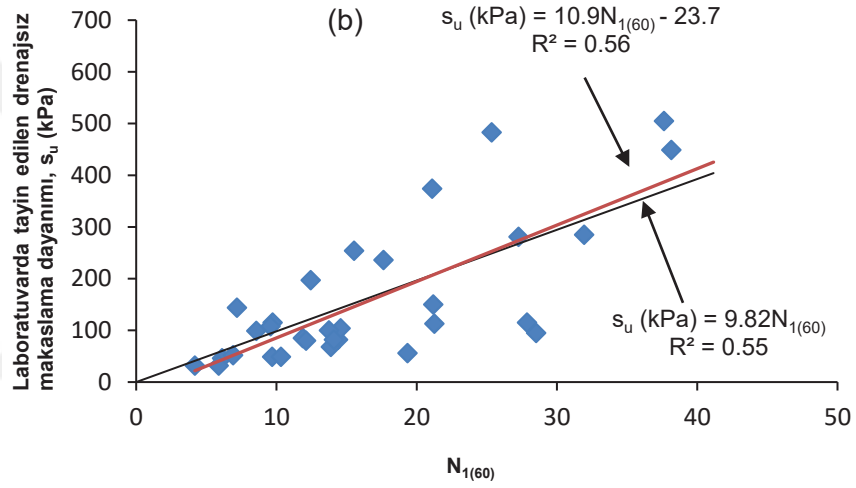
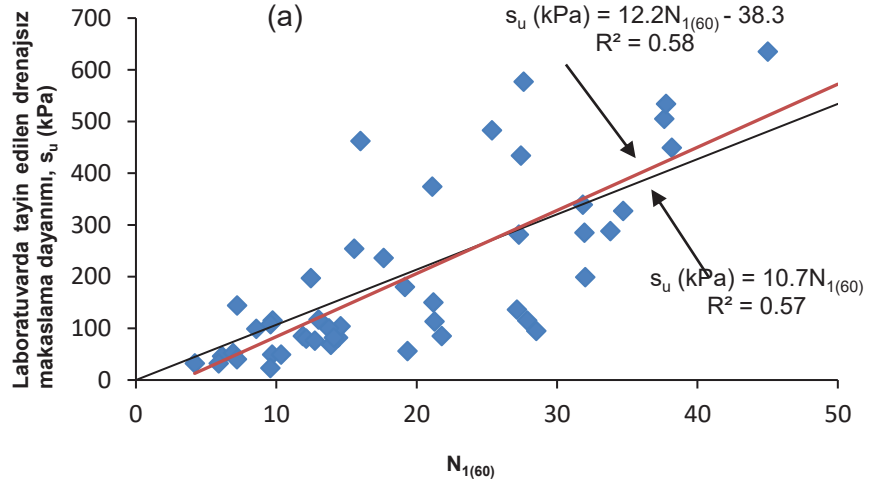
SPT-N ve N_{60} için oluşturulan ilişkilerin tahmin performanslarının ve anlamlılık düzeylerinin (p) belirlenmesi amacıyla yapılan ANOVA analizlerinde (Çizelge 6.2), ilişkilerin tahmin edilen standart hatalarının 56.60 ile 122.14 arasında değiştiği ve tamamı için anlamlılık düzeyinin ($p=0.000$), $p=0.05$ yanılma düzeyinden küçük olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, bu parametreler ile s_u arasında istatistiksel açıdan anlamlı ilişkilerin olduğu tespit edilmiş olup, Çizelge 6.2 incelendiğinde, N ile oluşturulan ilişkilerden çok daha yüksek F değerlerinin elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6.1. (a) Kil, (b) CH sınıfı ve (c) CL sınıfı zeminlerde SPT-N ile s_u arasındaki ilişkiler.



Şekil 6.2. (a) Kil, (b) CH sınıfı ve (c) CL sınıfı zeminlerde N_{60} ile s_u arasındaki ilişkiler.



Şekil 6.3. (a) Kil, (b) CH sınıfı ve (c) CL sınıfı zeminlerde $N_{1(60)}$ ile s_u arasındaki ilişkiler.

Çizelge 6.1. Tez veri tabanındaki killler için s_u ile SPT-N, N_{60} ve $N_{1(60)}$ sayıları arasındaki ilişkiler ve belirleme katsayıları.

Girdi parametresi	Zemin Sınıfı	İlgili Şekil	İlişki No	İlişki	R^2
SPT-N	Kil	Şekil 6.1a	1	$s_u(\text{kPa}) = 5.85N$	0.79
		Şekil 6.1a	2	$s_u(\text{kPa}) = 6.32N - 23.9$	0.80
	CH	Şekil 6.1b	3	$s_u(\text{kPa}) = 5.43N$	0.83
		Şekil 6.1b	4	$s_u(\text{kPa}) = 5.8N - 16.4$	0.83
	CL	Şekil 6.1c	5	$s_u(\text{kPa}) = 6.27N$	0.73
		Şekil 6.1c	6	$s_u(\text{kPa}) = 6.64N - 22.2$	0.74
SPT- N_{60}	Kil	Şekil 6.2a	7	$s_u(\text{kPa}) = 7.39N_{60}$	0.71
		Şekil 6.2a	8	$s_u(\text{kPa}) = 8.08N_{60} - 26.6$	0.71
	CH	Şekil 6.2b	9	$s_u(\text{kPa}) = 6.75N_{60}$	0.72
		Şekil 6.2b	10	$s_u(\text{kPa}) = 7.5N_{60} - 25.6$	0.73
	CL	Şekil 6.2c	11	$s_u(\text{kPa}) = 8.06N_{60}$	0.66
		Şekil 6.2c	12	$s_u(\text{kPa}) = 8.09N_{60} - 1.1$	0.66
SPT- $N_{1(60)}$	Kil	Şekil 6.3a	13	$s_u(\text{kPa}) = 10.7N_{1(60)}$	0.57
		Şekil 6.3a	14	$s_u(\text{kPa}) = 12.2N_{1(60)} - 38.3$	0.58
	CH	Şekil 6.3b	15	$s_u(\text{kPa}) = 9.82N_{1(60)}$	0.55
		Şekil 6.3b	16	$s_u(\text{kPa}) = 10.9N_{1(60)} - 23.7$	0.56
	CL	Şekil 6.3c	17	$s_u(\text{kPa}) = 11.5N_{1(60)}$	0.50
		Şekil 6.3c	18	$s_u(\text{kPa}) = 13.07N_{1(60)} - 45.7$	0.51

R^2 : Belirleme katsayısı

Çizelge 6.2. Basit regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin ANOVA testi sonuçları.

İlişki No	r	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahmin edilen standart hata	ANOVA	
					F	p (anlamlılık)
2	0.894	0.80	0.793	76.68	177.367	0.000
4	0.911	0.83	0.825	56.60	142.151	0.000
6	0.860	0.74	0.717	107.14	39.006	0.000
8	0.845	0.71	0.707	91.20	112.198	0.000
10	0.855	0.73	0.722	71.22	79.096	0.000
12	0.812	0.66	0.632	122.14	26.788	0.000

r: Korelasyon katsayısı R^2 : Belirleme katsayısı

6.1.2. Çoklu regresyon analizleri

Çoklu regresyon analizleri kapsamında ise, bağımlı değişken s_u 'ya karşılık, bağımsız değişkenler N ve N_{60} sayıları sabit olacak şekilde, ince tane oranı ($\dot{I}TO$), plastik limit (PL), plastisite indeksi (I_p), birim hacim ağırlık (γ), doğal su içeriği (w_n) ve toplam gerilme (σ_{vo}) parametreleri girdi olarak seçilmiş olup, farklı kombinasyonlar ile toplamda 126 analiz yapılarak EK 3a'da sunulmuştur. Söz konusu bu analizlerin arasından en yüksek R^2 'ye sahip olan ilişkiler Çizelge 6.3'te sunulmuştur. Ayrıca EK 3a incelendiğinde, birim hacim ağırlık ve toplam gerilmenin girdi parametresi olarak kullanıldığı eşitliklerden elde edilen R^2 'lerin de iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, diğer eşitliklerin sonuçlarına göre önemli bir değişimin olmaması ve bu parametrelerin elde edilmesi için örselenmemiş örnek alınmasının gerekliliğinden dolayı, bunların kullanımının uygulayıcıdan istenmesinin doğru olmayacağı düşünülerek dikkate alınmamıştır.

Basit regresyon analizlerinde olduğu gibi, çoklu regresyon analizleri kapsamında oluşturulan ilişkilerin de ANOVA analizleri yapılarak F - değerleri ve p (anlamlılık) düzeylerine ait sonuçlar Çizelge 6.4'te verilmiştir. Çizelge 6.4 incelendiğinde ilişkilerin tahmin edilen standart hatalarının 75.70 ile 93.02 arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçların basit regresyon analizlerinde $CH - CL$ ayrımı yapılmadan tüm kil zeminler için elde edilmiş hatalara (bkz. Çizelge 6.2) çok benzer olduğu anlaşılmıştır. ANOVA analiz sonuçları dikkate alındığında, bu ilişkilerin tamamının anlamlılık düzeyleri (p) 0.000 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla Çizelge 6.4'teki ilişkilerin, yapılan istatistiksel değerlendirmeler sonucunda s_u 'yu tahmin etmede kullanılabilir olduğu sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, en yüksek F değerinin 20 no'lu ilişkiye ($F=89.991$), ait olması nedeniyle en anlamlı sonucun bu ilişkiden elde edildiği söylenebilir (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.3. Çoklu regresyon analizleriyle s_u 'nın belirlenmesine yönelik oluşturulan eşitlikler.

İlişki girdileri	Zemin Sınıfı	İlişki No	İlişki	R ²
SPT-N	Kil	19	$s_u(\text{kPa}) = 6.32N - 0.051\dot{I}TO - 28.1$	0.800
		20	$s_u(\text{kPa}) = 6.25N - 2.61PL + 31.5$	0.810
		21	$s_u(\text{kPa}) = 6.29N - 0.295I_p - 12.2$	0.798
		22	$s_u(\text{kPa}) = 5.98N - 0.17w_n + 33.4$	0.802
		23	$s_u(\text{kPa}) = 6.2N + 0.353\dot{I}TO - 2.92PL + 8.6$	0.803
		24	$s_u(\text{kPa}) = 6.25N - 0.235\dot{I}TO - 0.47I_p - 24.95$	0.798
		25	$s_u(\text{kPa}) = 5.73N + 0.91\dot{I}TO - 0.271w_n - 7.27$	0.805
		26	$s_u(\text{kPa}) = 6.24N - 2.6PL - 0.031I_p + 32.47$	0.802
		27	$s_u(\text{kPa}) = 6.07N - 1.63PL - 1.0w_n + 44.66$	0.803
		28	$s_u(\text{kPa}) = 5.98N - 1.94w_n + 0.3I_p + 26.92$	0.802
		29	$s_u(\text{kPa}) = 6.17N - 2.88PL - 0.369I_p + 0.49\dot{I}TO + 10.49$	0.803
		30	$s_u(\text{kPa}) = 5.8N - 1.27PL - 2.1w_n + 0.850\dot{I}TO + 4.059$	0.805
		31	$s_u(\text{kPa}) = 5.73N + 0.911\dot{I}TO - 2.7w_n - 0.013I_p - 7.21$	0.805
		32	$s_u(\text{kPa}) = 6.06N - 1.52PL - 1.25w_n + 0.3I_p + 38.94$	0.803
		33	$s_u(\text{kPa}) = 5.8N - 1.3PL - 2.1w_n - 0.74I_p + 0.87\dot{I}TO + 4.5$	0.805
SPT-N ₆₀	Kil	34	$s_u(\text{kPa}) = 8.12N_{60} - 0.40\dot{I}TO + 6.82$	0.715
		35	$s_u(\text{kPa}) = 7.96N_{60} - 4.63PL + 70.2$	0.728
		36	$s_u(\text{kPa}) = 7.96N_{60} - 0.763I_p + 3.7$	0.715
		37	$s_u(\text{kPa}) = 7.01N_{60} - 4.11w_n + 111.55$	0.742
		38	$s_u(\text{kPa}) = 7.95N_{60} + 0.087\dot{I}TO - 4.7PL + 64.54$	0.728
		39	$s_u(\text{kPa}) = 8N_{60} - 0.136\dot{I}TO - 0.66I_p + 10.87$	0.715
		40	$s_u(\text{kPa}) = 6.6N_{60} + 1.45\dot{I}TO - 5.6w_n + 42.63$	0.750
		41	$s_u(\text{kPa}) = 7.92N_{60} - 4.50PL - 0.272I_p + 78.2$	0.728
		42	$s_u(\text{kPa}) = 7.14N_{60} - 0.552PL - 3.9w_n + 115.66$	0.742
		43	$s_u(\text{kPa}) = 7.1N_{60} - 4.8w_n + 1.04I_p + 92.7$	0.745
		44	$s_u(\text{kPa}) = 7.86N_{60} - 4.63PL + 0.46I_p + 0.27\dot{I}TO + 66.51$	0.728
		45	$s_u(\text{kPa}) = 6.6N_{60} - 5.62w_n + 0.015PL + 1.45\dot{I}TO + 42.48$	0.750
		46	$s_u(\text{kPa}) = 6.64N_{60} - 5.75w_n + 1.32\dot{I}TO + 0.412I_p + 40.98$	0.750
		47	$s_u(\text{kPa}) = 7.12N_{60} - 0.22PL - 4.68w_n + 1.03I_p + 94.55$	0.745
		48	$s_u(\text{kPa}) = 6.63N_{60} - 5.8w_n + 0.1PL + 1.33\dot{I}TO + 0.416I_p + 40$	0.750

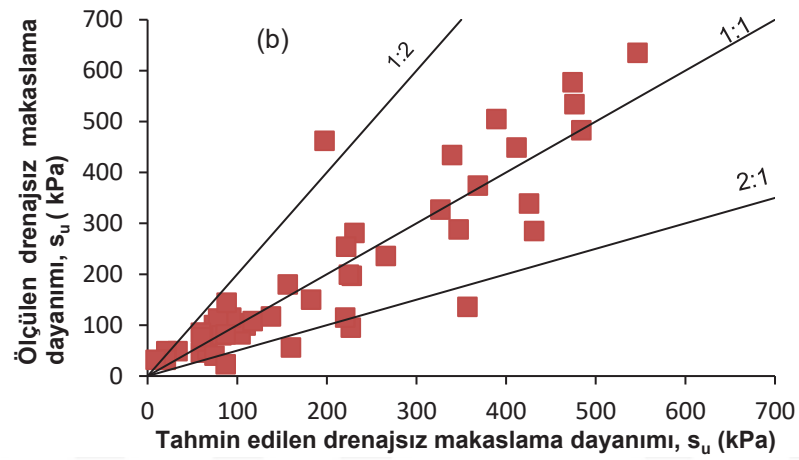
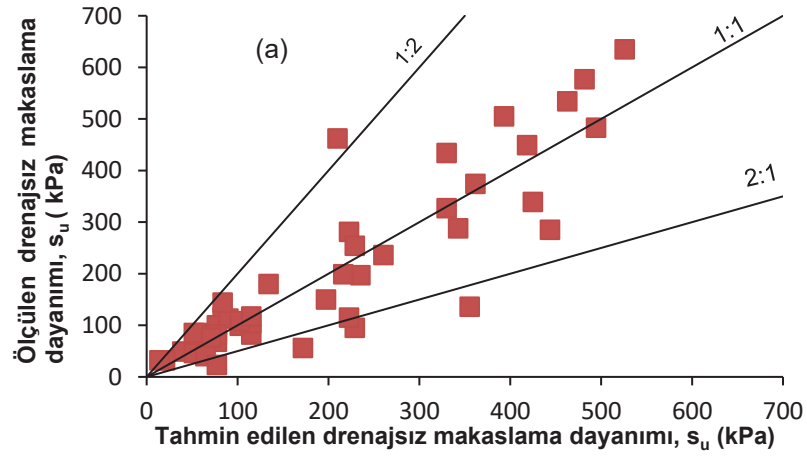
Çizelge 6.4. Çoklu regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin ilişkilerin ANOVA testi sonuçları.

İlişki No	r	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahmin edilen standart hata	ANOVA	
					F	p (anlamlılık)
19	0.894	0.800	0.788	77.54	86.720	0.000
20	0.900	0.810	0.802	75.70	89.991	0.000
21	0.893	0.798	0.789	77.50	86.846	0.000
22	0.895	0.802	0.793	76.73	89.028	0.000
23	0.896	0.803	0.790	77.48	58.268	0.000
24	0.893	0.798	0.784	78.35	56.655	0.000
25	0.897	0.805	0.791	77.07	59.055	0.000
26	0.896	0.802	0.788	77.60	58.045	0.000
27	0.896	0.803	0.789	77.43	58.364	0.000
28	0.896	0.802	0.788	77.56	58.126	0.000
29	0.896	0.803	0.784	78.34	42.758	0.000
30	0.897	0.805	0.787	77.86	43.423	0.000
31	0.897	0.805	0.785	77.97	43.261	0.000
32	0.896	0.803	0.784	78.21	42.806	0.000
33	0.897	0.805	0.782	78.80	33.914	0.000
34	0.845	0.715	0.702	92.09	55.086	0.000
35	0.853	0.728	0.715	89.99	58.734	0.000
36	0.846	0.715	0.702	91.96	55.302	0.000
37	0.861	0.742	0.730	87.54	63.322	0.000
38	0.853	0.728	0.709	91.02	38.273	0.000
39	0.846	0.715	0.696	93.02	36.042	0.000
40	0.866	0.750	0.732	87.28	42.880	0.000
41	0.853	0.728	0.709	90.99	38.305	0.000
42	0.862	0.742	0.724	88.53	41.280	0.000
43	0.863	0.745	0.727	88.14	41.769	0.000
44	0.853	0.728	0.702	92.03	28.096	0.000
45	0.866	0.750	0.726	88.31	31.412	0.000
46	0.866	0.750	0.726	88.26	31.465	0.000
47	0.863	0.745	0.720	89.18	30.601	0.000
48	0.866	0.750	0.719	89.33	24.573	0.000

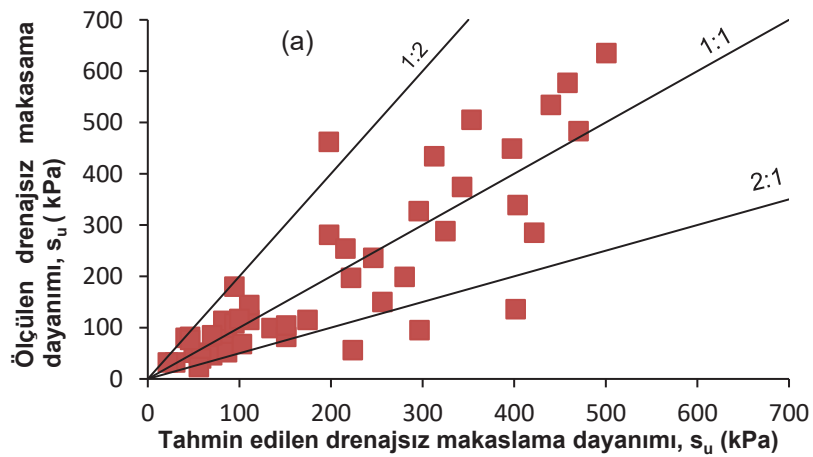
r: Korelasyon katsayısı R²: Belirleme katsayısı

6.1.3. Genel değerlendirme

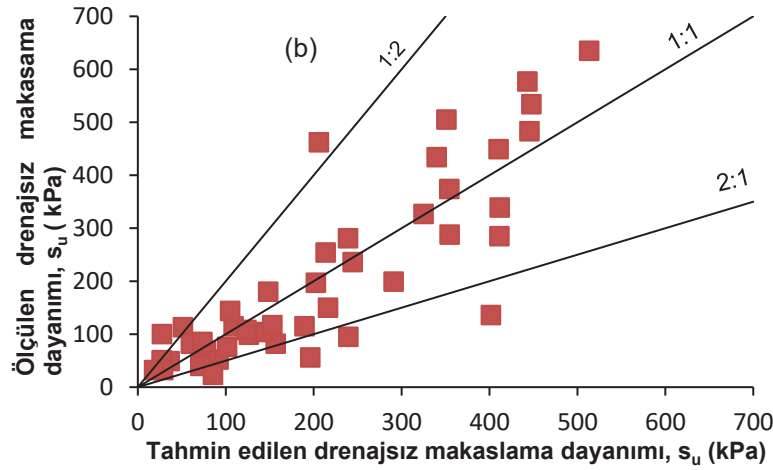
Yukarıda yapılan değerlendirmelerin sonucunda; izelge 6.1 ve 6.3'te killer için verilen ilişkilerin birbirine yakın belirleme katsayılarına sahip oldukları, çok az daha iyi olmakla birlikte basit regresyon analizlerinde en anlamlı sonucun N 'nin girdi olduğu 2 no'lu ilişkiden (bkz. Çizelge 6.1), oklu regresyon analizlerinden ise N ve PL 'nin girdi oldukları 20 no'lu ilişkiden (bkz. Çizelge 6.3) elde edildiği belirlenmiştir. Bu ilişkiler kullanılarak tahmin edilen s_u değerlerinin UU üç eksenli sıkışma deneylerinden belirlenenlerle karşılaştırılması için şekil 6.4'te verilen 1:1 grafikleri hazırlanmıştır. Bu grafiklerden görüldüğü üzere, her iki ilişkiden elde edilen s_u değerlerinin, birkaçı haricinde genellikle 1:1 çizgisi etrafında yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Bu belirlemeler ışığında, çoklu regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin, basit regresyon analizleriyle elde edilenlere belirgin bir üstünlüğünden söz edilemez. Bununla birlikte, s_u 'nun tahmininde 2 no'lu ilişki kullanılarak sadece N sayısı yeterli olurken, 20 no'lu ilişkinin kullanılması durumunda ise, laboratuvar deneyleriyle PL 'nin de belirlenmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, daha önce de değinildiği üzere, her ne kadar N_{60} 'ın girdi olduğu ilişkilerden daha düşük belirleme katsayıları elde edilmiş olsa da (bkz. Çizelge 6.1 ve 6.3), Bölüm 5.1'de değinilen hususlar nedeniyle, N_{60} sayısı kullanılarak oluşturulan ilişkilerin farklı tip ve enerji oranlarına sahip SPT sonuçlarının elde edildiği çalışmalarda kullanılması daha sağlıklı olacaktır. Bu nedenle, N_{60} sayısı kullanılarak basit regresyon analizlerinden en anlamlı sonucun elde edildiği 8 no'lu ilişki ve çoklu regresyon analizlerinden elde edilen N_{60} ve w_n 'nin girdi olduğu 37 no'lu ilişki aracılığıyla tahmin edilen s_u değerleri için de karşılaştırma grafikleri hazırlanmıştır (şekil 6.5). şekil 6.5 incelendiğinde, her iki ilişkinin de birbirine karşı belirgin bir performans üstünlüğünün olmadığı görülmektedir. Ancak yukarıda N ile oluşturulan ilişkilerde değinildiği gibi, N_{60} sayısıyla oluşturulanlarda da 8 no'lu ilişkinin kullanılmasında sadece N_{60} sayısı yeterliyken, 37 no'lu ilişkinin kullanılması durumunda ise, w_n 'nin laboratuvarında belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 6.4. (a) 2 no'lu ve (b) 20 no'lu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u değerleri ile laboratuvar da belirlenmiş $s_{u(ölçülen)}$ değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.5. (a) 8 no'lu ve (b) 37 no'lu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u değerleri ile laboratuvar da belirlenmiş $s_{u(ölçülen)}$ değerlerinin karşılaştırılması.

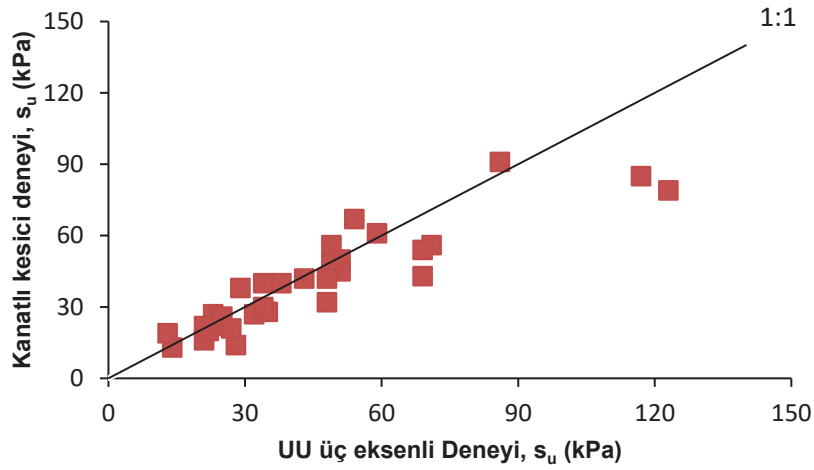


Şekil 6.5. (devam ediyor)

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar (bkz. Çizelge 6.1) ile daha önceki çalışmaların sonuçları (bkz. Çizelge 3.8) kıyaslandığında ise, kil zeminler için SPT-N sayılarından basit regresyon analizleriyle oluşturulan $s_u = xN$ ve $s_u = xN + y$ eşitliklerindeki “x” katsayılarının Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974), İyisan ve Ansal (1990), Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006)’un önerdikleriyle uyumlu oldukları gözlenmiştir. CH ve CL sınıfındaki zeminler için ayrı ayrı belirlenen eşitliklerdeki katsayılar incelendiğinde ise, CL zeminler için literatürdeki araştırmacıların çalışmalarına kıyasla nispeten yüksek katsayılar, CH zeminler içinse Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006)’un önerdikleri katsayılarla benzer değerler elde edilmiştir. N_{60} ile belirlenen ilişkilerdeki x katsayılarının ise, Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006)’un elde ettikleriyle benzer olduğu görülmüştür. Literatürde mevcut olan s_u - SPT-N ilişkilerinin farklılık göstermesine, ülkeden ülkeye değişiklik gösteren SPT ekipmanları ile özellikle E_r değerlerindeki farklılıkların neden olduğu düşünülmektedir. s_u ile N_{60} arasındaki farklı sonuçların elde edilmesine ise, N_{60} ’ın hesaplanmasında tercih edilen yöntemlerdeki farklılıklar, deney aletine göre değişen enerji oranı (E_r) değerlerinin doğrudan ölçülmesi yerine literatürde önerilen değerlerden belirlenmesi, operatör hataları, ekipmanın standartlara uygun olmaması, eşitliklerin oluşturulmasındaki killerin oluşum süreçlerindeki farklılıkların, vb. gibi etkilerin neden olabileceği düşünülmektedir.

6.2. CPT Verisi İle Drenajsız Makaslama Dayanımının Belirlenmesi

CPTu verilerinden (bkz. EK 1b) s_u 'nun tahminine yönelik yapılan analizlerde, kanatlı kesici deneylerinden belirlenen s_u 'ların kullanımı tercih edilmeyerek, sadece UU üç eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen s_u 'lar kullanılmıştır. Bu durumun nedeni, her iki deneyden elde edilen s_u 'ların hemen hemen aynı seviyeye denk gelmesi ve Şekil 6.6'da görüldüğü üzere her iki yöntemden elde edilen s_u 'ların, birkaç veri dışında birbirlerine çok benzer olmasıdır. Ayrıca, söz konusu deney seviyeleri için aynı CPT parametrelerine karşılık gelen birden fazla ve birbirine çok yakın olan s_u verisinin analizlere katılması, istatistiksel değerlendirmelerde bu s_u seviyelerine ait veri çiftlerinin ağırlığının artırılmasına neden olacaktır.

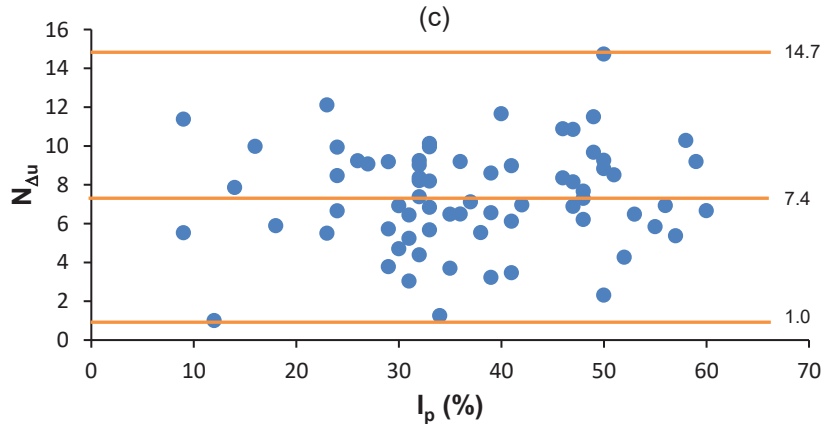
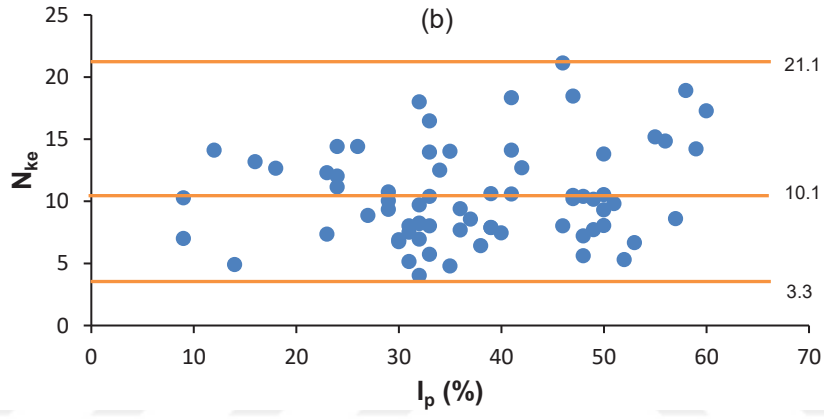
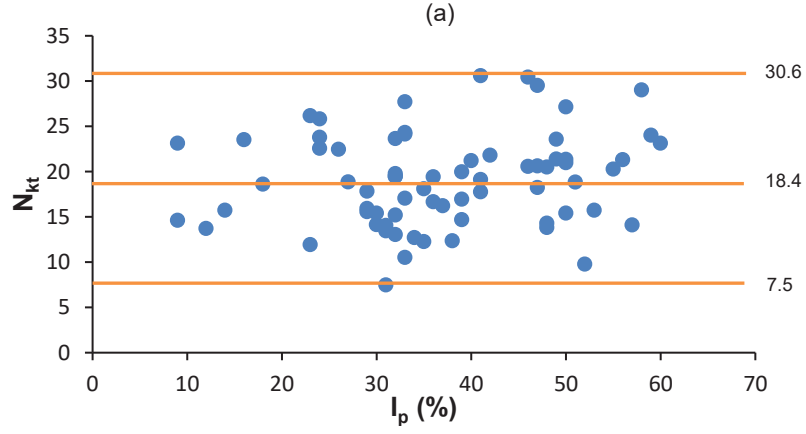


Şekil 6.6. Kanatlı kesici deneylerinde belirlenmiş s_u 'ların UU üç eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen s_u 'lar ile karşılaştırılması.

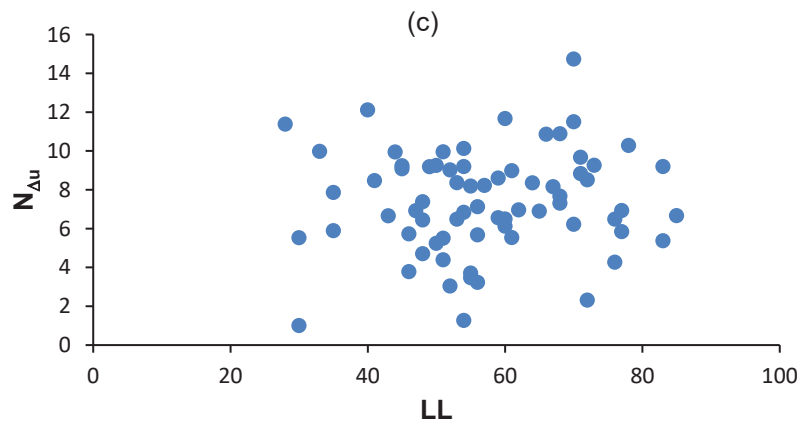
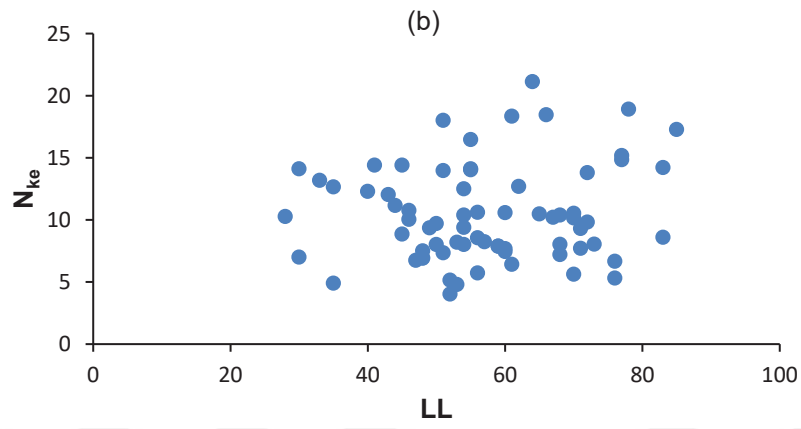
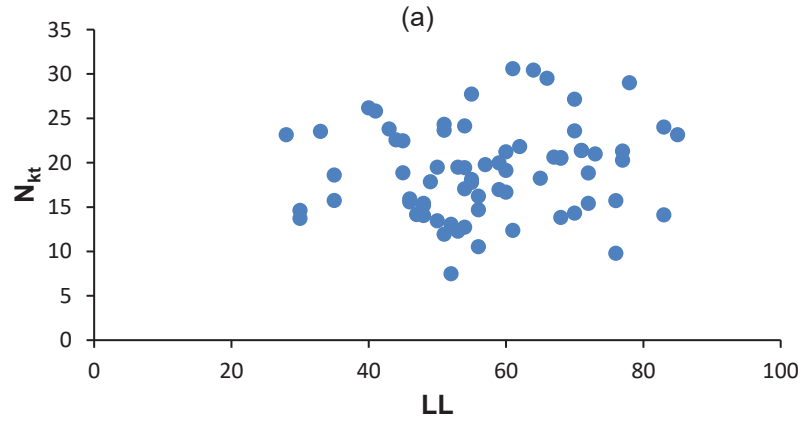
Bölüm 3.2'de de değinildiği gibi, CPT verisi ile s_u 'nun belirlenmesi amacıyla yapılan önceki çalışmalarda, daha çok teorik olarak belirlenen s_u eşitliklerindeki koni faktörlerinin tahminine odaklanılmıştır. Bu çalışmalarda, koni faktörlerinin tahmini için ya sabit bir değer, ya değişim aralığı ya da bazı zemin parametrelerinin kullanıldığı görgül ilişkiler önerilmiştir. Literatürdeki araştırmalarda belirlenen koni faktörlerinin değişim aralıkları (bkz. Bölüm 3.2) ile bu çalışmadaki veri tabanı kullanılarak hesaplanan koni faktörlerinin değişim aralıkları Bölüm 5.2'de birbirleriyle karşılaştırılmış ve birbirlerine benzer olduklarına değinilmiştir. Koni faktörleri ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişkilerin araştırıldığı önceki çalışmalarda ise, bazı araştırmacılar plastisite indeksinin azalmasına karşılık koni faktörünün arttığını

belirtirken, bazıları azaldığını ifade etmektedir. Bazısı ise, iki parametre arasında ilişki olmadığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, diğer araştırmacılar bu konu hakkında herhangi bir yorum yapmamışlardır (bkz. Bölüm 3.2, Çizelge 3.11 ve 3.12). Bu belirsizlik dikkate alınarak, tez kapsamında derlenen veri için bir değerlendirme yapılmıştır. Şekil 6.7’de koni faktörlerinin I_p ’ye bağlı değişimlerini gösteren grafikler sunulmuştur. Bu grafiklerdeki verinin dağılımından görüldüğü üzere, tez kapsamında değerlendirilen veri için koni faktörleri ile I_p arasında anlamlı bir ilişkinin varlığından söz etmek mümkün değildir. Buna benzer olarak, koni faktörleriyle LL ve OCR arasındaki karşılaştırma grafiklerinde de anlamlı bir ilişkinin olmadığı anlaşılmıştır (Şekil 6.8 ve 6.9). Şekil 6.9’daki OCR değerlerinin bir kısmı veri tabanında bulunmakla birlikte, bir kısmı bulunmamaktadır. Veri tabanında derlenen kil seviyeleri için genel bir değerlendirmenin yapılabilmesi amacıyla OCR değerlerinin olmadığı seviyeler, Karlsrud ve ark. (2005) tarafından önerilen ilişki (bkz. Eş 3.22) aracılığıyla belirlenmiştir.

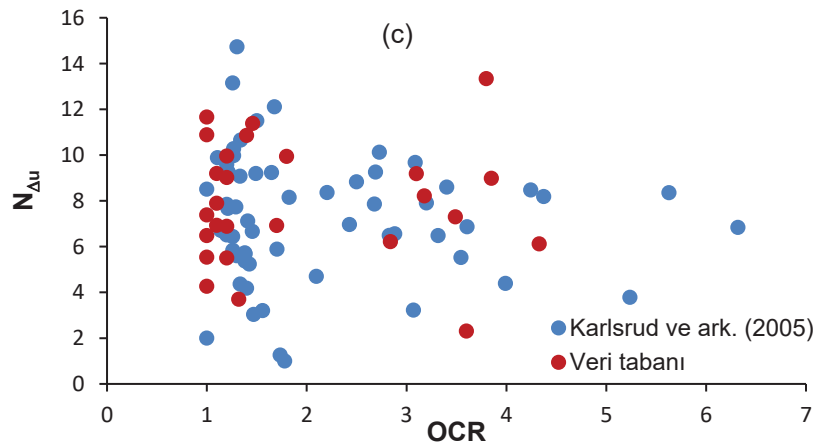
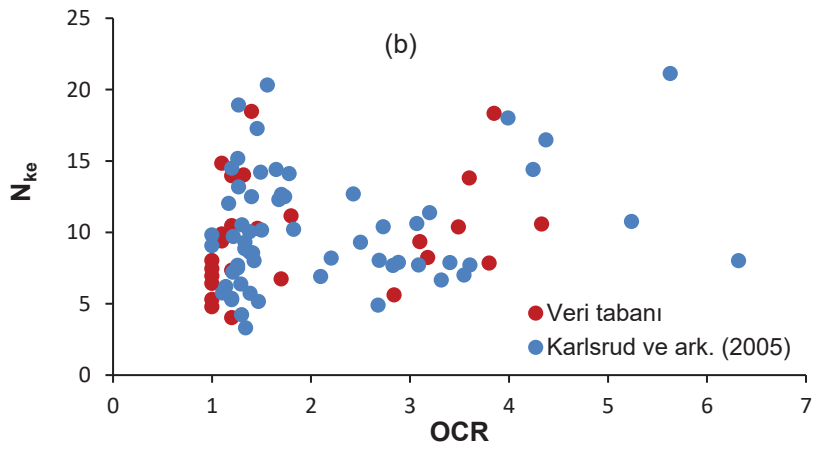
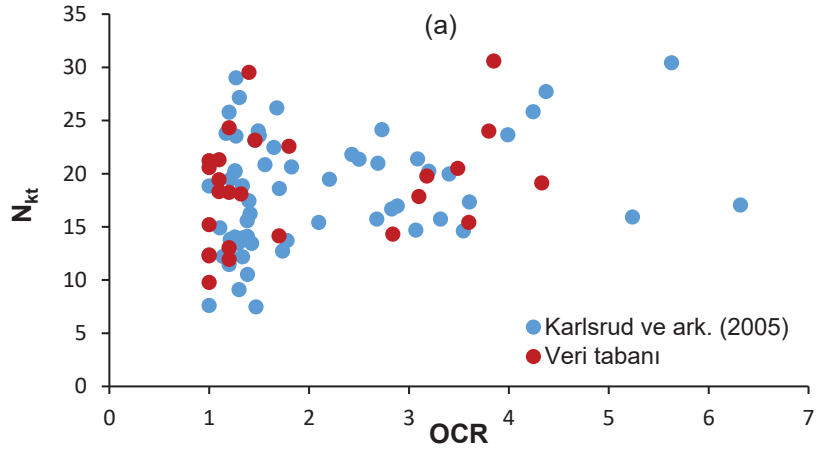
Koni faktörleri N_{ke} ve $N_{\Delta u}$ ile boşluk suyu basıncı oranı (B_q) arasında literatürde önerilen formattaki (kırmızı renkli ilişki çizgileri) (Örneğin, Karlsrud ve ark., 2005 Hong ve ark., 2010; Remai, 2013) ve veri için en yüksek korelasyonu veren ilişkiler (siyah renkli ilişki çizgileri) Şekil 6.10’da sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde, literatürde önerilen formattaki ilişkiler kullanıldığında daha düşük korelasyon katsayılarının elde edildiği görülmektedir. Daha yüksek korelasyon katsayıları elde edilen ilişkilerin s_u ’yu tahmin performansları ve anlamlılık düzeylerinin belirlenmesi amacıyla yapılan ANOVA analizlerinden, $p=0.05$ yanılma düzeyinden küçük değerler ($p=0.000$) elde edilmesi nedeniyle, bu ilişkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır (Çizelge 6.5).



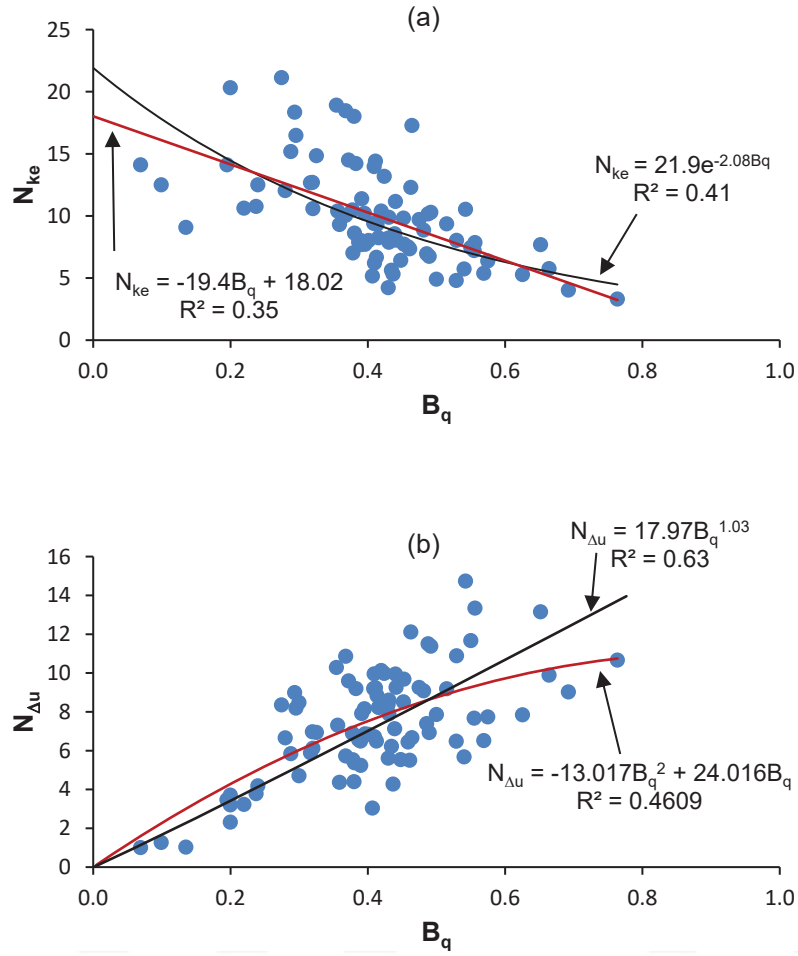
Şekil 6.7. (a) N_{kt} , (b) N_{ke} ve (c) $N_{\Delta u}$ Koni faktörlerinin plastisite indeksine (I_p) göre değişimleri.



Şekil 6.8. (a) N_{kt} , (b) N_{ke} ve (c) $N_{\Delta u}$ Koni faktörlerinin likit limite (LL) göre değişimleri.



Şekil 6.9. (a) N_{kt} , (b) N_{ke} ve (c) $N_{\Delta u}$ Koni faktörlerinin aşırı konsolidasyon oranına (OCR) göre değişimleri.



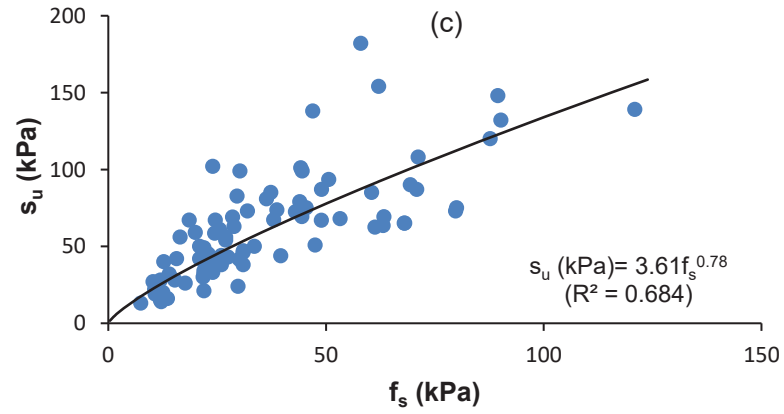
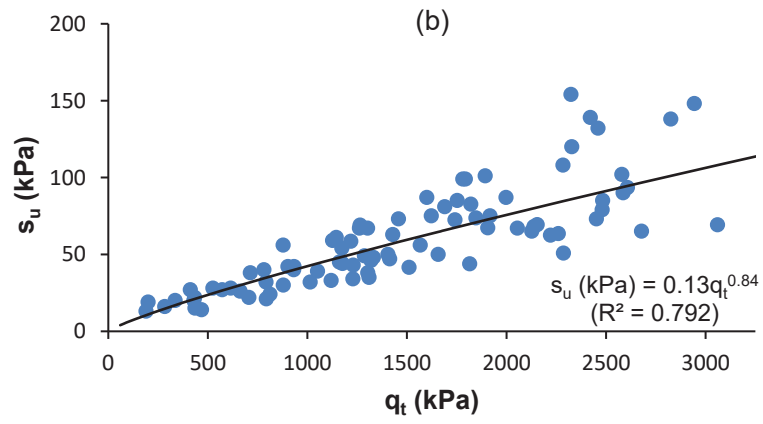
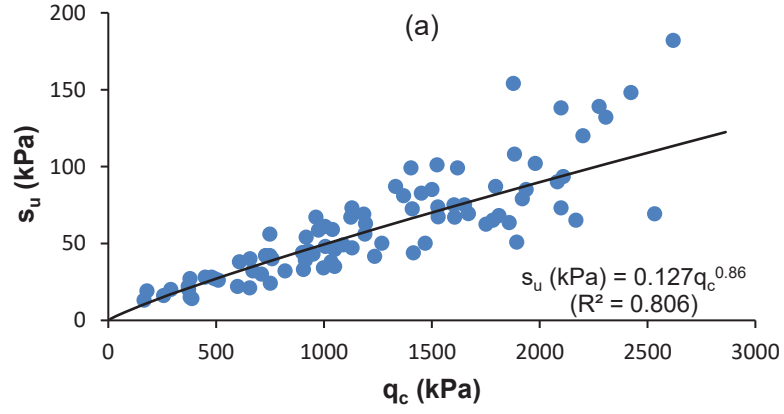
Şekil 6.10. (a) N_{ke} ve (b) N_{Au} Koni faktörleri ile boşluk suyu basıncı oranı (B_q) arasındaki ilişkiler.

Çizelge 6.5. Koni faktörü N_{ke} ve N_{Au} 'nın B_q 'dan belirlenmesi için oluşturulan görgül ilişkiler için yapılan ANOVA testi sonuçları.

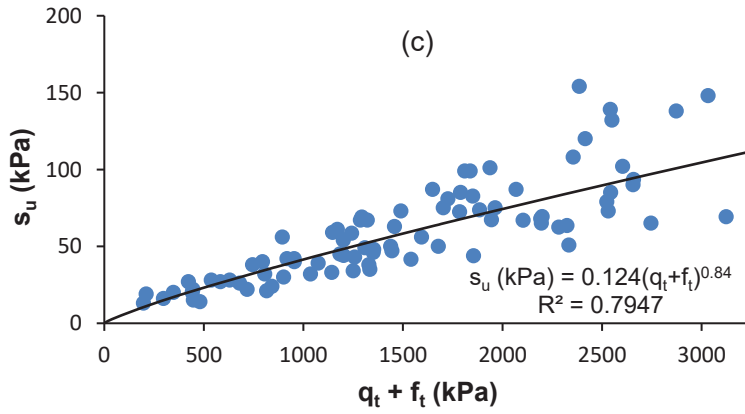
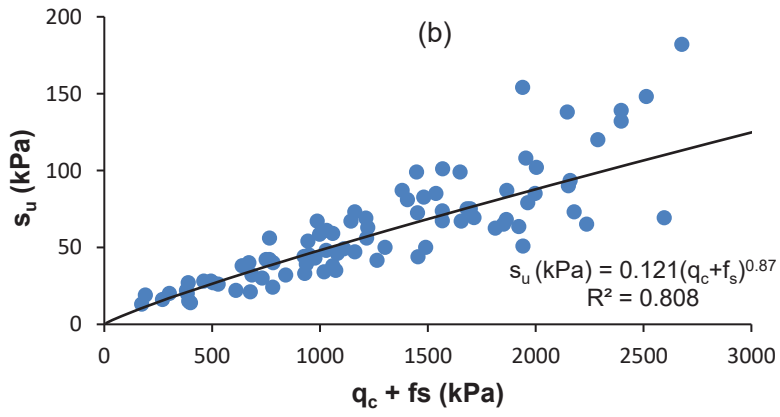
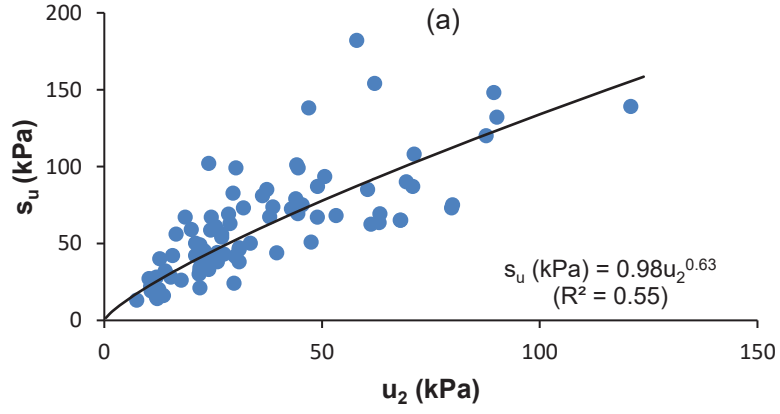
İlişki No	İlişki	İlgili Şekil	r	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahmin edilen standart hata	ANOVA	
							F	p (anlamlılık)
49	$N_{ke} = 21.9e^{-2.08B_q}$	Şekil 6.9a	0.64	0.41	0.409	0.326	33.216	0.000
50	$N_{Au} = 17.97B_q^{1.03}$	Şekil 6.9b	0.79	0.63	0.621	0.354	122.06	0.000

r: Korelasyon katsayısı R^2 : Belirleme katsayısı

Koni faktörlerinin belirlenmesine yönelik görgül ilişkilerin araştırılmasının yanı sıra, doğrudan CPTu parametreleri ile s_u değerleri arasındaki görgül ilişkiler de araştırılmıştır. Bu kapsamda; konik uç direnci (q_c), sürtünme direnci (f_s), koni arkasında ölçülen boşluk suyu basıncı (u_2), düzeltilmiş konik uç direnci (q_t), sürtünme oranı (R_f) normalize edilmiş sürtünme oranı (F_r), ve normalize edilmiş koni direnci (Q_t) değerlerinden s_u 'nın tahmini için regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizler, yukarıda değinilen parametrelerin her biri ile s_u arasındaki ilişkilerin yanı sıra, bunların farklı kombinasyonları ile s_u arasındaki olası ilişkilerin değerlendirilmesi için de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tüm analizlerde doğrusal ve doğrusal olmayan fonksiyonlar denenmiştir. Bu analizlerde, R_f , F_r ve Q_t parametrelerinin girdi olduğu ilişkilerden daha düşük belirleme katsayıları elde edilmiştir. Diğer parametrelerin kullanıldığı ilişkiler arasında ise, hesaplanmış belirleme katsayılarına (R^2)'na göre, tüm veri çiftleri için veri dağılımının en iyi üssel ilişkilerle temsil edildiği belirlenmiştir. Şekil 6.11 ve 6.12'de üssel fonksiyona ait grafikler ve ilgili eşitlikler sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde, s_u 'nun f_s (Şekil 6.11c) ve u_2 (Şekil 6.12a) ile arasındaki ilişkilerden nispeten düşük R^2 'ler belirlenmiştir. q_c ve q_t ile birleştirilmiş parametreler " q_c+f_s " ve " q_t+f_t "lerin girdi oldukları ilişkilerden ise, birbirine çok yakın ve yüksek R^2 'lerin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.11. s_u ile (a) q_c , (b) q_t ve (c) f_s arasında en yüksek belirleme katsayısına sahip ilişkiler.



Şekil 6.12. s_u ile (a) u_2 , (b) $(q_c + f_s)$ ve (c) $(q_t + f_t)$ arasında en yüksek belirleme katsayısına sahip ilişkiler.

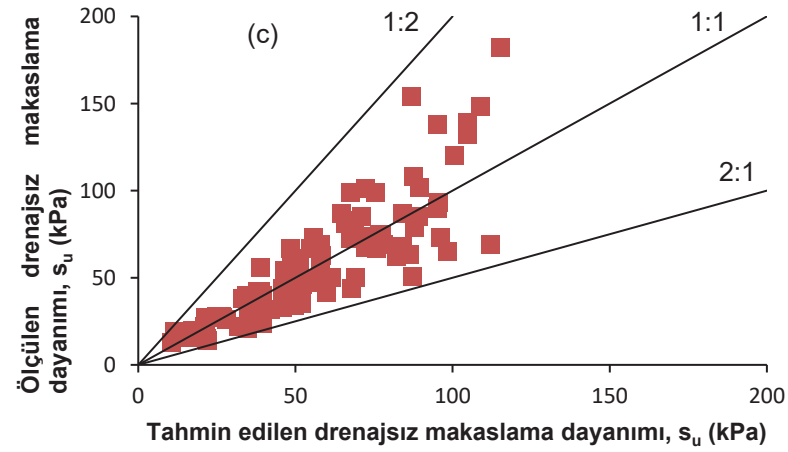
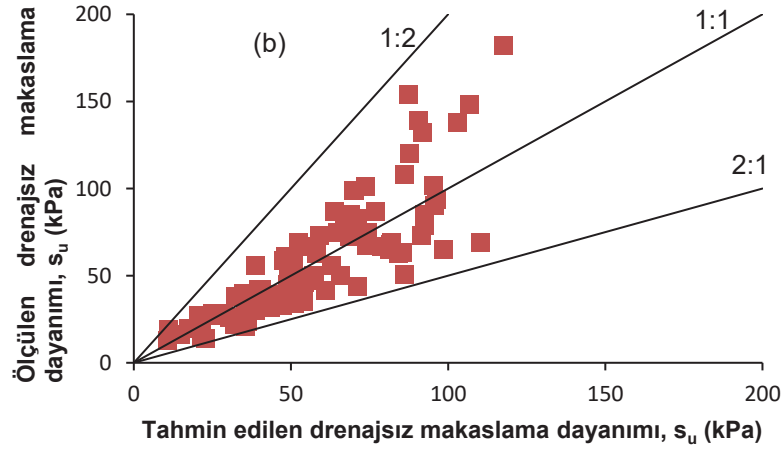
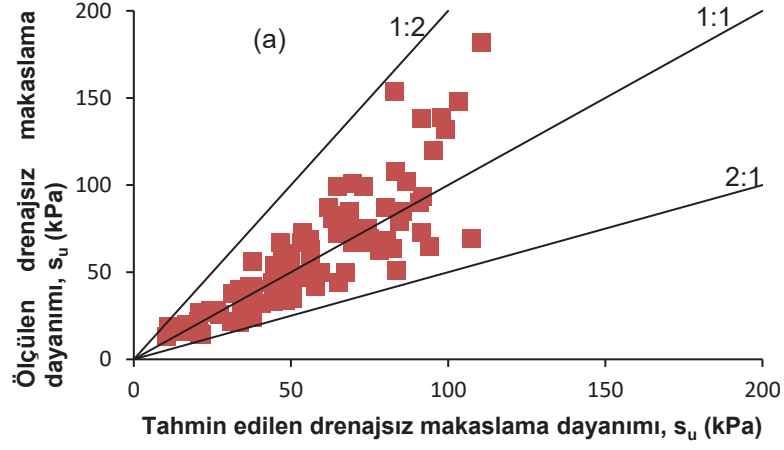
CPTu parametreleriyle oluşturulan ilişkilerin anlamlılıklarının ve tahmin güçlerinin belirlenmesi amacıyla ANOVA analizleri yapılmıştır (Çizelge 6.6). Çizelge 6.6 incelendiğinde, oluşturulan ilişkilerin standart hatalarının 0.260 ile 0.397 arasında düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. F değerlerinin, f_s ve u_2 girdi parametreleri ile oluşturulan ilişkiler için sırasıyla 184 ve 105 iken, diğer ilişkiler için birbirine çok yakın değerler aldığı (324 ile 353 arasında) ve tamamı için anlamlılık düzeylerinin ($p=0.000$), $p=0.05$ yanılma düzeyinden küçük olduğu belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda s_u 'nun tahmininde, daha yüksek R^2 'lere ve daha yüksek F değerlerine sahip olan Çizelge 6.6'daki 51, 52, 55 ve 56 no'lu ilişkilerin tahmin gücünün daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Bu ilişkiler aracılığıyla hesaplanan s_u değerleri ile UU üç eksenli deneylerden belirlenenler Şekil 6.13'deki grafiklerde karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi, bu dört ilişki aracılığıyla elde edilen s_u değerlerinin, birkaçı dışında, 1:1 çizgisiyle uyumlu olduğu ve ilişkilerin birbirlerine karşı belirgin bir üstünlüğünün olmadığı söylenebilir.

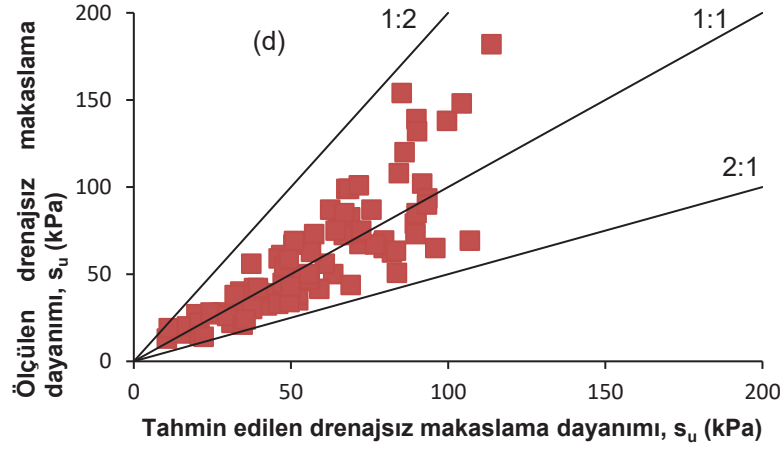
Çizelge 6.6. s_u 'nun belirlenmesine yönelik oluşturulan ilişkiler.

İlişki No	İlişki	İlgili Şekil	r	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahmin edilen standart hata	ANOVA	
							F	p (anlamlılık)
51	$s_u = 0.127q_c^{0.86}$	Şekil 6.10a	0.900	0.806	0.804	0.261	353.477	0.000
52	$s_u = 0.13q_t^{0.84}$	Şekil 6.10b	0.890	0.792	0.790	0.270	324.179	0.000
53	$s_u = 3.61f_s^{0.78}$	Şekil 6.10c	0.830	0.684	0.68	0.333	183.785	0.000
54	$s_u = 0.98u_2^{0.63}$	Şekil 6.11a	0.740	0.55	0.545	0.397	104.061	0.000
55	$s_u = 0.121(q_c + f_s)^{0.87}$	Şekil 6.11b	0.900	0.808	0.805	0.260	356.971	0.000
56	$s_u = 0.124(q_t + f_t)^{0.84}$	Şekil 6.11c	0.891	0.795	0.792	0.269	329.018	0.000

r: Korelasyon katsayısı R^2 : Belirleme katsayısı



Şekil 6.13. (a) 51, (b) 52, (c) 55 ve (d) 56 no'lu ilişkiler aracılığıyla belirlenen s_u değerleri ile UU üç eksenli deneylerden belirlenenlerin karşılaştırılması.



Şekil 6.13. (devam ediyor)

Basit regresyon analizleriyle ilişkilerin araştırılmasına ek olarak, s_u bağımlı değişken, bağımsız değişkenler q_t , f_s , u_2 , w_n , $\dot{I}TO$, σ_{vo} , LL , I_p ve kil oranı olacak şekilde çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, farklı kombinasyonlar denenerek 512 adet çoklu regresyon analizi yapılmış ve bunların arasından en yüksek sonuçları verenler Ek 3b'de sunulmuştur. Ek 3b incelendiğinde, elde edilen ilişkilerde en yüksek düzeltilmiş belirleme katsayısı (R^2)'nin 0.78'e ulaşabildiği tespit edilmiştir. Bu değer, basit regresyon analizlerinden elde edilenlere göre bir miktar daha düşüktür. Buna ek olarak, bu ilişkilerin uygulamada kullanılabilmesi için CPT deneyine ek olarak bu parametrelerin belirlenmesi için örnekleme ve laboratuvar deneylerinin yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenlerle, çoklu regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkiler yerine, Çizelge 6.6'da önerilen ilişkilerin kullanılmasının doğru olacağı anlaşılmaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) parametreleri ile killerin drenajsız makaslama dayanımının (s_u) kestirimine yönelik değerlendirmelerin yapıldığı bu tez çalışması kapsamında ulaşılan başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

(1) Literatürdeki SPT verisini esas alan ilişkiler arasından tez kapsamında derlenen s_u verisini en iyi tahmin edenlerin, Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974), İyisan ve Ansal (1990), Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006) tarafından önerilenler olduğu görülmüştür. Bu ilişkilerin tahmin performansları, literatürde önerilen diğer ilişkilerden elde edilenlere nazaran oldukça yüksek çıkmıştır.

(2) Özellikle 2000'li yıllardan önceki çalışmalarda önerilen eşitlikler için hazırlanan ve ölçülen ile tahmin edilen s_u 'ların karşılaştırıldığı 1:1 grafiklerinde, birkaçı dışında, SPT-N verisiyle oluşturulan s_u tahmin eşitliklerinden elde edilen verinin dağılımı, dayanım artışına bağlı olarak 1:1 çizgisinden belirli bir eğilimle sapma göstermektedir. Bu durum, tez verisinin alındığı SPT ekipmanı ile önceki çalışmalardaki veriye esas olan ekipman arasında, özellikle E_r değerleri bakımından, farklılıkların olabileceğine işaret etmektedir. Bu eşitliklerin oluşturulması sırasında kullanılan SPT-N sayılarının hangi E_r için belirlendiği bilinmediği için, uygulayıcıların bu eşitliklerden yararlanmaması gerektiği düşünülmektedir.

(3) Literatürde N_{60} kullanılarak oluşturulan ilişkilerin, SPT-N sayılarının 60 enerji oranına göre düzeltme yapılmış olması nedeniyle daha sağlıklı olduğu düşünülebilir. Ancak, N_{60} 'ın girdi olduğu bazı s_u tahmin eşitlikleri için $s_{u(tahmin)}$ değerlerinin 1:1 çizgisinden bir ölçüde saptıkları görülmektedir. Bu nedenle, E_r 'nin yanı sıra, literatürdeki çalışmalarda SPT'lerin yapıldığı kohezyonlu zeminlerin başka özelliklerinin de etkili olabileceği akla gelmektedir. Bununla birlikte, kullanılan ekipmanların aktarmaları gereken enerji oranlarının uygulamada tam olarak aktarılamaması da bu tür sapmalara neden olunabilir. Buna ek olarak, N_{60} 'ın hesaplanmasında tercih edilen yöntemlerdeki farklılıklar, deney aletine göre

değişen enerji oranı (E_r) değerlerinin doğrudan ölçülmesi yerine literatürde ekipman türüne göre önerilen değerlerinin kullanılması, operatör hataları, ekipmanın standartlara uygun olmaması, eşitliklerin oluşturulmasındaki killerin oluşum süreçlerindeki farklılıkların da etken olabileceği düşünülmektedir.

(4) SPT-N, N_{60} ve $N_{1(60)}$ sayılarıyla s_u 'nun tahmini için tez verisini en iyi temsil eden görgül eşitlikler basit regresyon analizleriyle araştırılmıştır. SPT-N sayıları ile s_u arasında oluşturulan ilişkilerin belirleme katsayılarının, N_{60} sayıları ile oluşturulanlardan daha yüksek olduğu, $N_{1(60)}$ sayıları ile oluşturulan ilişkilerin belirleme katsayılarının ise, SPT-N ve N_{60} sayılarından belirlenenlere oranla belirgin bir şekilde düşük kaldığı görülmüştür. Ayrıca oluşturulan tüm ilişkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ANOVA analizleriyle belirlenmiştir. Kil zeminler için SPT-N sayılarından basit regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin Terzaghi ve Peck (1967), Stroud (1974), İyisan ve Ansal (1990) ve Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006) önerdikleriyle, N_{60} ile belirlenen ilişkilerin ise, Sivrikaya ve Toğrol (2002 ve 2006)'un önerdikleriyle benzer olduğu saptanmıştır.

(5) s_u 'nun tahmini için çoklu regresyon analizleri kapsamında, N , N_{60} sayıları sabit olacak şekilde diğer bazı zemin parametrelerinin (örneğin PL, I_p , w_n , İTO) kullanımı ile oluşturulan farklı kombinasyondaki ilişkilerin belirleme katsayılarının, basit regresyon analizlerinden elde edilenlerle kıyaslandığında önemli miktarda değişmediği görülmüştür. Dolayısıyla, tez kapsamında derlenen killer için s_u değerlerinin belirlenmesinde basit regresyon eşitliklerinin kullanılmasının yeterli olabileceği anlaşılmıştır.

(6) CPT verisinden s_u tahmini için yararlanılan koni faktörlerinin (N_{kt} , N_{ke} ve $N_{\Delta u}$) görgül eşitliklerle belirlenmesinin önerildiği yaklaşımlar için yapılan değerlendirmelerde, Larsson ve Mulabdic (1991), Larsson ve Ahnberg (2005), Hong ve ark. (2010), Shin ve Kim (2011), Remai (2013) ve Westerberg, Müller ve Larsson (2015) tarafından önerilen görgül eşitliklerin, tez veri tabanındaki deneylerle belirlenmiş s_u verisini kabul edilebilir düzeylerde tahmin edebildiği görülmüştür.

(7) Tez veri tabanındaki killerde elde edilen CPT parametreleri ile s_u değerleri dikkate alınarak hesaplanan koni faktörlerinin (N_{kt} , N_{ke} ve $N_{\Delta u}$) değişim aralıklarının, literatürde önerilen koni faktörlerinin değerleri ya da değişim aralıklarından biraz daha geniş olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, koni faktörlerinin belirlenmesine yönelik literatürde önerilen formatta ilişkiler araştırılmıştır. Bu kapsamda; derlenen veri tabanı için koni faktörleri ile laboratuvarında belirlenen zemin parametreleri I_p , LL ve OCR arasında anlamlı bir istatistiksel ilişki elde edilememesine rağmen, koni faktörleri N_{ke} ve $N_{\Delta u}$ ile boşluk suyu basıncı oranı (B_q) arasında ANOVA analizleri sonucunda istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

(8) Doğrudan CPT_u parametreleri ile s_u ve bu parametrelerin farklı kombinasyonları ile s_u arasındaki olası ilişkiler basit regresyon analizleriyle araştırılmıştır. Yapılan tüm analizlerde doğrusal ve doğrusal olmayan fonksiyonlar denenmiş, bu değerlendirmeler sonucunda, hesaplanmış belirleme katsayılarına göre tüm veri çiftleri için veri dağılımlarının en iyi üssel ilişkilerle temsil edildiği belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda; konik uç dirençleri q_c ve q_t ile birleştirilmiş parametreler " q_c+f_s " ve " q_t+f_t "lerin girdi oldukları ilişkilerden, birbirine çok yakın ve yüksek belirleme katsayılarının elde edildiği görülmüştür.

(9) Çoklu regresyon analizlerinden yararlanılarak CPT_u ve bazı zemin parametrelerinin farklı kombinasyonlarıyla oluşturulan ilişkilerin belirleme katsayılarının, basit regresyon analizlerinden elde edilenlere göre bir miktar daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, bu ilişkilerin uygulamada kullanılabilmesi için CPT deneyine ek olarak ilişkilerdeki zemin parametrelerinin belirlenmesi için örnekleme ve laboratuvar deneylerinin yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, çoklu regresyon analizleriyle oluşturulan ilişkilerin yerine, basit regresyon analizleriyle belirlenen ilişkilerin kullanılmasının yeterli olacağı sonucuna varılmıştır.

SPT verisiyle s_u tahminine ilişkin çalışmaların farklı lokasyonlardaki ve farklı özelliklerdeki killere için yapılarak veri tabanının genişletilmesi ve s_u 'nun tahmini için genel ya da bölgesel yaklaşımların ortaya konulması halen bir gereklilik olarak görülmektedir. Bununla birlikte, bu tür çalışmalarda deneyde aktarılan enerji oranlarının ekipman türüne bağlı olarak önerilen değerlerden seçilmesi yerine ölçülmesinin, daha kaliteli bir veri tabanının oluşturulması için önemli olduğu düşünülmektedir. CPT verisinden s_u 'nun belirlenmesi için literatürde önerilen yaklaşımlardan genel olarak tutarlı sonuçlar alınabilmesine rağmen, bu tür çalışmaların da farklı özellikteki killerde uygulanarak önerilen ilişkilerin performanslarının araştırılması, tüm killere için genel bir yaklaşımın ortaya konması açısından önem arz etmektedir.



KAYNAKLAR

- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T., and Hoeg, K., Use of in situ tests for foundation design on clay. In Proceedings of IN-SITU'86, Blacksburg, 1-30, **1986**.
- Almeida, M., Marques, M., and Baroni, M., Geotechnical parameters of very soft clays from CPTu. In Proceedings of 2nd International Symposium on cone penetration testing, CPT'10, 2-46, **2010**.
- Anagnostopoulos, A., Koukis, G., Sabatakakis, N., and Tsiambaos, G., Empirical correlations of soil parameters based on cone penetration tests (CPT) for Greek soils. Geotechnical and Geological Engineering, 21(4), 377-387, **2003**.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, ASTM Publication, Philadelphia, Pa, USA, p. 972, **1994**.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. Soil and Rock: Part:19, ASTM Publication, Philadelphia, PA, USA, p. 1624, **2000**.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils, Vol. 04.08, ASTM D5778-12, ASTM International, West Conshohocken, **2012**.
- Balachandran, K., Liu, J., Cao, L., and Peaker, S., Statistical Correlations between undrained shear strength (CU) and both SPT-N value and net limit pressure (PL) for cohesive glacial tills, **2017**.
- Baligh, M. M., Theory of deep site static cone penetration resistance. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, **1975**.
- Baligh, M. M., Vivatrat, V., and Ladd, C. C., Cone penetration in soil profiling. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 106(4), 447-461, **1980**.
- Battaligo, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. And Maniscalco, R., Piezometer probe test in cohesive deposits, Cone Penetration Testing and Experience. Proceedings of the Session ASCE National Convention, St. Louis, 264-302, **1981**.
- Begemann, H.K.S., 1953. "Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed behind the cone" Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zürich, 1, 213-17, **1953**.
- Bjerrum, L., Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 3, 111-159, **1973**.

- Bol, E., Özocak, A., ve Sert, S., Koni Penetrasyon Deneyi ile Zeminlerin Karakterizasyonu. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2(2), 22-33, **2014**.
- Bowles, J. E., Foundation Analysis and Design. McGraw Hill Book Company, Singapore, p. 1004, **1988**.
- Campanella, R G., and Robertson, P.K., Applied cone research. Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Division, ASCE, 353-362, **1981**.
- Campanella, R G., Gillespie, D., and Robertson, P. K., Pore pressure during cone penetration testing. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II, Amsterdam, Balkema publication, Rotterdam, 507-512, **1982**.
- Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespie, D., and Grieg, J., Recent developments in in-situ testing of soils. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 2, 849-854, **1985**.
- Cangir, B., and Dipova, N., Estimation of Undrained Shear Strength of Konyaalti Silty Clays. Indian Journal of Geo Marine Sciences, Vol. 46 (03), 513-520, **2017**.
- Caquot, A., and Kerisel J., Traité de Mécanique des Sols. Gauthier, Paris, **1956**.
- Chen, C. S., Evaluating Undrained Shear Strength of Klang Clay From Cone Penetration Test. International Conference on In-situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, May, Bali, Indonesia, **2001**.
- Clayton, C. R. I., SPT Energy Transmission: Theory, Measurement and Significance. Ground Engineering, 23(10), 33-42, **1990**.
- Clayton, C. R. I., The standard penetration test (SPT) methods and use. Construction Industry Research and Information Association. Report 143, London, **1995**.
- Coduto, D.E., Foundation Design Principles and Practices. Prentice-Hall Inc., p. 796, **1994**.
- De Beer, E., Static cone penetration testing in clay and loam. Sondeer Symposium, Utrecht, **1977**.
- Decourt, L., The standard penetration test. State of the art report, Norwegian Geotechnical Institute Publication, 179, Oslo, Norway, **1990**.
- Dipova, N., ve Cangir, B., Antalya Zeminlerinde CPT (Konik Penetrasyon Deneyi) Uygulamaları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, **2005**.

- Douglas, D. J., and Olsen, R. S., Soil classification using electric cone penetrometer, Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE, St. Louis, 209-227, **1981**.
- Douglas, D. J., The standard penetration test. In proceedings of an Extension Course on In-situ Testing for Geotechnical Investigations, M.C Ervin (Eds.), Balkema, , Sydney, Australia, 21-31, **1983**.
- Durgunoğlu, H. T., and Toğrol, E., Penetration testing in Turkey: State-of-the-art report, In Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, June 1974, Stockholm, Sweden, **1974**, p. 137.
- Gibson, R. E., Discussion of G. Wilson, The bearing capacity of screw piles and screwcrete cylinders, Journal of the Institution of Civil Engineers, 34, 382-383, **1950**.
- Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S., and Banno, T., Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils. Soils and Foundation, 14(3): 1-12, **1974**.
- Hettiarachchi, H., and Brown, T., Use of SPT blow counts to estimate shear strength properties of soils: energy balance approach. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(6), 830-834, **2009**.
- Hong, S. J., Lee, M. J., Kim J. J., and Lee, W. J., Evaluation of Undrained Shear Strength of Busan Clay Using CPT. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, May, Huntington Beach, CA, USA, 313-318, **2010**.
- ISSMFE-IRTP (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering – International Test Procedure), 1989. Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16 with Reference Test Procedures, CPT-SPT-DP-WST. Statens geotekniska institution, Information 7, Linköping.
- İyisan, R., ve Ansal, A., SPT-N darbe sayıları ile kayma mukavemeti ilişkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi, Boğaziçi Üniversitesi, Ekim, İstanbul, 303-314, **1990**.
- Kalantary, F., Ardalani, H., and Nariman-Zadeh, N., An Investigation on The s_u -NSPT Correlation Using GMDH Type Neural Networks and Genetic Algorithms. Engineering Geology, 104, pp. 144-155, **2008**.
- Karlsrud, K., Lunne, T., and Brattlien, K., Improved CPTu correlations based on block samples, Nordisk Geoteknikerkonferens, Reykjavik, **1996**.
- Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, D. A., and Strandvik, S., CPTU correlations for clays. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 16, No. 2, AA Balkema, **2005**, p. 693.
- Kjekstad, O., Lunne, T. and Clausen, C.J.F., Comparison between in situ cone resistance and laboratory strength for overconsolidated North Sea clays. Marine Geotechnology, 3 (1), 23-36, **1978**.

- Konrad, J. M., and Law, K. T., Undrained shear strength from piezocone tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3), 392-405, **1987**.
- Kulhawy, F.H., and Mayne, P.H., Manual on estimating soil properties for foundation design. Publication of Electric Power Research Institute (EPRI), USA, **1990**.
- Ladanyi, B., Deep punching of sensitive clays. *Proceedings of the Third Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Caracas, 1, 533-546, **1967**.
- La Rochelle, P., Zebdi, P.M., Leroueil, S., Tavenas, F., and Virely, D. Piezocone tests in sensitive clays of eastern Canada. . *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema, Rotterdam*, 831-841, **1988**.
- Larsson, R., and Mulabdic, M., Piezocone tests in clay, SGI REPORT, no. 42, **1991**.
- Larsson, R., and Åhnberg, H., On the evaluation of undrained shear strength and preconsolidation pressure from common field tests in clay. *Canadian geotechnical journal*, 42(4), 1221-1231, **2005**.
- Liao, S. S.C., and Whitman, R. V., Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 112(3), 373-377, **1986**.
- Lunne, T., Eide, O., and Ruiter, J. D., Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. *Canadian geotechnical journal*, 13(4), 430-441, **1976**.
- Lunne, T., Christoffersen, H. P., and Tjelta, T. I., Engineering use of piezocone data in North Sea clays. In *Proceedings of the 11th International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Fransisco, Rotterdam, Balkema, 907-912, **1985**.
- Lunne, T., and Kleven, A., Role of CPT in North Sea foundation engineering. *Cone penetration testing and experience*, ASCE, 76-107, **1981**.
- Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M., *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional, Champan & Hall, UK, **1997**.
- Massarsch, K. R., and Broms, B. B., Pile driving in clay slopes. In *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, June, Stockholm , Vol. 3, 469-474, **1981**.
- Mayne, P. W., Christopher, B. R., and DeJong, J., *Subsurface investigations Geotechnical site characterization*, No. FHWA NHI-01-31, **2002**.
- Mayne, P. W., NCHRP Synthesis 368, *Cone Penetration Testing*. Transportation Research Board, Washington, DC, 118, **2007**.

- Mayne, P. W., and Peuchen, J., Evaluation of CPTu Nkt cone factor for undrained strength of clays. In Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing, **2018**.
- McGregor, J. A., and Duncan, J. M., Performance and use of the standard penetration test in geotechnical engineering practice. Virginia Polytechnic Institute and State University, **1998**.
- Meyerhof, G. G., The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2(4), 301-332, **1951**.
- Nassaji, F., and Kalantari, B., SPT Capability to Estimate Undrained Shear Strength of Fine-Grained Soils of Tehran, Iran. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, no. 16, 1229-1238, **2011**.
- Nixon, I. K., Standard penetration test. State of the art report. In Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 3-24, **1982**.
- Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H., *Foundation Engineering*, John Wiley and Sons. Inc., New York, **1974**.
- Powell, J. J. M., and Quarterman, R. S. T., The interpretation of cone penetration tests in clays, with particular reference to rate effects Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema, Rotterdam, 913-910, **1988**.
- Rad, N. S., and Lunne, T., Correlations between piezocone results and laboratory soil properties, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 306-317, **1986**.
- Rad, N. S., and Lunne, T., Direct correlations between piezocone test results and undrained shear strength of clay. Proceedings of the international Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema, Rotterdam, 911- 917, **1988**.
- Randolph, M.F., and Wroth, C.P., An analytical solution for consolidation around a driven pile. *Proceedings of International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3 (3), 217-229, **1979**.
- Rémai, Z., Correlation of undrained shear strength and CPT resistance. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57(1), 39-44, **2013**.
- Robertson, P. K., and Campanella, R. G., Interpretation of cone penetration tests. Part II: Clay. *Canadian geotechnical journal*, 20(4), 734-745, **1983**.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., and Wightman, A., Spt-Cpt Correlations. *Journal of geotechnical engineering*, 109(11), 1449-1459, **1983**.
- Robertson, P.K., Soil Classification using the cone penetration test. *Canadian geotechnical Journal*, 27(1), 151-158, **1990**.

- Robertson, P. K., and Cabal, K. L., Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. Gregg Drilling & Testing, Inc., 5th edition, **2012**.
- Sanglerat, G., The penetrometer and soil exploration, developments in geotechnical engineering, Elsevier, Amsterdam, **1972**.
- Saran, S., Analysis and Design of Substructures, Balkema, **1996**.
- Schmertmann, John H., Guidelines for cone penetration test, performance and design, United States Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA-TS-78-209, 145, **1978**.
- Seed, H.B., Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes. Liquefaction problems in geotechnical engineering, 2752: 1-104, **1976**.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M., The Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425-1445, **1985**.
- Senneset, K., Janbu, N., and Svano, G., Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, 863-870, **1982**.
- Shin, Y. J., and Kim, D., Assessment of undrained shear strength based on Cone Penetration Test (CPT) for clayey soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(7), 1161-1166, **2011**.
- Sivrikaya, O., and Toğrol, E., Relations between SPT-N and q_u . In 5th international congress on advances in civil engineering, Istanbul, 943-952, **2002**.
- Sivrikaya, O., and Toğrol, E., Determination of undrained strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey. *Engineering geology*, 86(1), 52-69, **2006**.
- Sivrikaya, O., Comparison of artificial neural networks models with correlative works on undrained shear strength. *Eurasian Soil Science*, 42(13), 1487, **2009**.
- Skempton, A. W., The bearing capacity of clays. Proceedings of the Building Research Congress, London, Division I, 180-189, **1951**.
- Skempton, A. W., Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3), 425-447, **1986**.
- Sowers, G. F., Introductory Soil Mechanics and Foundations. Geotechnical engineering, 4th edition, Macmillan, New York, 114-117, **1979**.
- SPSS, Statistical Package for the Social Sciences, SPSS v.23.0 for Windows. SPSS Inc., Chicago, **2015**.

- Stroud, M. A., The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Softrock. Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing, Vol.2 Stockholm, Sweden, 367-375, **1974**.
- Teh, C.I., An analytical study of the cone penetration test. D. Phill. Thesis, Oxford University, **1987**.
- Teng, W. C. Y., Foundation Design, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, **1962**.
- Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, **1943**.
- Terzaghi, K., and Peck, R. B., Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, New York, **1967**.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G., Soil mechanics in engineering practice, 3rd Edition, John Wiley & Sons, **1996**.
- Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y., Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. Soils and Foundations, 23(4), 56-74, **1973**.
- Torstensson, B. A. (1975). Pore pressure sounding instrument. Proceedings of the ASCE Speciality Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, North Carolina, ASCE, 2, 48-54, **1975**.
- Tuncay, E., ve Ulusay, R., Türkiye'ye ait veriler esas alınarak önerilmiş SPT-CPT ilişkileri. Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, M. Erdoğan ve H.T. Yalçın (eds), Bildiriler Kitabı, 6-7 Eylül, İstanbul, 233-242, **2007**.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., ve Tuncay, E., Jeoteknik etütler için veri toplama ve değerlendirme teknikleri. Eğitim Semineri Kaynak Yayını Ek Notları, AİGM, Ankara 5.21-2.22, 3.1-3.11, 4.1-4.7, **2001**.
- Ulusay, R., Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, 5. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, no. 38, **2010**.
- Vesić, A. S., Expansion of cavities in infinite soil mass. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, **1972**.
- Vesić, A. S., Principles of pile foundation designs. Soil mechanics series No. 38, Duke University, Durham, **1975**.
- Vlasblom, A., The electrical penetrometer: A historical account of its development. Delft Soil Mechanics Laboratory, **1985**.
- Wagner, A. A., The use of the unified soil classification system by the bureau of reclamation. In: Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London. 1957. p. 125
- Wei, L., Pant, R., and Tumay, M. T., Evaluation of Undrained Shear Strength of Soft New Orleans Clay Using Piezocone. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, May, Huntington Beach, CA, USA, 2-12, **2010**.

- Westerberg, B., Müller, R., and Larsson, S., Evaluation of undrained shear strength of Swedish fine-grained sulphide soils. *Engineering Geology*, no. 188, 77-87, **2015**.
- Wissa, A.E.Z., Martin, R.T., and Garlanger, J.E., The piezometer probe. *Proceedings of the ASCE Speciality Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, North Carolina, ASCE, 1, 536-545, **1975**.
- 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., and Stokoe, K.H., Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 127(10), 817-833, **2001**.





EK 2

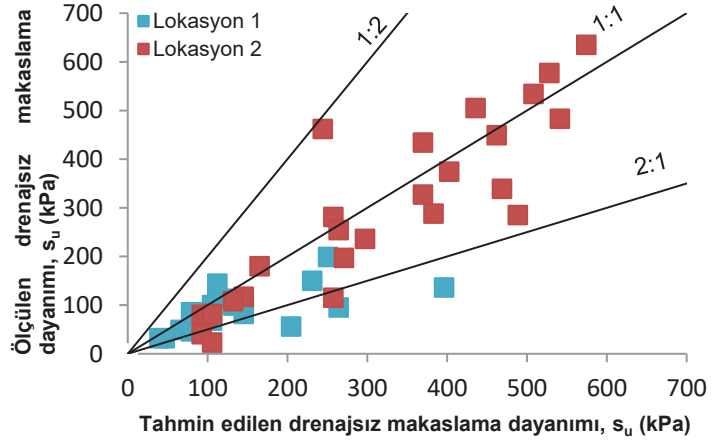
SPT VE CPT VERİSİYLE s_u TAHMİNİ İÇİN LİTERATÜRDE ÖNERİLEN EŞİTLİKLERİN PERFORMANSLARI

EK 2a

SPT Verisinden s_u Tahmini İçin Önerilen İlişkilerin Performansları

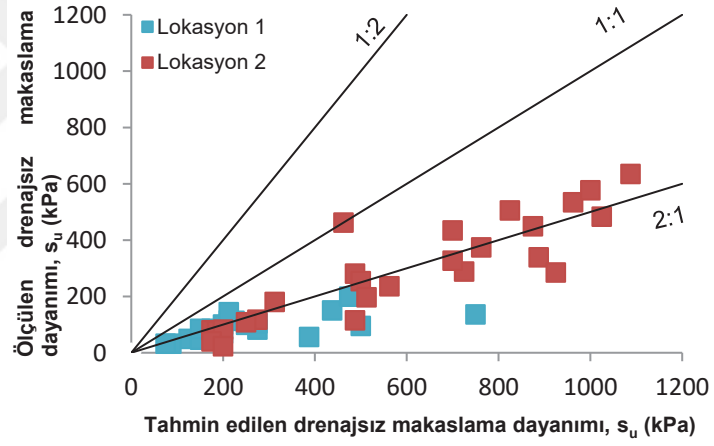
Terzaghi ve Peck (1967)

İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 6.6N$



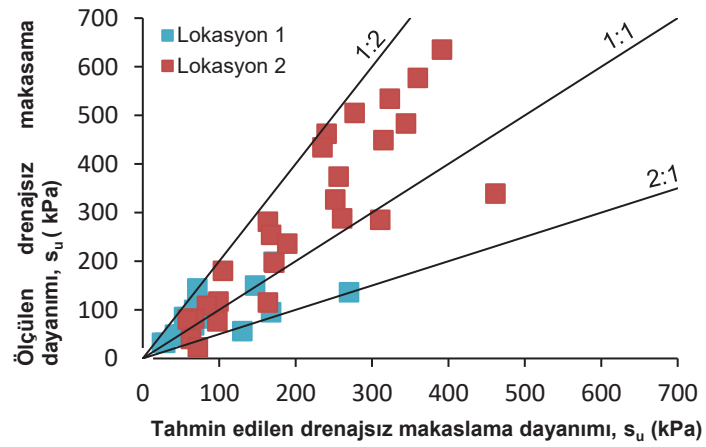
Sanglerat (1972)

Kil Zeminler
 $s_u = 12.5N$



Stroud (1974)

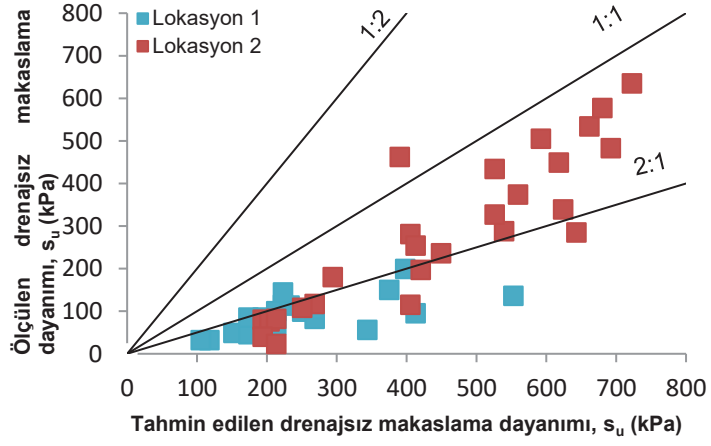
Killi zeminler ve zayıf kayalar
 $I_p > 30$ $s_u = 4.2N$
 $20 < I_p < 30$ $s_u = 4.5N$
 $I_p < 20$ $s_u = 6.5N$



Hara ve ark. (1974)

Kohezyonlu Zeminler

$$s_u = 29N^{0.72}$$



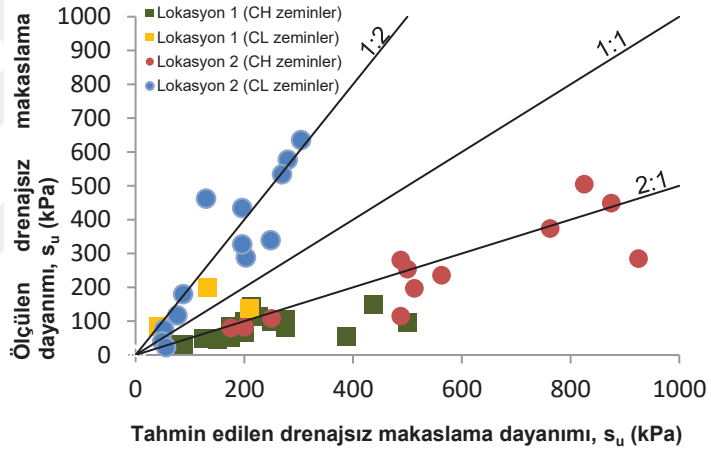
Sowers (1979)

CH Zeminler

$$s_u = 12.5N$$

CL Zeminler

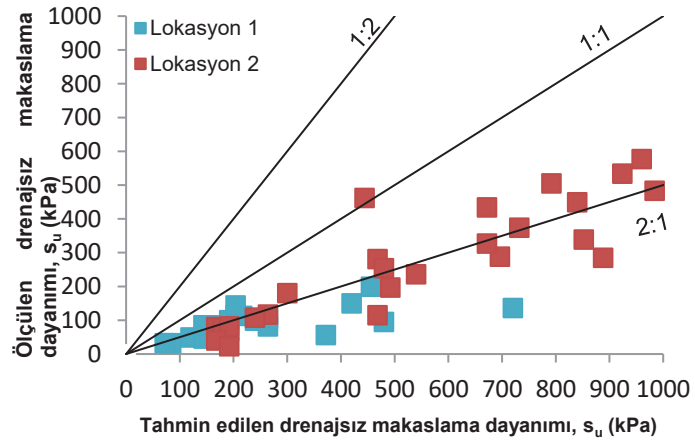
$$s_u = 3.5N$$



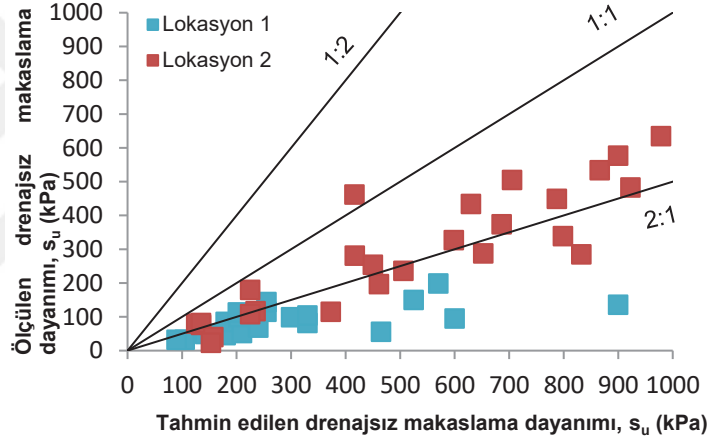
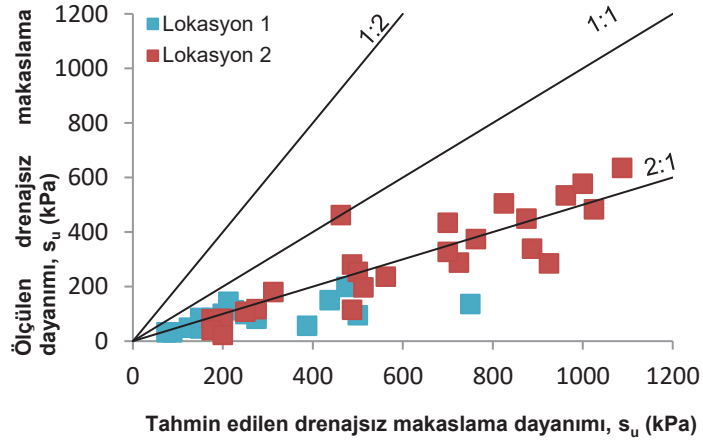
Nixon (1982)

İnce Taneli Zeminler

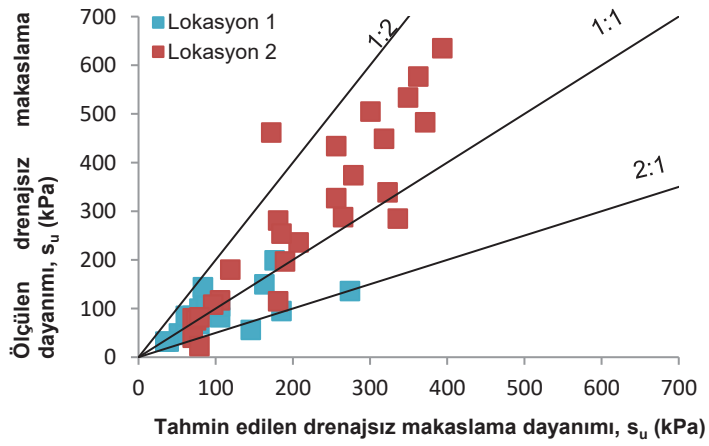
$$s_u = 12N$$



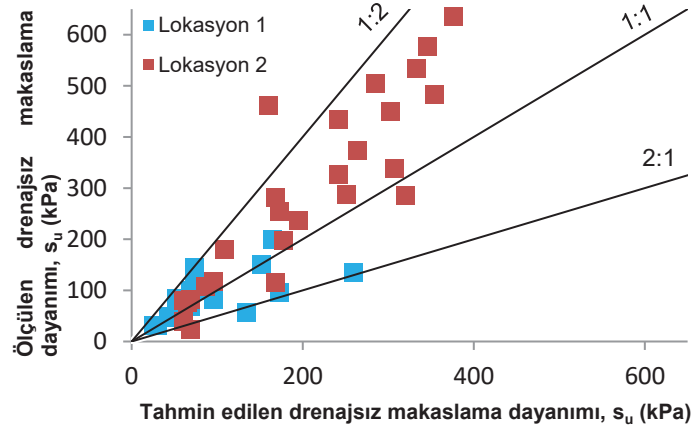
Decourt (1990)



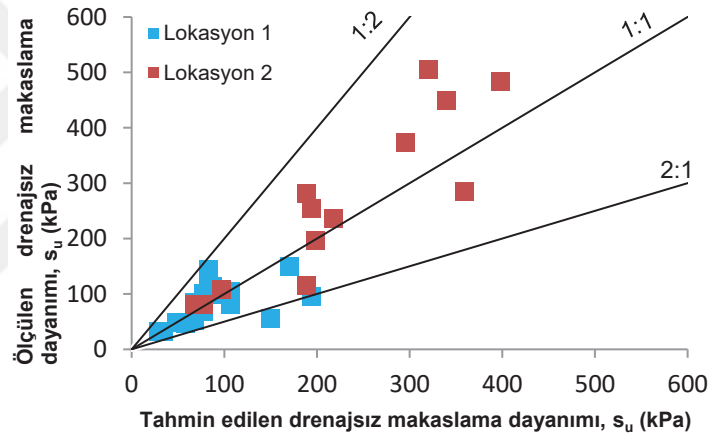
İyisan ve Ansal (1990)



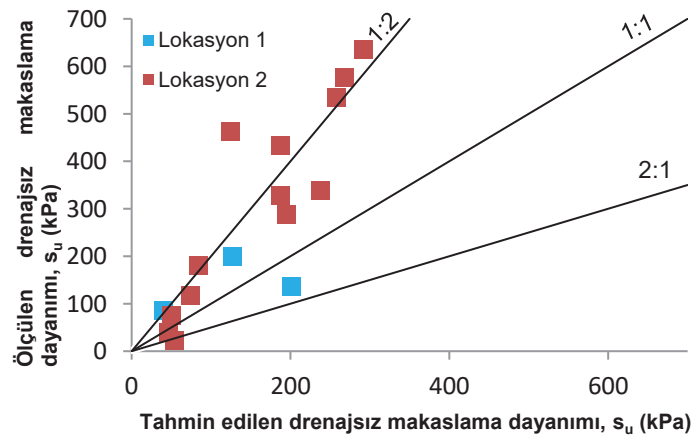
İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 4.32N$



CH Zeminler
 $s_u = 4.85N$

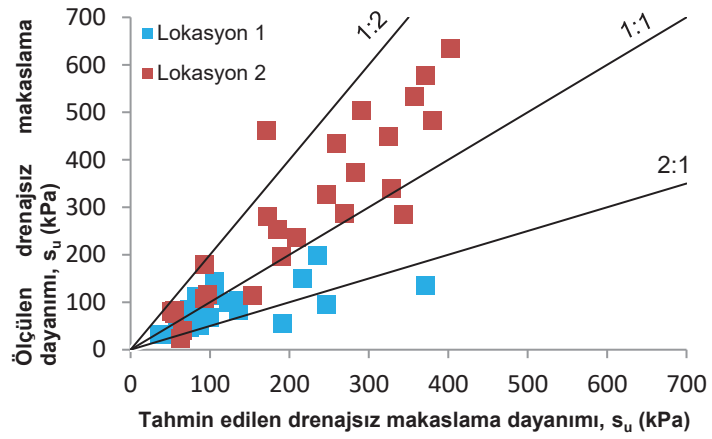


CL Zeminler
 $s_u = 3.35N$

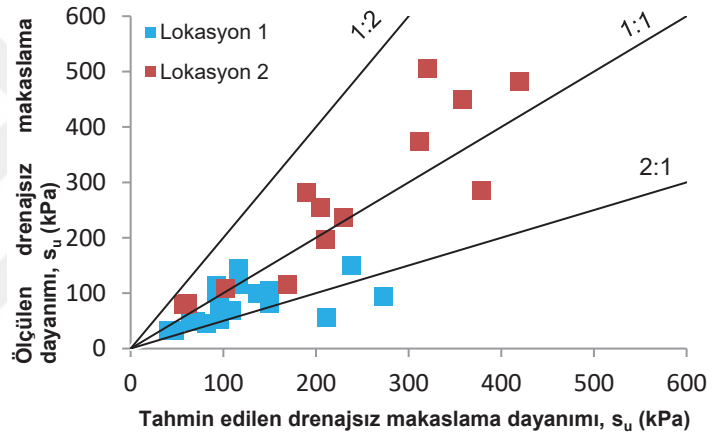


Sivrikaya ve Toğrol (2002)

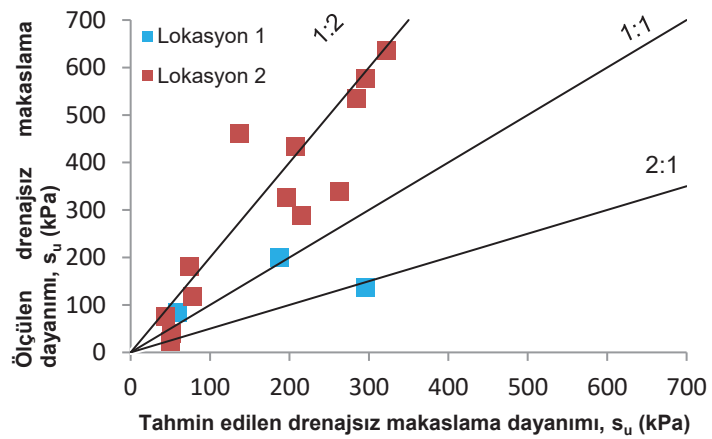
İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 6.18N_{60}$



CH Zeminler
 $s_u = 6.82N_{60}$

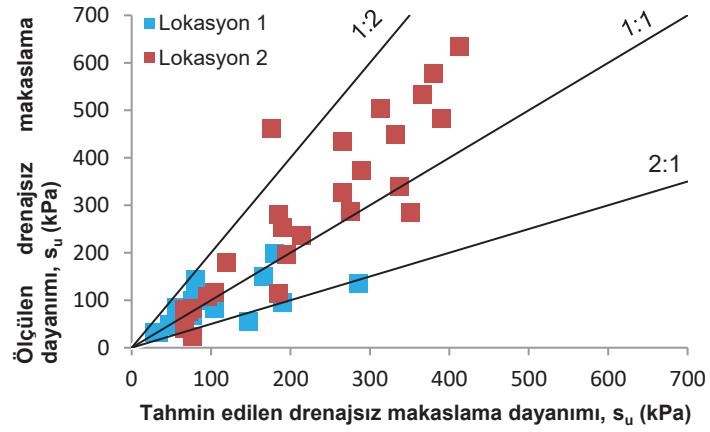


CL Zeminler
 $s_u = 4.93N_{60}$



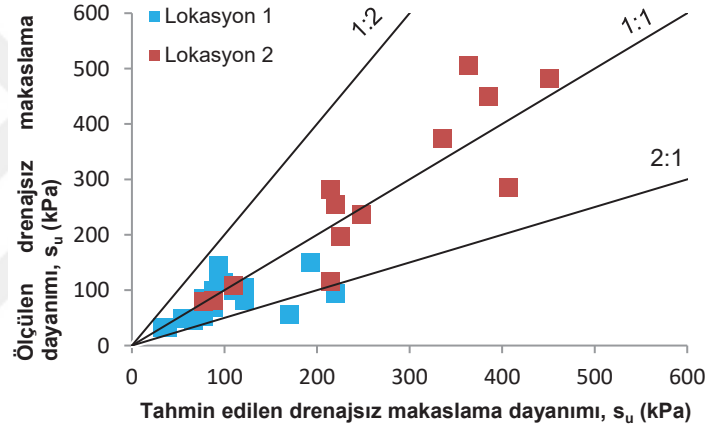
Kil Zeminler

$$s_u = 4.75N$$



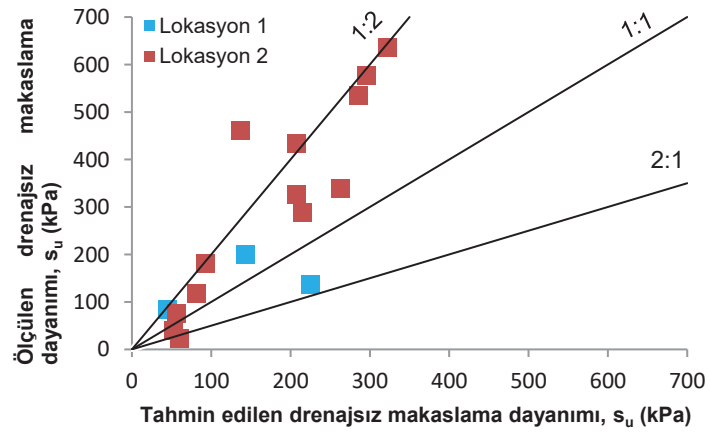
CH Zeminler

$$s_u = 5.50N$$



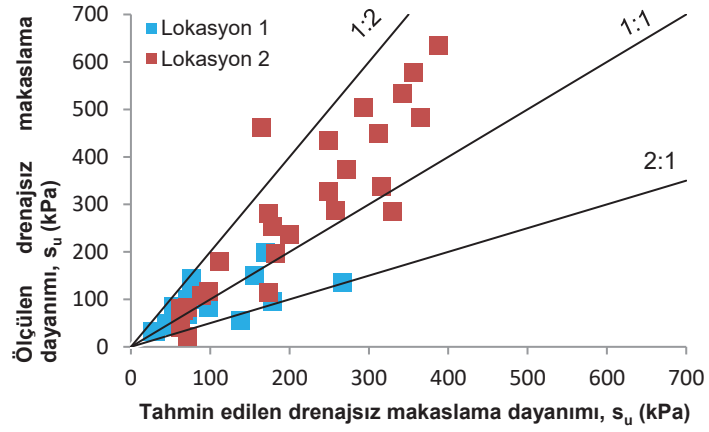
CL Zeminler

$$s_u = 3.70N$$



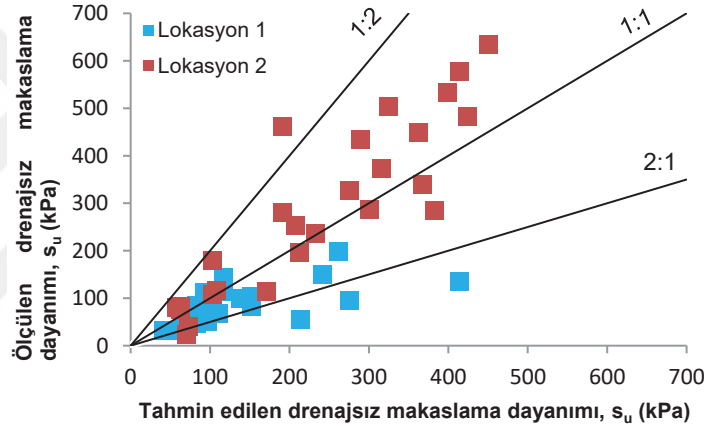
İnce Taneli Zeminler

$$s_u = 4.45N$$



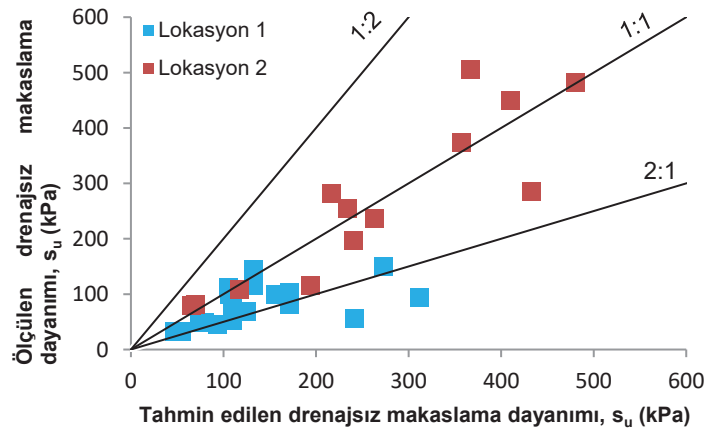
Kil Zeminler

$$s_u = 6.90N_{60}$$

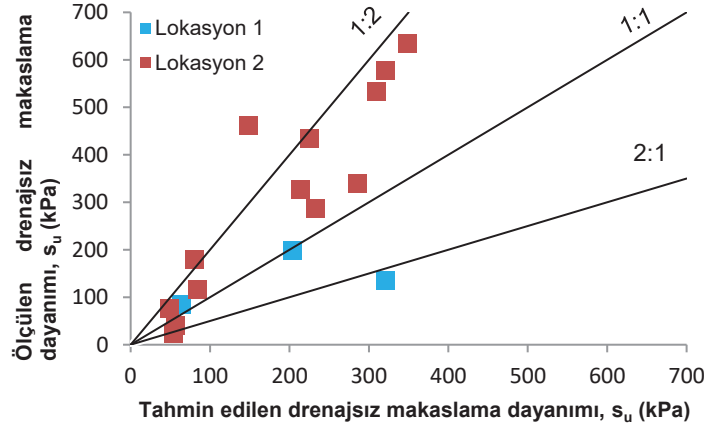


CH Zeminler

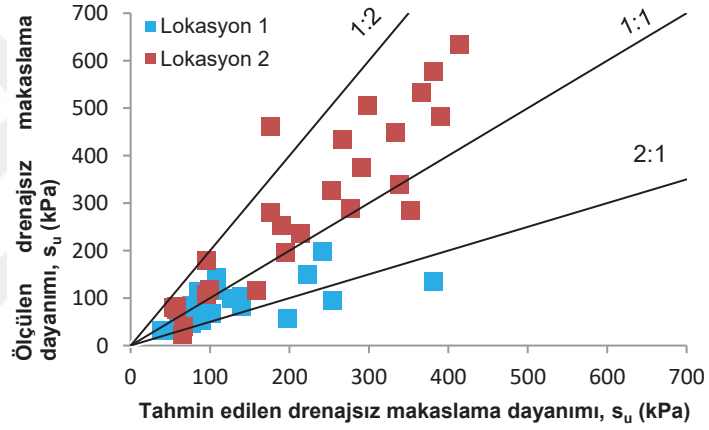
$$s_u = 7.80N_{60}$$



CL Zeminler
 $s_u = 5.35N_{60}$



İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 6.35N_{60}$



İnce Taneli Zeminler

$$s_u = I_p^2(0.0055N_{60} - 0.008) - I_p(0.176N_{60} - 0.3) + 1.7N_{60} + 41$$

50 (kPa) (σ_{vol})

$$s_u = I_p^2(0.0125N_{60} - 0.1) - I_p(0.425N_{60} - 3.4) + 4.1N_{60} + 16.5$$

100 (kPa) (σ_{vol})

$$s_u = I_p^2(0.0216N_{60} - 0.222) - I_p(0.721N_{60} - 7.4) + 6.9N_{60} - 19$$

150 (kPa) (σ_{vol})

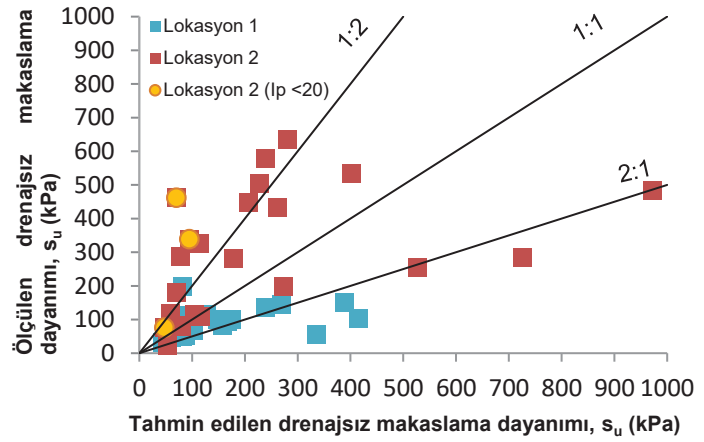
$$s_u = I_p^2(0.0306N_{60} - 0.33) - I_p(1.016N_{60} - 11.1) + 9.4N_{60} - 50.5$$

200 (kPa) (σ_{vol})

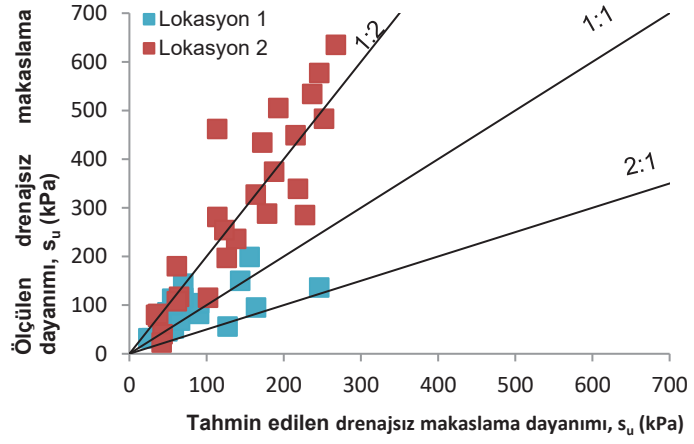
$$s_u = I_p^2(0.0371N_{60} - 0.423) - I_p(1.22N_{60} - 14) + 11.1N_{60} - 75$$

250 (kPa) (σ_{vol})

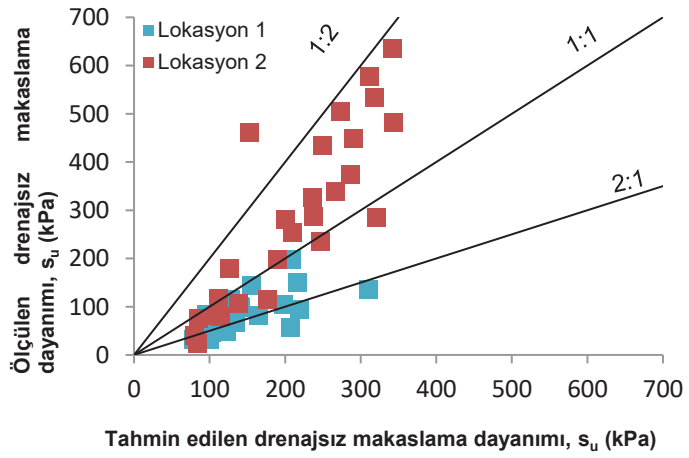
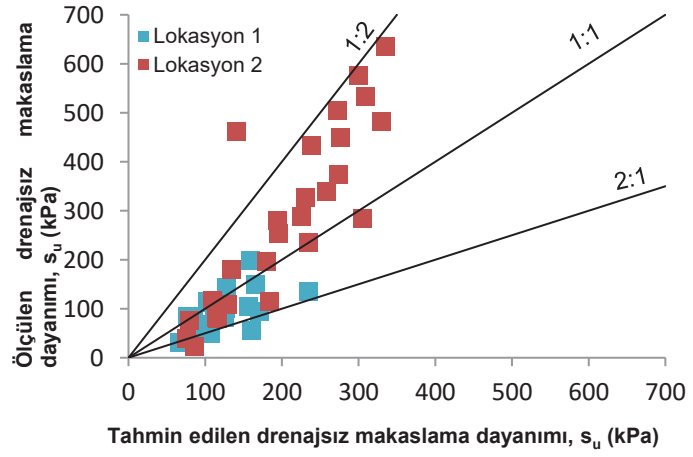
Kalantary, Ardalan ve Nariman-Zadeh (2008)



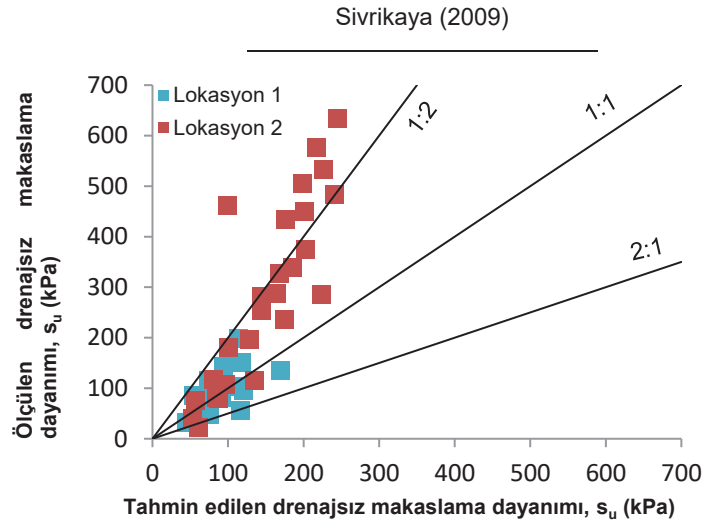
Hettiarachchi ve Brown (2009)



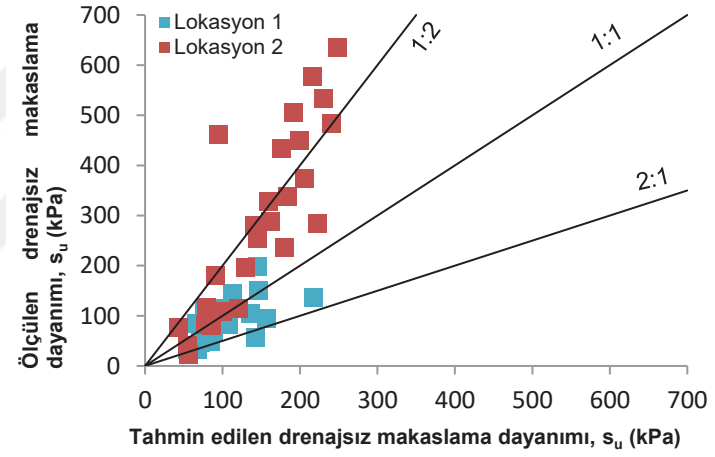
Sivrikaya (2009)



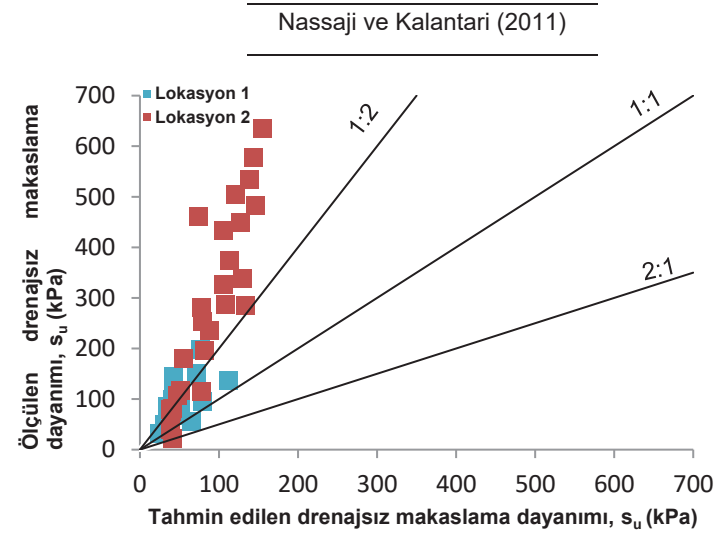
Kohezyonlu Zeminler (UCS Deneyi)
 $s_u = 2,41N_{60} - 0,82W_n + 0,14LL + 1,44I_p$



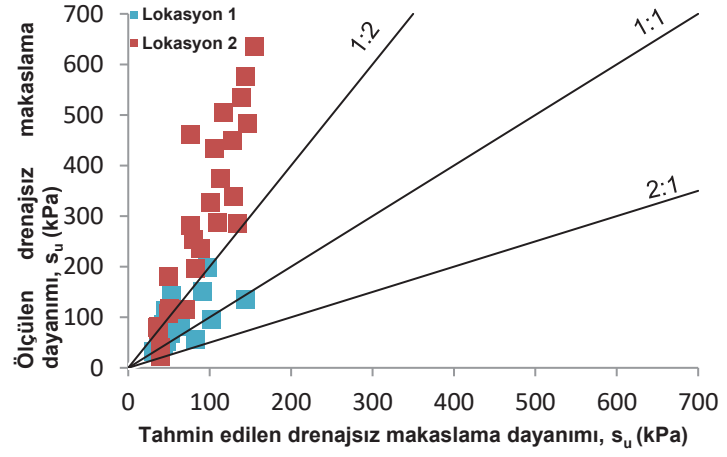
Kohezyonlu Zeminler (UCS Deneyi)
 $s_u = 3,24N_{60} - 0,53W_n - 0,43LL + 2,14I_p$



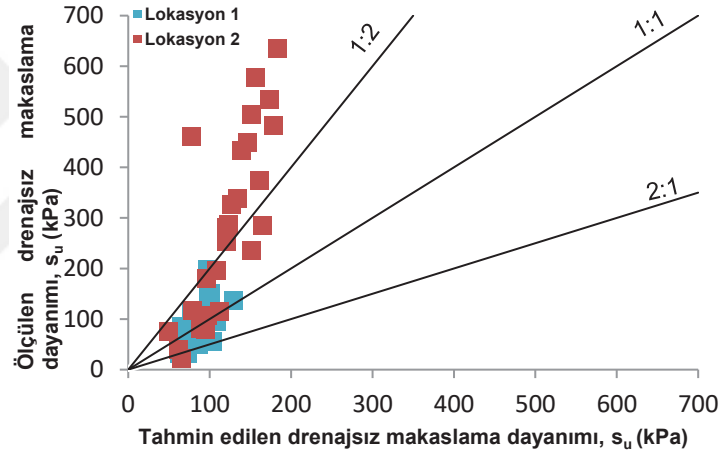
İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 1,6N + 15,4$



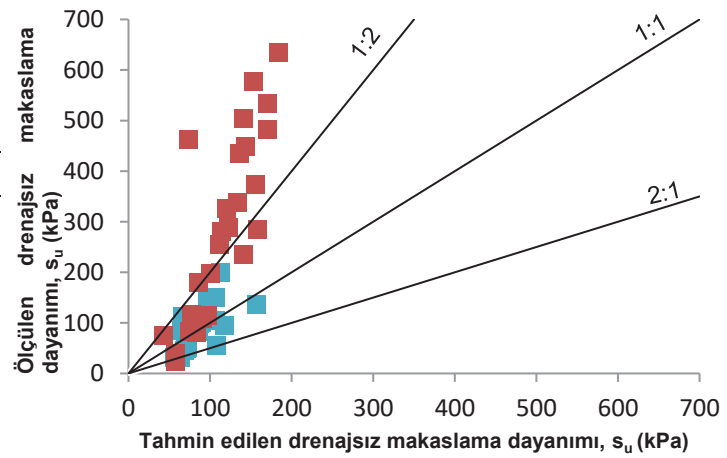
İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 2.1N_{60} + 17.6$



İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 1.5N - 0.1W_n - 0.9LL + 2.4I_p + 21.1$



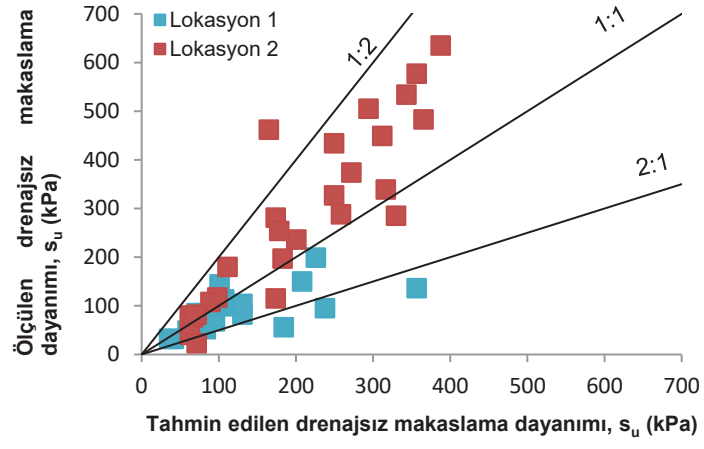
İnce Taneli Zeminler
 $s_u = 2N_{60} - 0.4W_n - 1.1LL + 2.4I_p + 33.3$



Cangir ve Dipova (2017)

Siltli Killi Zeminler

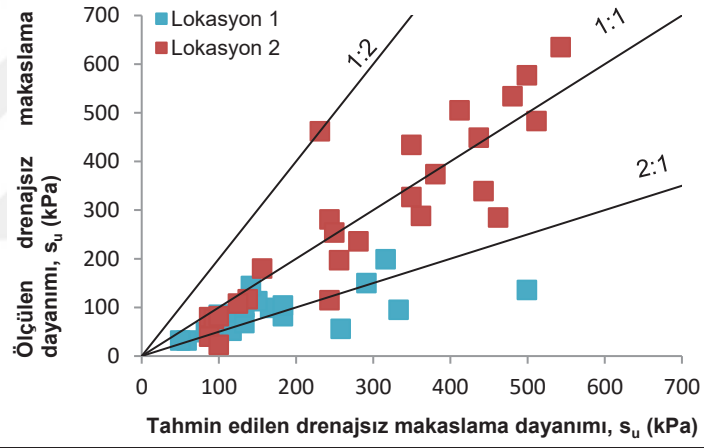
$$s_u = 6.932N_{70}$$



Balachandran ve ark. (2017)

İnce Taneli Zeminler

$$s_u = 8.32N_{60}$$



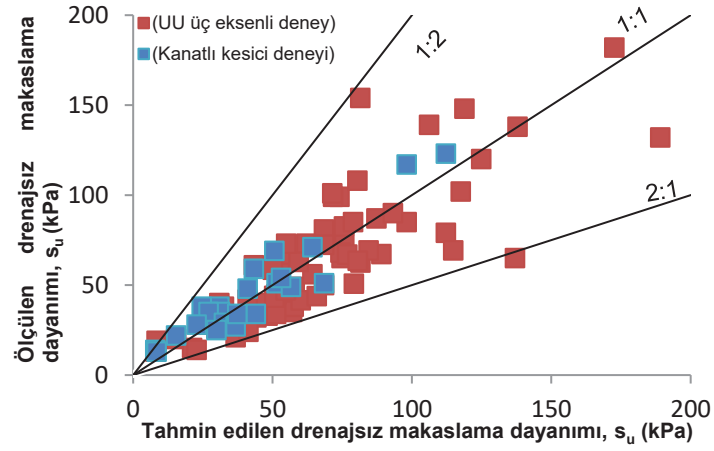
EK 2b

CPT Verisinden s_u Tahmini İçin Önerilen İlişkilerin Performansları

Larsson ve Mulabdic (1991)

$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL$$

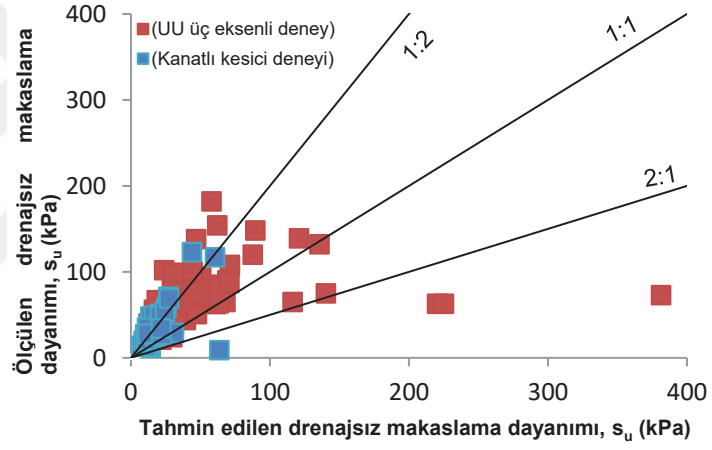
$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$



Anagnostopoulos ve ark. (2003)

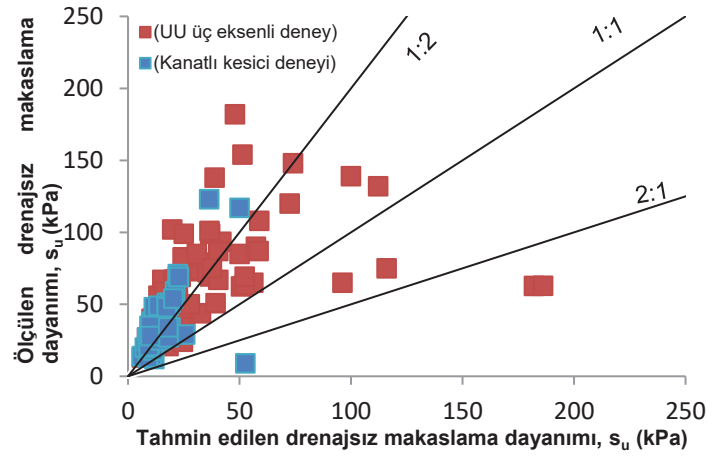
Elektronik CPT

$$s_u = f_s$$



Bütün koniler

$$s_u = \frac{f_s}{1.21}$$

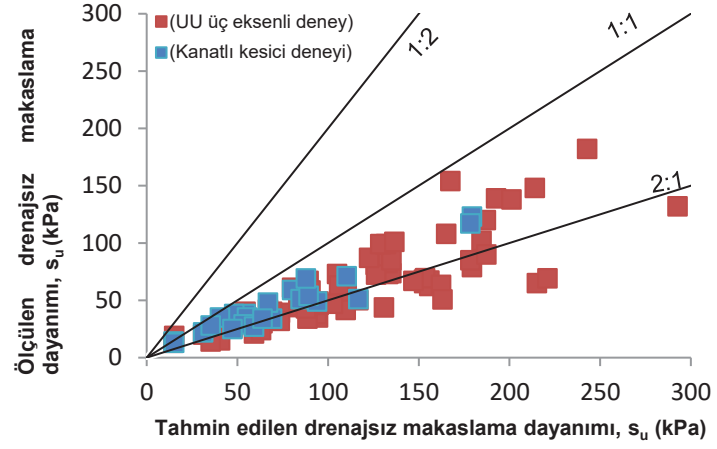


Karlsrud ve ark. (2005)

$$St < 15$$

$$N_{ke} = 11.5 - 9.05B_q$$

$$s_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{(q_t - u_2)}{N_{ke}}$$

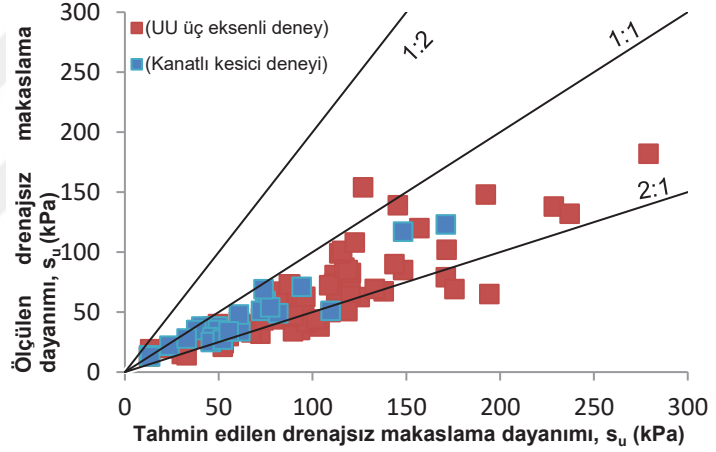


$$N_{kt} = 7.8 + 2.5 \log(OCR) + 0.082I_p$$

$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$$

$$OCR = \left(\frac{Q_t}{3}\right)^{1.2}$$



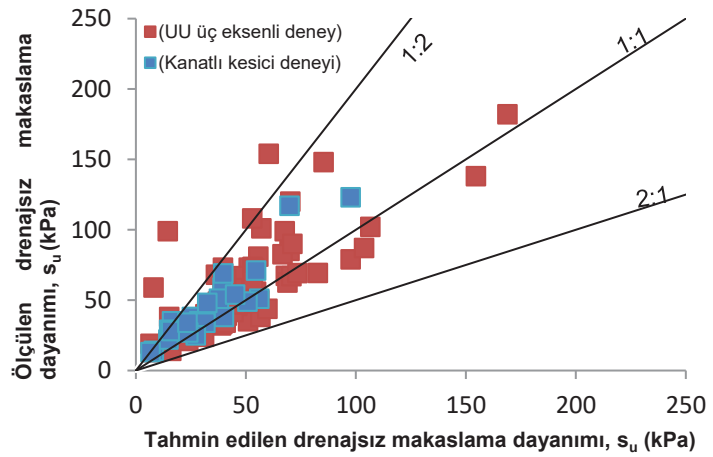
$$N_{\Delta u} = 6.9 - 4.0 \log(OCR) + 0.07I_p$$

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}}$$

$$\Delta u = u_2 - u_0$$

$$OCR = \left(\frac{Q_t}{3}\right)^{1.2}$$

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$$



Larsson ve Ahnberg (2005)

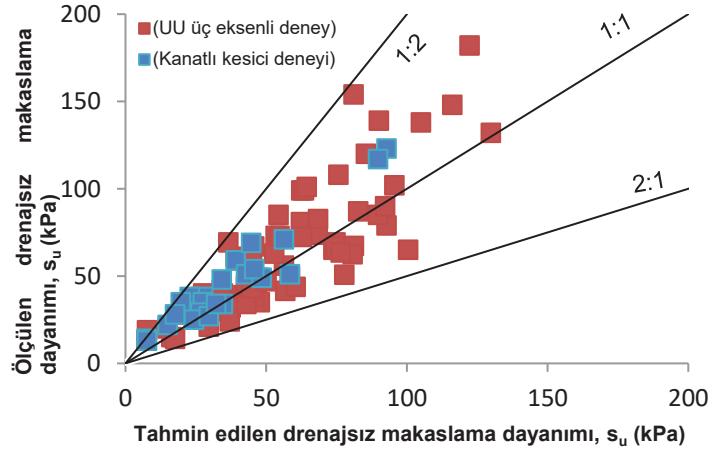
$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}} \left[\frac{OCR}{1.3} \right]^{-0.2}$$

$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL$$

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{vo}}$$

$$\sigma'_c = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}(\sigma'_c)}$$

$$N_{kt}(\sigma'_c) = 1.21 + 4.4LL$$

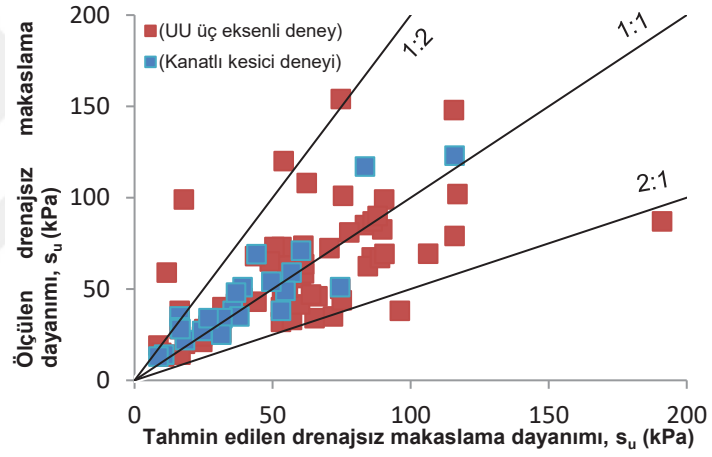


Hong ve ark. (2010)

$$N_{\Delta u} = 3.6 + 0.1I_p(\%)$$

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}}$$

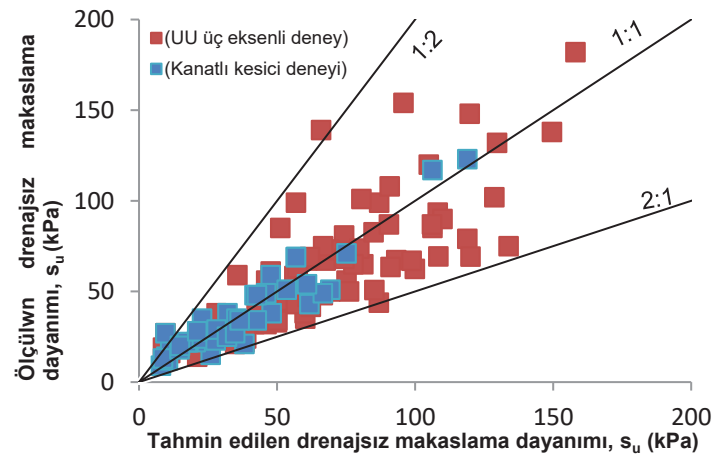
$$\Delta u = u_2 - u_0$$



$$N_{\Delta u} = 24B_q - 19B_q^2$$

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}}$$

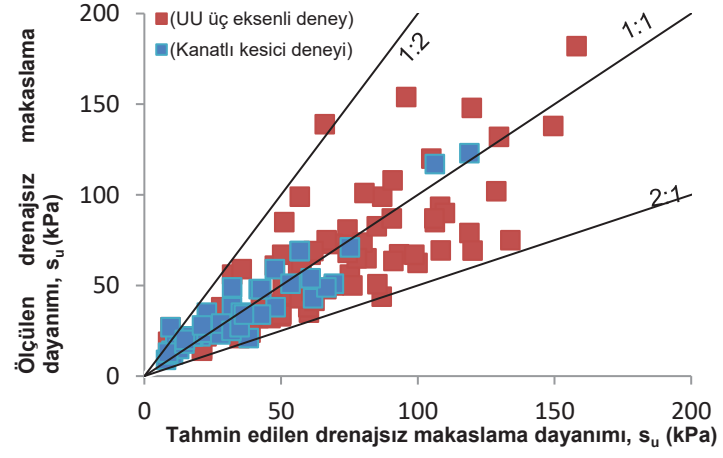
$$\Delta u = u_2 - u_0$$



$$N_{kt} = 24 - 19B_q$$

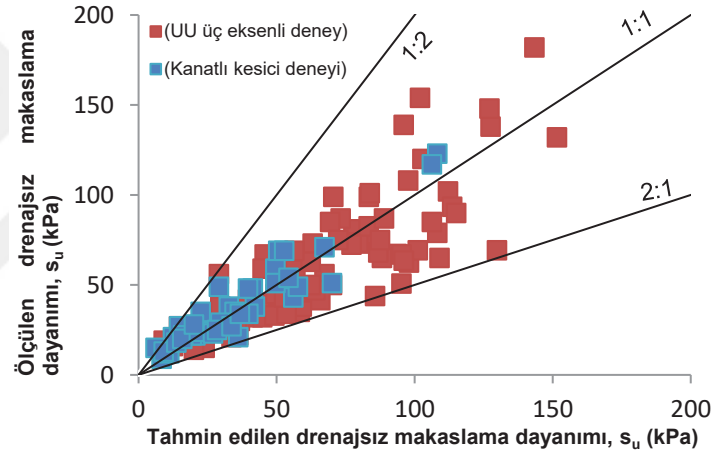
$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}}$$

Hong ve ark. (2010)



$$N_{ke} = 22 - 22B_q$$

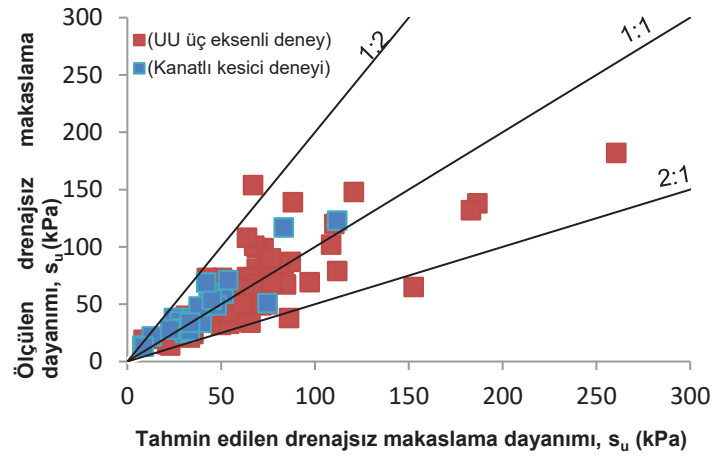
$$s_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{(q_t - u_2)}{N_{ke}}$$



Shin ve Kim (2011)

$$N_k = 0.285I_p + 7.636$$

$$s_u = \frac{(q_c - \sigma_{v0})}{N_k}$$

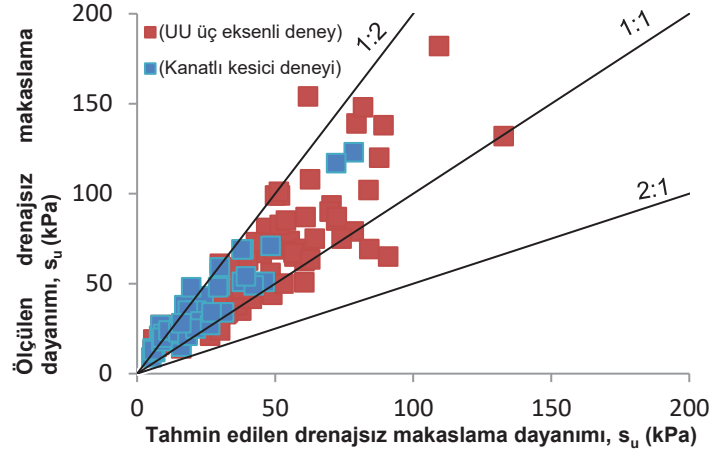


$$N_{\Delta u} = 24.3B_q$$

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}}$$

$$\Delta u = u_2 - u_0$$

Remai (2013)



$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}} \left[\frac{OCR}{1.3} \right]^{-0.2}$$

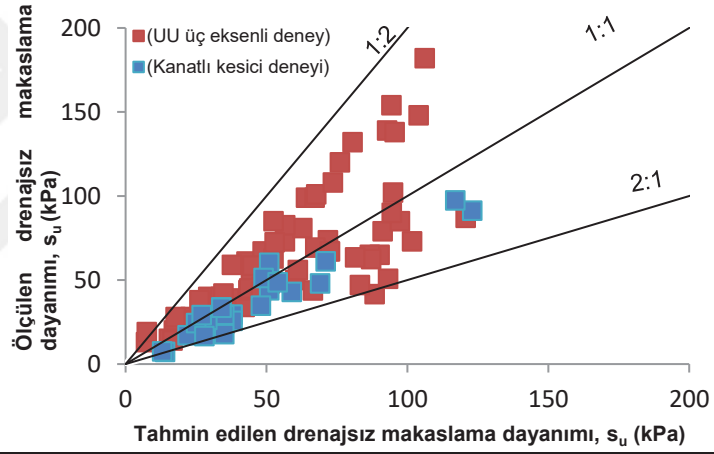
$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL$$

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{vo}}$$

$$\sigma'_c = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}(\sigma'_c)}$$

$$N_{kt}(\sigma'_c) = 1.21 + 4.4LL$$

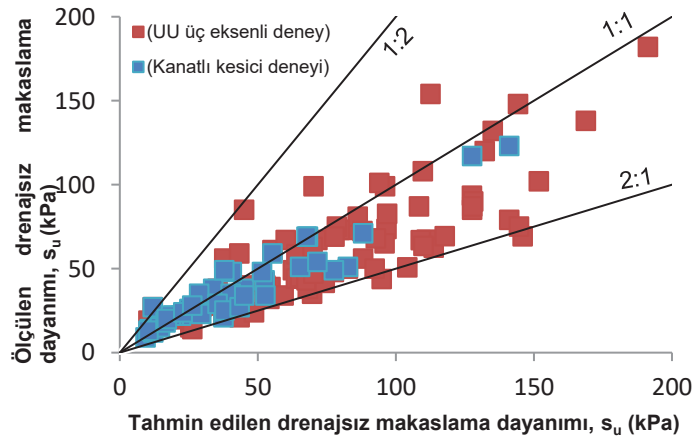
Westerberg, Müller ve Larsson (2015)



Mayne ve Peuchen (2018)

$$N_{kt} = 10.5 - 4.6 \ln(B_q + 0.1)$$

$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}}$$



EK 3

ÇOKLU REGRESYON ANALİZLERİ

EK 3a

SPT-N, N₆₀ ve Diğer Özellikler Kullanılarak Yapılan Analizler

Bağımlı değişken: s_u
Bağımsız değişkenler:

A: N
B: İTO
C: PL
D: I_p
E: BHA
F: w_n
G: σ_{vo}

R^2	Düzeltilmiş R^2	Girdi parametreleri
79,7645	78,8447	AB
81,1964	80,0263	AC
79,7879	78,8692	AD
80,4029	79,5576	AE
80,1852	79,2845	AF
79,9489	79,0375	AG
80,2574	78,88	ABC
79,8089	78,4002	ABD
81,468	80,175	ABE
80,4692	79,1066	ABF
79,9637	78,5658	ABG
80,1967	78,8151	ACD
82,4189	81,1923	ACE
80,2835	78,908	ACF
80,3734	79,0041	ACG
81,4882	80,1967	ADE
80,2188	78,8387	ADF
79,9711	78,5737	ADG
81,894	80,7006	AEF
81,593	80,3087	AEG
80,2988	78,9243	AFG
80,2848	78,4071	ABCD
82,419	80,7446	ABCE
80,5279	78,6734	ABCF
80,4859	78,6274	ABCG
81,502	79,7403	ABDE
80,4693	78,6092	ABDF
80,0297	78,1278	ABDG
81,1836	79,582	ABEF
81,6231	79,8729	ABEG
80,6357	78,7915	ABFG
82,4282	80,7547	ACDE
80,3025	78,4266	ACDF
80,3735	78,5043	ACDG
82,0015	80,3826	ACEF
82,5958	80,9383	ACEG

80,4226	78,558	ACFG
82,0144	81,3967	ADEF
81,6735	79,9281	ADEG
80,3252	78,4514	ADFG
82,9529	81,3294	AEFG
82,4325	80,2901	ABCDE
80,5289	78,1544	ABCDF
80,5314	78,1572	ABCDG
83,2491	81,2063	ABCEF
82,6044	80,483	ABCEG
80,7144	78,3625	ABCFG
83,2115	81,1641	ABDEF
81,6741	79,4392	ABDEG
80,6385	78,2774	ABDFG
83,2819	81,2431	ABEFG
83,0924	81,0305	ACDEF
82,6038	80,4823	ACDEG
80,4343	78,0482	ACDFG
83,0796	81,0161	ACEFG
83,0625	80,997	ADEFG
83,2687	80,759	ABCDEF
82,63	80,0245	ABCDEG
80,7221	77,8304	ABCDG
83,3635	80,868	ABCEFG
83,2987	80,7935	ABDEFG
83,1571	80,6307	ACDEFG
83,3727	80,3883	ABCDEF

Bağımlı değişken: s_u
Bağımsız değişkenler:

A: N_{60}
B: σ_{vo}
C: İTO
D: PL
E: I_p
F: BHA
G: w_n

R^2	Düzeltilmiş R^2	Girdi parametreleri
72,933	71,7027	AB
71,4605	70,1632	AC
72,75	71,5114	AD
71,5403	70,2466	AE
72,095	70,8265	AF
74,2153	73,0433	AG
72,9393	71,0513	ABC
74,2569	72,4609	ABD
73,0524	71,1723	ABE
73,8017	71,9739	ABF
75,0983	73,361	ABG
72,7537	70,8528	ACD
71,5471	69,562	ACE
72,3668	70,4389	ACF
74,9475	73,1996	ACG
72,7701	70,8703	ADE
74,2481	72,4514	ADF
74,2267	72,4286	ADG
72,3535	70,4247	AEF
74,4512	72,6688	AEG
74,0995	72,5018	AFG
74,336	71,8918	ABCD
73,0704	70,5057	ABCE
73,8996	71,4139	ABCF
75,961	73,6716	ABCG
74,2638	71,8128	ABDE
75,9538	73,6636	ABDF
75,158	72,792	ABDG
74,006	71,5304	ABEF
75,2891	72,9356	ABEG
75,9282	73,8261	ABFG
72,795	70,204	ACDE
74,274	71,8239	ACDF
74,9475	72,5615	ACDG
72,4383	69,8134	ACEF
74,9791	72,5962	ACEG

77,8102	75,6969	ACFG
74,2911	71,8426	ADEF
74,453	72,0199	ADEG
75,1169	72,9375	ADFG
75,5647	73,428	AEFG
74,4087	71,2878	ABCDE
75,9572	73,0252	ABCDF
75,9792	73,0498	ABCDG
74,0123	70,843	ABCEF
75,9692	73,0386	ABCEG
76,7638	74,174	ABCFG
75,9761	73,0464	ABDEF
75,3227	72,3133	ABDEG
75,9986	72,3155	ABDFG
76,3288	73,6859	ABEFG
74,295	71,1602	ACDEF
74,9795	71,9282	ACDEG
77,8108	75,1048	ACDFG
77,9642	75,2769	ACEFG
77,5665	74,8307	ADEFG
76,0019	72,4022	ABCDEF
75,985	72,3827	ABCDEG
76,7886	74,6069	ABCDG
76,857	74,6856	ABCEFG
77,36	75,114	ABDEFG
77,9644	74,659	ACDEFG
77,8729	74,509	ABCDEF

EK 3b

**CPT Parametreleri ve Diğer Özellikler Kullanılarak Yapılan
Analizler**

Bağımlı değişken: s_u
Bağımsız değişkenler:

A= q_t
B= f_s
C= u_2
D= w_n
E= İTO
F= σ_{vo}
G= LL
H= I_p
I= Kil Oranı

R^2	Düzeltilmiş R^2	Girdi Parametreleri
81.1212	78.4243	ADFGH
81.0919	78.3907	ADEFH
81.4836	78.216	ADEFGH
81.4568	78.1845	ABDEFH
80.2459	78.051	ADFH
81.2115	77.8959	ACDFGH
81.1501	77.8237	ABDFGH
81.1402	77.812	ACDEFH
80.5596	77.7824	ADEFG
81.6608	77.7707	ABDEFGH
79.3978	77.7273	ADF
79.8508	77.612	ADFG
81.5276	77.6092	ACDEFGH
81.5119	77.5902	ADEFGHI
80.3879	77.5862	ACDFH
80.3669	77.5622	ABDFH
81.472	77.5418	ABDEFHI
81.4678	77.5367	ABCDEFH
79.4871	77.2079	ADFI
79.4537	77.1708	AEFH
79.4493	77.1659	ADEF
81.6745	77.0932	ABDEFGHI
81.6612	77.0765	ABCDEFGH
78.7197	76.9943	AFH
81.5855	76.9819	ACDEFGHI
81.4753	76.8441	ABCDEFHI
81.2173	76.5216	ABCDFGHI
78.2646	76.5023	AFG
81.6757	76.3558	ABCDEFGHI
78.0384	76.2577	ACH
77.4081	75.5763	AFI
76.0718	74.8124	AF
75.4698	74.1788	AH
74.6115	73.2753	AG
73.4719	72.0757	AD
70.3188	68.7566	AC



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 30.05.2019

Tez Başlığı / Konusu: STANDART PENETRASYON VE KONİK PENETRASYON DENey
VERİLERİNDEN KİLLERİN MAKASLAMA DAYANIMININ KESTİRİMİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 99 sayfalık kısmına ilişkin, 30.05./2019 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5... 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

30.05.2019
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: KIVANÇ YÜKSEL
Öğrenci No: N16129345
Anabilim Dalı: Jeoİ Mühendisliği
Programı: Jeoİ Mühendisliği - Yüksek Lisans
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Ergün Tuncay

(Signature)

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Kıvanç Yüksel

Doğum tarihi: 01.12.1992

Doğum yeri: Keçiören / ANKARA

Medeni hali: Bekar

Askerlik: Yapıldı

E-posta: kivancyuksel92@hotmail.com

Eğitim

Lisans (2010-2015): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yüksek lisans (2016-2019): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (İyi)

İş Deneyimi

Deneyim Alanları

Mühendislik jeolojisi, Kaya ve zemin mekaniği

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar