

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVILAŞABİLİR SİTLİ ZEMİNLERİN KONİ PENETRASYON  
DENEYİ İLE TANISI**

**DOKTORA TEZİ**

**Mustafa ÖZSAĞIR**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Geoteknik Bilim Dalı**

**TEMMUZ 2023**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVILAŞABİLİR SİLTİLİ ZEMİNLERİN KONİ PENETRASYON  
DENEYİ İLE TANISI**

**DOKTORA TEZİ**

**Mustafa ÖZSAĞIR**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Geoteknik Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ertan BOL**

**TEMMUZ 2023**



Mustafa ÖZSAĞIR tarafından hazırlanan “Sıvılaşabilir Siltli Zeminlerin Koni Penetrasyon Deneyi İle Tanısı” adlı tez çalışması 25.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı :**

**Jüri Üyesi :**

**Jüri Üyesi :**

**Jüri Üyesi :**

**Jüri Üyesi :**



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “SIVILAŞABİLİR SİLTİLİ ZEMİNLERİN KONİ PENETRASYON DENEYİ İLE TANISI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığımı, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(25/07/2023)

Mustafa Özsağır





*Eşime ve çocuklarıma*



## **TEŞEKKÜR**

Tez çalıőmam boyunca tecrübeleriyle bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL'a, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Bilim Dalı öğretim üyeleri Prof. Dr. Aőkın ÖZOCAK ve Doç. Dr. Sedat SERT'e; çalışmaya önemli katkılarda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Caner ERDEN'e; değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Kurban ÖNTÜRK ve Arő. Gör. Kadir KOCAMAN'a; geoteknik laboratuvarı teknikerleri Recep EYÜPLER ve Sebahattin İő'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, ahlaklı ve sağduyulu bir birey olarak yetişmem için gayret eden aileme ve her zaman yanımda olan en büyük destekçim, kıymetli eşime teşekkür ederim.

Mustafa Özsაır



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	v
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SİMGELER .....	xv
TABLO LİSTESİ .....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ .....	xix
ÖZET .....	xxiii
SUMMARY .....	xxv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı .....	2
1.2. Tezin Kapsamı .....	2
<b>2. ZEMİNLERİN SIVILAŞMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1. Zemin Sıvılaşma Analizi .....	6
2.2. İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşması .....	11
<b>3. SIVILAŞMA TAHMİNİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>19</b>
3.1. Makine Öğrenmesi Yöntemleri .....	20
3.1.1. Karar ağaçları .....	21
3.1.2. Rassal orman (random forest) .....	22
3.1.3. Destek vektör makineleri (support vector machines).....	22
3.1.4. K-en yakın komşular algoritması (K-NN) .....	23
3.1.5. Yapay sinir ağları (artificial neural network- multilayer perceptron).....	23
3.1.6. Lojistik regresyon .....	23
3.1.7. Stokastik gradyan azalması (SGD) .....	24
3.2. Çalışma Alanı ve Veriseti .....	24
3.3. Veri Ön İşleme .....	27
3.3.1. Performans ölçütleri .....	30
3.3.2. Özellik seçimi .....	31
3.4. Bulgular ve Tartışma .....	33
3.5. Sonuçlar .....	39
<b>4. KONİ PENETRASYON DENEYİ (CPT) İLE SIVILAŞMA TAYİNİ.....</b>	<b>41</b>
4.1. Deneyin Uygulaması .....	44
4.2. Deneyde Ölçülen Parametreler ve Tanımlar .....	46
4.3. CPT ile Zeminlerin Sınıflandırılması .....	48
4.3.1. Zemin davranış tipi indeksi (Ic) .....	53
4.3.2. İnce daneli zeminlerin CPT ile sınıflandırılması .....	59
4.4. Kil ve Silt Zeminlerin Zemin Davranış İndeksi Ic ile Belirlenmesi.....	61
4.5. Farklı Araştırmacılara Göre Sıvılaşma Değerlendirmesinin CPT Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	74

4.6. Zemin Davranış Endeksi Ic'nin Optimizasyonu .....	82
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>88</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>91</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>97</b>

## KISALTMALAR

<b>CPT</b>	: Koni Penetrasyon Deneyi
<b>CRR</b>	: Çevrimsel Direnç Oranı
<b>CSR</b>	: Çevrimsel Gerilme Oranı
<b>DL</b>	: Derin Öğrenme
<b>DT</b>	: Karar Ağaçları
<b>FC</b>	: Fine Content
<b>LOGREG</b>	: Lojistik regresyon
<b>ML</b>	: Makine Öğrenmesi
<b>MSF</b>	: Deprem Büyüklüğü Ölçek Faktörü
<b>OCR</b>	: Aşırı Konsolide Oranı
<b>RF</b>	: Rassal Orman
<b>ROC</b>	: Alıcı İşletim Karakteristiği
<b>SGD</b>	: Stokastik Gradyan İnişi
<b>SPT</b>	: Standart Penetrasyon Deneyi
<b>SVM</b>	: Destek Vektör Makineleri
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağı





## SİMGELER

$a$	: Net alan oranı
$A_T$	: Kesit alanı
$b$	: Sürtünme alan faktörü
$B_q$	: Boşluk suyu basıncı oranı
$D_{50}$	: Ortalama dane boyutu
$E$	: Entropi değeri
$F$	: Normalleştirilmiş sürtünme oranı
$f_s$	: Sürtünme direnci
$F_T$	: Eksenel yük
$G$	: Gini endeksi
$I_c$	: Zemin davranış indeksi
$IP$	: Plastisite indisi
$I_L$	: Sıvılık indisi
$K_c$	: Zemin dane karakteristiği
$Pa$	: Atmosfer basıncı
$R_f$	: Sürtünme oranı
$r_d$	: Ortalama kayma gerilmesi
$u$	: Boşluk suyu basıncı
$q_c$	: Koni uç direnci
$Q$	: Normalleştirilmiş koni direnci
$V_s$	: Kayma Dalgası Hızı
$w_n$	: Doğal su muhtevası
$w_L$	: Likit limit
$\sigma$	: Gerilme
$\tau_{av}$	: Gerilme azaltma katsayısı



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> Farklı araştırmacılar tarafından önerilen sınışlaşma kriterleri.....	17
<b>Tablo 3.1.</b> Zemin Özellikleri ve Tanımlamalar.....	27
<b>Tablo 3.2.</b> Veri setinin özet istatistikleri. ....	27
<b>Tablo 3.3.</b> Zemin özelliklerinin korelasyon matrisi. ....	32
<b>Tablo 3.4.</b> Algoritmaların seçilmiş hiperparametreleri. ....	33
<b>Tablo 3.5.</b> DT algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları. ....	34
<b>Tablo 3.6.</b> LOGREG algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları. ....	34
<b>Tablo 3.7.</b> DVM algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları. ....	35
<b>Tablo 3.8.</b> KNN algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları. ....	35
<b>Tablo 3.9.</b> SGD algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.....	35
<b>Tablo 3.10.</b> YSA algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.....	35
<b>Tablo 3.11.</b> Modellerin performans karşılaştırmaları.....	36
<b>Tablo 4.1.</b> Farklı araştırmacılar tarafından önerilen bulunan zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) formülleri.....	55
<b>Tablo 4.2.</b> Zemin davranış tipi ( $I_c$ )'ye göre zemin bölgeleri sınırları.....	55
<b>Tablo 4.3.</b> $I_c$ değerleriyle tanımlanan zemin sınıfları (Bol, 2013).....	56
<b>Tablo 4.4.</b> Örnek veri tabanı içeriği. ....	62
<b>Tablo 4.5.</b> Kil ve siltlerin minimum, maksimum ve sınır $I_c$ değerleri. ....	74
<b>Tablo 4.6.</b> Sınışlaşmaz ince daneli zeminlerin CPT verileri ile yapılan değerlendirmeye göre ayırımı. ....	81
<b>Tablo 4.7.</b> $I_c$ formüllerinde orijinal ve optimize edilmiş katsayılar ve iyileşme oranı. .....	87



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. SPT-N Çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ilişkisi (Seed ve Idriss, 1971). ....	8
Şekil 2.2. Temiz kumlar için çevrimsel direnç oranı, CRR (Robertson ve Wride, 1998). ....	9
Şekil 2.3. Çin kriterlerinin grafik gösterimi (Youd ve ark, (2001); Wang (1979) ve Seed ve Idriss (1982).....	12
Şekil 2.4. Sıvılaşabilir Zemin Tiplerinin Değerlendirilmesine İlişkin Öneriler (Seed ve ark, 2003). ....	13
Şekil 2.5. Andrews ve Martin (2000) tarafından önerilen sıvılaşmaya yatkınlık kriterleri.....	14
Şekil 2.6. Bray ve Sancio (2006) tarafından önerilen sıvılaşma duyarlılık kriterleri.	15
Şekil 2.7. a) Kohezyonlu, kohezyonsuz veya ara davranış sergileyen zeminler için temsili değerleri gösteren Atterberg tablosu, b) İnce daneli zeminler için kum benzeri davranıştan kil benzeri davranışa geçiş şeması (Boulanger ve Idriss, 2004, 2006). ....	16
Şekil 2.8. Bol ve ark, (2010)'a göre sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerin üçgen sınıflandırma kartındaki lokasyonları ve test bölgesi.....	17
Şekil 3.1. Karar ağacının örnek bir gösterimi. ....	22
Şekil 3.2. Bir MLP'nin Ağ Mimarisi.....	23
Şekil 3.3. Çalışma alanının harita üzerinde konumu. ....	25
Şekil 3.4. Adapazarı şehir merkezi ve çalışmanın araştırma noktaları. ....	26
Şekil 3.5. Özelliklerin dağılımını gösteren boxplot grafikleri. ....	28
Şekil 3.6. Hedef değer frekansları.....	29
Şekil 3.7. Beş katmanlı çapraz doğrulama yöntemi.....	29
Şekil 3.8. Zemin sıvılaşma potansiyellerinin karışıklık matrisi.....	30
Şekil 3.9. Özellikler arasındaki ilişkiler.....	32
Şekil 3.10. Modellerin hem test hem de eğitim setleri için ROC Eğrisi.....	37
Şekil 3.11. En iyi karar ağacı modeli görselleştirmesi.....	37
Şekil 3.12. DT modelinden elde edilen özelliklerin önemi. ....	38
Şekil 4.1 Koni Penetrasyon deneyinde ölçümler .....	42
Şekil 4.2. Sonda ve konik ucun geometrik özellikleri (Lunne ve ark, 1997). ....	43
Şekil 4.3. Sakarya Üniversitesine ait paletli koni penetrasyon deney aleti. ....	45
Şekil 4.4. CPT deney sistemi ve ölçülen parametreler. ....	45
Şekil 4.5. CPT'de boşluk suyu basıncının koni geometrisine etkisi (Mayne ve ark, 1990). ....	47
Şekil 4.6. Begemann (1965) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.....	48
Şekil 4.7. Schmertmann (1978) tarafından önerilen sınıflandırma kartı. ....	49
Şekil 4.8. Douglas ve Olsen (1981) tarafından önerilen sınıflandırma kartı. ....	50
Şekil 4.9. Robertson ve ark, (1986) tarafından önerilen sınıflandırma kartı. ....	50

Şekil 4.10. Robertson (1990) tarafından önerilen sınıflandırma kartı. ....	51
Şekil 4.11. Jefferies ve Davies (1991) tarafından önerilen sınıflandırma kartı. ....	52
Şekil 4.12. Adapazarı'nda yapılan aynı noktaya ait sondaj ve CPT sonda logları. ...	53
Şekil 4.13. Robertson ve Wride (1998) ve Bol (2013)'e göre zemin sınıflarının göreceli frekans diyagramları (Bol ve ark, 2019). ....	57
Şekil 4.14. Bol (2013) prosedürü kullanılarak CPT verilerinden zemin sınıflandırmasının uygulanmasını gösteren akış şeması. ....	58
Şekil 4.15. Bol (2013) tarafından önerilen zemin sınıfları dağılımı. ....	59
Şekil 4.16. Kil ve siltlerin zemin davranış indisi ( $I_c$ ) açısından incelenmesi (Önalp ve ark, 2006). ....	60
Şekil 4.17. Kullanılan zeminlerin TS1500 (2000) sınıflarının dağılım grafiği.....	63
Şekil 4.18. a) Veri tabanında likit limit dağılımı b) Veri tabanında FC, ince dane dağılımı c) Veri tabanında plastisite indisi dağılımı d) Veri tabanında zemin sınıfları dağılımı. ....	64
Şekil 4.19. Veri tabanında bulunan zeminlerin likit limit ve plastisite indisinin CPT deneyinde ölçülen değerler ile karşılaştırılması. ....	65
Şekil 4.20. Veri tabanında bulunan zeminlerin kil yüzdesi, $D_{50}$ ve $w_n/w_L$ değerlerinin CPT'de ölçülen değerler ile karşılaştırılması. ....	66
Şekil 4.21. Veri tabanında bulunan zeminlerin zemin sınıflarının CPT'de ölçülen değerler ile karşılaştırılması. ....	67
Şekil 4.22. Veri tabanında bulunan zeminlerin fiziksel özelliklerinin CPT deneyinde ölçülen değerler ile karşılaştırılması. ....	67
Şekil 4.23. Kullanılan verilerin TS1500(2000) plastisite kartındaki pozisyonları. ...	69
Şekil 4.24. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Robertson ve Wride 1998) dağılımı.....	70
Şekil 4.25. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Been ve Jefferies 1992) dağılımı.....	71
Şekil 4.26. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Jefferies ve Davies 1993) dağılımı.....	71
Şekil 4.27. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Juang ve ark, 2003) dağılımı. ....	72
Şekil 4.28. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Li ve ark, 2007) dağılımı.....	72
Şekil 4.29. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Robertson, 2010) dağılımı... 73	
Şekil 4.30. Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi $I_c$ (Bol, 2013) dağılımı. ....	73
Şekil 4.31. Wang (1979)'a göre yapılan sınıflandırma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması. ....	76
Şekil 4.32. Andrews ve Martin (2000)'e göre yapılan sınıflandırma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması. ....	77
Şekil 4.33. Seed ve ark, (2003)'e göre yapılan sınıflandırma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.....	78
Şekil 4.34. Bol ve ark, (2010)'a göre yapılan sınıflandırma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.....	80
Şekil 4.35. Makine öğrenmesi sonuçlarına göre yapılan sınıflandırma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması. ....	81
Şekil 4.36. Normal dağılım altında kalan alan hesabı.....	83
Şekil 4.37. Zeminlerin sınıflandırma potansiyeline ve $I_c$ , Been ve Jefferies (1992)'ye göre normal dağılımı. ....	84
Şekil 4.38. Zeminlerin sınıflandırma potansiyeline ve $I_c$ , Jefferies ve Davies (1993)'e göre normal dağılımı. ....	84

<b>Şekil 4.39.</b> Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve Ic, Robertson ve Wride (1998)'e göre normal dağılımı. ....	85
<b>Şekil 4.40.</b> Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve Ic, Juang ve ark, (2003)'e göre normal dağılımı. ....	85
<b>Şekil 4.41.</b> Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve Ic, Li ve ark, (2007)'ye göre normal dağılımı. ....	86
<b>Şekil 4.42.</b> Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve Ic, Robertson (2010)'a göre normal dağılımı. ....	86





## SIVILAŞABİLİR SİTLİ ZEMİNLERİN KONİ PENETRASYON DENEYİ İLE TANISI

### ÖZET

Depremler özellikle alüvyal ortamlarda zemin büyütmesi, çevrimsel yumuşama ve sıvılaşma gibi olumsuz zemin davranışlarını ortaya çıkarabilmekte ve bu etkilere maruz kalan zeminler üzerlerinde bulunan yapılarda büyük deformasyonlara veya göçmelere neden olabilmektedir. Adapazarı gibi su seviyesinin yüzeye yakın olduğu alüvyal ortamlarda sıvılaşma problemi yaygın olarak görülebilmektedir. Suya doymuş kumlar, siltli kumlar ve siltler sıvılaşmaya en yatkın zemin türleridir. Sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminlerin belirlenebilmesi için pek çok farklı yöntem mevcuttur. İri daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler yeterince mevcut olup tutarlı sonuçlar vermektedir. Yapılan araştırmalardan anlaşıldığı üzere ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için önerilen yöntemlerden genel bir yaklaşım elde etmek pek mümkün olmamaktadır. Zeminlerin fiziksel özelliklerine dayalı olarak geliştirilen sıvılaşma kriterleri birbirinden farklı zemin özellikleri ve bu özelliklerin farklı sınır değerlerini sunmaktadır. Bu sebeple mevcut kriterlerden yola çıkarak bu çalışmada kullanılan veri tabanındaki zeminler ile makine öğrenmesi yöntemlerine dayalı yeni öneriler sunulmuştur. Çalışma kapsamında, iyi bilinen yedi makine öğrenimi yaklaşımı kullanılarak zemin sıvılaşma potansiyeli için bir model sunulmuştur. Kullanılan algoritmalar tüm veri setinin eğitim kalitesine göre sıralandığında karar ağaçlarının (DT) %90 doğruluk başarı oranı ile en yüksek sonuçları elde ettiği görülmüştür. Belirtilen DT modeli, rastgele seçilen eğitim setinde %91 ve test setinde %84 doğrulukla sonuçlanmıştır. Bu çalışmadaki DT modeli sıvılaşma tahmini için iyi bir alternatif sunmakta ve önceki çalışmalara göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Ayrıca ele alınan veri setindeki özelliklerin önemi karar ağaçları ile belirlenmiştir. Buna göre özellik sıralaması  $D_{50}$ , derinlik, kil içeriği FC, kil yüzdesi,  $w_n$ ,  $w_L$  olarak keşfedilmiştir.

Günümüzde zemin incelemelerinde önemli bir yer tutan ve nitelikli veriler elde edilmesini sağlayan koni penetrasyon deneyi (CPT) sonuçlarıyla da sıvılaşma analizi yapılmaktadır. CPT ile zeminlerin sınıflandırılmasında zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) ön plana çıkmaktadır. CPT sonuçları ve farklı araştırmacılar tarafından sunulan  $I_c$  formülleri, veri tabanında bulunan ince daneli zeminlerin fiziksel özellikleriyle pek çok yönden karşılaştırılmış ve sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminlerin ayırt edilmesi için belirleyici olabilecek bulgular elde edilmiştir. Mevcut  $I_c$  formüllerinin sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminleri belirlemede nasıl bir performans sergilediği incelenmiş ve iyileştirmeye yönelik olarak  $I_c$  formüllerinin optimizasyonu yapılmıştır. Kil ve silt zeminlerin sınırlarının  $I_c$  ile belirlenmesine yönelik 1999 Adapazarı depreminden itibaren yapılan saha çalışmalarından elde edilen geniş bir veri tabanı kullanılmıştır. CPT deneyleriyle eş zamanlı olarak yapılan sondajlardan elde edilmiş ve örselenmemiş numunelerle yapılan fiziksel özellik deney sonuçları da bulunmaktadır. Böylece CPT verisiyle birlikte geleneksel sınıflandırma yöntemlerinde kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri verileri bir araya getirilmiş, bu verileri karşılaştırma ve

analiz etme imkanı doğmuştur. Veri tabanında bulunan 776 veri kullanılmıştır. Söz konusu her bir verinin likit limit, plastik limit, kil yüzdesi, su muhtevası, ince dane oranı ve ortalama dane çapı gibi bilgileri bulunmaktadır.

İnce daneli zeminlerin sınıflarını belirlemek için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen zemin davranış indeksi  $I_c$  değerleri kullanılmaktadır fakat kil ve silt zeminler için belirli bir  $I_c$  değeriyle tam bir ayırım yapılamamaktadır. Seçilen her bir  $I_c$  değerine karşılık gelen kil ve silt bulunabilmektedir. Kil ve siltlerin en iyi ayırımını yapan öyle bir  $I_c$  belirlensin ki bu değer altıda maksimum seviyede minimum seviyede killer bulunması hedeflenmiştir. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  formülleriyle kil ve siltlerin dağılımları incelendiğinde kil ve siltleri ayırmada en yüksek doğrulukla ayırabilecek sınır değeri, kil ve siltlerin her bir  $I_c$  formülüne göre aldıkları minimum ve maksimum değerleri bulunmuştur. Kil ve siltleri ayırmada belirlenen sınır değerinin altında kalan oranların farkına göre sonuçlar incelendiğinde  $I_c = 2.55$  sınır değeriyle %74.5 fark oranı ile en iyi ayırımı yaptığı söylenebilir.

Zemin davranış indeksi  $I_c$  değerleriyle sınıflaştırılabilir ve sınıflaştırılmaz zeminlerin belirlenmesi için veri tabanındaki zeminlerin farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  değerleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu noktada öncelikle zeminlerin sınıflaştırma potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Zeminlerin sınıflaştırma potansiyeli belirlenirken daha önce yapılan çalışmalarda saha gözlemlerine bakılmıştır. Saha gözlemleri bulunmayan sahalarda için literatürde fiziksel özelliklere dayalı olarak belirlenen sınıflaştırma kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Sınıflaştırma potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminlerin zemin davranış tipi indeksi  $I_c$ , farklı araştırmacılar tarafından önerilen formüllere göre hesaplanmış bu formüllerden hangilerinin sınıflaştırılabilir ve sınıflaştırılmaz zeminleri daha net bir şekilde ayırt edebildiği irdelenmiştir. Buna ilaveten her bir formüldeki elemanların içerisinde çeşitli katsayılar kullanılmaktadır. Bu katsayıların belirli sınırlar içerisinde değişiminin sınıflaştır ve sınıflaştırılmaz bölgeyi daha iyi bir şekilde belirlemesinin mümkün olup olmadığı irdelenmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda orijinal formüllere göre %21,6 mertebelerine varan iyileştirmeler olduğu görülmektedir. Herhangi bir  $I_c$  formülünün sınıflaştırma potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminleri net bir şekilde ayırt edemediği bazı zeminlerin her halükarda ortak alanda kaldığı görülmektedir.

Fiziksel özellikleri bilinen ince daneli 776 numunenin farklı araştırmacılar tarafından sınıflaştırma değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan bu değerlendirmelere göre her bir yöntemle göre sınıflaştır, sınıflaştırılmayan ve test bölgesine düşen veriler tespit edilmiştir. Daha sonra sınıflaştır ve sınıflaştırılmayan numuneler ait ortalama koni penetrasyon uç direnci, sürtünme direnci ve boşluk suyu basınçları tespit edilmiş ve bu ham verilerden zemin sınıflamasına yönelik olarak normalize edilmiş uç dirençleri ile sürtünme oranları tespit edilmiştir. Sınıflaştır, sınıflaştırılmayan ve test bölgesine düşen  $I_c$  değerlerinin normal dağılımları incelenmiştir. Sınıflaştırılmaz, sınıflaştırılabilir ve test bölgesine düşen zeminlerin zemin davranış indeksleri ile normalize edilmiş uç direnci ve sürtünme oranları göz önüne alınmıştır. CPT verileri göz önüne alındığında bir zeminin sınıflaştırılmaz kabul edilebilmesi için zemin davranış indeksinin ( $I_c$ ) 2.98'den büyük olması gerekmektedir. Ayrıca normalize edilmiş uç direncinin  $10^3$ 'den küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ise 3.08'den büyük olması gerekmektedir.

## **IDENTIFICATION OF LIQUEFIABLE SILTY SOILS USING CONE PENETRATION TEST**

### **SUMMARY**

Earthquakes can induce adverse soil behaviors, such as soil liquefaction, cyclic softening, and ground amplification, which can result in significant deformations or settlements in structures located on the affected soils, especially in alluvial environments. Liquefaction issues are commonly observed in alluvial environments with shallow water levels, such as Adapazarı. Saturated sands, silty sands, and silts are the most susceptible soil types to liquefaction. There are several different methods available for determining liquefiable and non-liquefiable soils. Methods used to assess the liquefaction potential of coarse-grained soils are well-established and provide consistent results. However, obtaining a general approach for determining the liquefaction potential of fine-grained soils is challenging. Liquefaction criteria based on the physical properties of soils present different soil characteristics and their respective threshold values. Therefore, this study proposes new recommendations based on machine learning methods using the existing criteria and the soil data available in the database. Within the scope of the study, a model for the liquefaction potential of soils is presented using seven well-known machine learning approaches. The Adapazarı dataset is evaluated based on expert opinions and subjected to preprocessing before training. The results obtained by algorithms with different parameters during the training process are recorded, allowing algorithms with the best parameters to yield better results. When the algorithms are ranked based on the quality of the training set, decision trees (DT) exhibit the highest accuracy rate of 90%. Random Forest (RF) classifier provides the second-best results. The mentioned DT model yields a 91% accuracy on the randomly selected training set and an 84% accuracy on the test set. Rules previously established based on expert opinions to determine liquefaction are improved using machine learning methods. The DT model in this study offers a good alternative for liquefaction prediction and provides more accurate results compared to previous studies. Additionally, the importance of features in the considered dataset is determined using decision trees. According to the feature ranking, the order of significance is discovered to be  $D_{50}$ , depth, fines content (FC), clay percentage,  $w_n$ ,  $w_L$ .

In today's soil investigations, liquefaction analysis is also performed using Cone Penetration Test (CPT) results, which play an important role in obtaining reliable data. The primary use of the CPT test is to determine the soil stratigraphy and pre-evaluate geotechnical properties. The test is applied in soft to medium-stiff soils where the probe can be pushed down without the use of impact or rotation, up to the gravel fraction. In the classification of soils using CPT, the soil behavior index ( $I_c$ ) stands out. CPT results and various  $I_c$  formulas proposed by different researchers have been compared in many aspects with the physical properties of fine-grained soils available in the database, leading to findings that could be decisive in distinguishing liquefiable

and non-liquefiable soils. The performance of existing  $I_c$  formulas in identifying liquefiable and non-liquefiable soils has been examined, and optimization of the  $I_c$  formulas has been carried out for improvement. A comprehensive database obtained from field studies conducted since the 1999 Adapazarı earthquake, focusing on the determination of the boundaries of clay and silt soils using  $I_c$ , has been utilized. The CPT data was obtained from experiments conducted with a 200 kN capacity acoustic CPTU machine owned by Sakarya University. Physical property test results from disturbed and undisturbed samples obtained from concurrent drilling with CPT experiments are also available. Thus, the physical property data of soils used in traditional classification methods were combined with CPT data, providing an opportunity to compare and analyze these data. A total of 776 data points in the database were used. Each data point includes information such as liquid limit, plastic limit, clay content, water content, fines content, and average grain diameter. It can be stated that the liquid limit values of soils range from 30 to 50, and with increasing liquid limit values, there is a decrease in shear strength and an increase in friction ratios. Similarly, the fines content of soils varies between 60% and 80%, and as the fines content increases, the shear strength decreases and the friction ratio increases.

Different researchers have proposed soil behavior index ( $I_c$ ) values to determine the classes of fine-grained soils, but a precise differentiation for clay and silt soils cannot be achieved with a specific  $I_c$  value. Each chosen  $I_c$  value can correspond to both clay and silt soils. The aim is to determine a specific  $I_c$  value that provides the best distinction between clay and silt, with the highest percentage of clay soils below this value and the lowest percentage above it. When examining the distributions of clay and silt using different  $I_c$  formulas proposed by various researchers, the  $I_c$  threshold value that can most accurately separate clay and silt soils was determined by considering the minimum and maximum values obtained by clay and silt for each  $I_c$  formula. When examining the results based on the percentage of data points falling below the determined threshold value for the separation of clay and silt, it can be said that with an  $I_c$  value of 2.55 achieves the best distinction with a 74.5% difference ratio.

Soil behavior index ( $I_c$ ) values have been analyzed separately for liquefiable and non-liquefiable soils in the database, considering the  $I_c$  values proposed by different researchers. At this point, it is necessary to determine the liquefaction potential of the soils. For the determination of liquefaction potential, field observations from previous studies were examined. For areas where field observations were not available, liquefaction criteria based on physical properties, as determined in the literature, were taken into consideration. In the study, soils that satisfy at least 3 or more out of 11 liquefaction criteria were categorized as potentially liquefiable soils, while soils that did not satisfy these criteria were categorized as potentially non-liquefiable soils. Accordingly, 545 soils were identified as having low liquefaction potential, and 233 soils were identified as having high liquefaction potential. The soil behavior index  $I_c$  for soils with low and high liquefaction potential was calculated using formulas proposed by different researchers, and an analysis was conducted to determine which formulas could distinguish liquefiable and non-liquefiable soils more effectively. Additionally, various coefficients are used in each formula. The possibility of these coefficients, within certain limits of variation, better determining the liquefiable and non-liquefiable regions was examined. The evaluation results indicate that one of the  $I_c$  formula is the most effective in distinguishing liquefiable and non-liquefiable soils, both with its original coefficients and optimized coefficients. The optimization process

resulted in improvements of up to 21.6% compared to the original formulas. It is observed that no single  $I_c$  formula can clearly distinguish soils with low and high liquefaction potential, and there are some soils that fall into the common area regardless of the formula used.

The evaluation of the liquefaction of a fine-grained sample with known physical properties, numbered 776, has been conducted by different researchers. Based on these evaluations, data regarding the liquefied, non-liquefied, and test zone samples have been determined for each method. Subsequently, the average cone penetration resistance, friction resistance, and pore water pressures have been determined for the liquefied and non-liquefied samples, and these raw data have been normalized to determine the normalized cone resistance and friction ratios for soil classification purposes. The normal distributions of the  $I_c$  values for the liquefied, non-liquefied, and test zone samples have been examined. Soil behavior indexes, normalized cone resistance, and friction ratios have been taken into account for soils that do not liquefy, can liquefy, and fall into the test zone. The distinction of non-liquefying soils based on CPT data can be made definitively according to all criteria. As observed from both the normal distribution and the classification chart distributions of non-liquefied and test zone soils largely overlap. This is due to the fact that the soils falling into the test zone exhibit a wide range of both liquid limit and plasticity index. Accordingly, considering the CPT data, for a soil to be considered non-liquefiable, the soil behavior index ( $I_c$ ) should be greater than 2.98. In addition, the normalized cone resistance should be less than 10 and the normalized friction ratio should be greater than 3.08.



## 1. GİRİŞ

Tektonik açıdan son derece aktif bir bölgede yer alan Türkiye sıklıkla orta ve büyük ölçekli depremler ile karşı karşıya kalabilmektedir. Depremler özellikle alüvyal ortamlarda zemin büyütmesi, çevrimsel yumuşama ve sıvılaşma gibi olumsuz zemin davranışlarını ortaya çıkarabilmekte ve bu etkilere maruz kalan zeminler üzerlerinde bulunan yapılarda büyük deformasyonlara veya göçmelere neden olabilmektedir. Adapazarı gibi su seviyesinin yüzeye yakın olduğu alüvyal ortamlarda sıvılaşma problemi yaygın olarak görülebilmektedir. Deprem gibi çevrimsel yüklemelere maruz kalan suya doymuş zeminlerde, boşluk suyu basınçlarının artarak toplam gerilmeye geçici olarak eşitlenmesi sonucunda, sifra yönelen efektif gerilme ile kayma dayanımı yitirilmekte ve zemin sıvılaşması meydana gelmektedir. Suya doymuş kumlar, siltli kumlar ve siltler sıvılaşmaya en yatkın zemin türleridir. Sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminlerin belirlenebilmesi için pek çok farklı yöntem mevcuttur. İri daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler yeterince mevcut olup tutarlı sonuçlar vermektedir. Yapılan araştırmalardan anlaşıldığı üzere ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için önerilen yöntemlerden genel bir yaklaşım elde etmek pek mümkün olmamaktadır. Zeminlerin fiziksel özelliklerine dayalı olarak geliştirilen sıvılaşma kriterleri birbirinden farklı zemin özellikleri ve bu özelliklerin farklı sınır değerlerini sunmaktadır. Bu sebeple mevcut kriterlerden yola çıkarak bu çalışmada kullanılan veri tabanındaki zeminler ile makine öğrenmesi yöntemlerine dayalı yeni öneriler sunulmuştur.

Günümüzde zemin incelemelerinde önemli bir yer tutan ve nitelikli veriler elde edilmesini sağlayan koni penetrasyon deneyi (CPT) sonuçlarıyla da sıvılaşma analizi yapılmaktadır. Burada zeminlerin sınıflandırılmasında da kullanılan zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) ön plana çıkmaktadır. CPT sonuçları ve farklı araştırmacılar tarafından sunulan  $I_c$  formülleri, veri tabanında bulunan ince daneli zeminlerin fiziksel özellikleriyle pek çok yönden karşılaştırılmış ve sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminlerin ayırt edilmesi için belirleyici olabilecek bulgular elde edilmiştir. Mevcut  $I_c$  formüllerinin sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminleri belirlemede nasıl bir performans

sergilediği incelenmiş ve iyileştirmeye yönelik olarak  $I_c$  formüllerinin optimizasyonu yapılmıştır.

### **1.1. Tezin Amacı**

Bu tez çalışması kapsamında sıvılaşabilir ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılagelen fiziksel özelliklere ve koni penetrasyon deneyi (CPT)'ye dayalı yöntemlerin genel bir değerlendirmesinin yapılması ve sıvılaşabilir – sıvılaşmaz ince daneli zeminlerin koni penetrasyon deneyinin çıktılarıyla daha net bir şekilde ayırt edilmesi için yeni öneriler sunulması amaçlanmaktadır.

### **1.2. Tezin Kapsamı**

Tezin 2. bölümünde sıvılaşmanın genel tanımları ve sıvılaşabilir zeminlerin belirlenmesinde kullanılan fiziksel özelliklere dayalı kriterler sunulmuştur. 3. bölümde sıvılaşabilir ince daneli zeminlerin belirlenmesi amacıyla uygulanan makine öğrenmesi yöntemleri ve sonuçları sunulmaktadır.

Tezin 4. bölümünde koni penetrasyon deneyi (CPT) genel olarak ele alınmış, deneyin uygulanması, deneyde ölçülen parametreler sunulmuştur. CPT ile zemin sınıflamasında kullanılan yöntemler irdelenmiş özellikle ince daneli zeminlerin sınıflandırılması için mevcut yöntemler veri tabanındaki zeminlerin özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Kil ve silt zeminlerin belirlenmesi için zemin davranış indeksi,  $I_c$  formülleri karşılaştırılmış ve sınır değerleri verilmiştir. Farklı araştırmacılar göre sıvılaşma değerlendirilmesi yapılmış ve sıvılaşmaz zeminlerin  $I_c$  sınırları sunulmuştur. Son olarak mevcut  $I_c$  formüllerinin sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminleri ayırt etmedeki performansları incelenmiş ve iyileştirmeye yönelik optimizasyon yapılmıştır.



## 2. ZEMİNLERİN SIVILAŞMASI

Sıvılaşma, geoteknik mühendisliğindeki en önemli, enteresan ve kompleks çalışma alanlarından biridir. Sıvılaşma kaynaklı yenilme, depremler sırasında meydana gelen başlıca hasar unsurlarından biri olarak kaydedilmiştir. Zemin sıvılaşması genellikle bir depremde binalarda, otoyollara, köprülerde ve diğer altyapı bileşenlerinde meydana gelen hasarın ana nedenlerinden biridir. Bu nedenle sıvılaşma uzun yıllardan beri geoteknik mühendisliğinin önemli bir çalışma sahası olarak görülmektedir. Zemin sıvılaşma davranışının anlaşılabilmesi için araştırmacılar, deneysel ve teorik olarak incelenen zemin ve akışkan mekaniği prensiplerinin yanı sıra iyi belgelenmiş saha vaka analizlerinden de faydalanmıştır.

Yumuşatmak, eritmek veya zayıflatmak anlamına gelen Latince "liquefacere" kelimesinden türetilen sıvılaşma, ani sismik yüklemeler sırasında kumların direncindeki azalmayı anlatan genel bir terimdir. Sözlük anlamı olarak, nesnenin akışkan olduğu, akışkan davrandığı veya sıvı, sıvılaştırılmış veya erimiş olduğu bir durum olarak tanımlanır (Polito, 1999).

Terzaghi 1925 yılında, boşluk suyu basıncının artmasıyla yarı kararlı bir yapıya sahip olan doymuş, kohezyonsuz zeminlerin akma oturmalarından söz ederek, sıvılaşmanın ilk tanımlarından birini yapmıştır (Castro, 1969).

Terzaghi ve Peck (1948) çok gevşek kumların aniden dayanım kaybına uğraması ve biraz örselenerek gösterdiği akma davranışına "kendinden sıvılaşma" tanımını kullanmışlardır. Ancak "sıvılaşma" terimi ilk kez Mogami ve Kubo (1953) tarafından ifade edilmiştir.

Sıvılaşma sözcüğü, suya doymuş gevşek kumlu zeminlerde dinamik etki ile boşluk suyu basınçlarının hızla yükselmesi ve efektif gerilmelerin sıfıra inmesi olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996).

Zemin sıvılaşması zeminin kısa bir süre için rijitliğinin ve dayanımının büyük bir bölümünü kaybetmesi olayıdır. Fakat bu süre sıvılaşmanın sebep olabileceği ölümler

veya finansal kayıplar gibi birçok yenilme için yeterince uzun bir süredir (Jefferies ve Been, 2006).

Tarih boyunca depremler, sıvılaşma ve buna bağlı hareketler nedeniyle büyük hasara neden olmuştur. Sıvılaşma, zemin daneleri arasındaki boşlukların tamamen suyla dolduğu ve her bir zemin danesinin su ile kaplandığı suya doymuş durumdaki zeminde meydana gelir. Zemin boşluklarındaki bu su, zemin parçacıklarına basınç uygular ve bu basınç, zemin parçacıklarının birbirleriyle ne kadar yakın temas halinde olduğuyla ilgili olarak değişir. Bir depremden önce, su basıncı nispeten düşüktür. Bununla birlikte, sismik kuvvetlerin neden olduğu titreşimler, su basıncını zemin danelerinin serbest bir halde hareket edebileceği seviyeye kadar yükseltebilir (Serdar, 2006).

Zemin sıvılaşmasının olumsuz etkileri; 1920 California Calvers, 1938 Montana Fort Peck, 1948 Fukui, 1964 Niigata, 1964 Alaska Anchorage, 1971 California San Fernando, 1980 Mino-Owari depremlerinde görülmüştür. Ülkemizde de özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında sıvılaşma sonucu ciddi ve yaygın hasarlar gözlenmiştir. Zemin sıvılaşması, depremler sonucunda görüldüğü üzere ciddi hasarlara neden olmuştur. Özellikle 1964'te Niigata (Japonya) ve Büyük Alaska'da (ABD) yaşanan depremlerden sonra sıvılaşmanın oluşum mekanizmalarını ve etkilerini anlamak için kapsamlı yapılan araştırmalar hızlandı. O zamandan beri, bu alanda büyük ilerleme kaydedildi. Zemin sıvılaşması çalışma alanı günümüzde geoteknik mühendisliğinin önemli bir alanı ve kendi içinde de özel uygulama alanlarını barındıran bir konu olarak görülmektedir.

Özaydın (2007) sıvılaşmayı, granüler bir zeminde boşluk suyu basıncındaki artış ve efektif gerilmedeki azalma sonucu katı halden sıvı hale dönüşmesi olarak tanımlamıştır. Boşluk suyu basıncındaki artış, tekrarlı kayma deformasyonuna maruz kalan granüler zeminlerin sıkışma eğilimi sonucu meydana gelmektedir. Ani çevrimli yüklemeler neticesinde zemin boşluklarındaki su drene olamamakta ve bu sebeple sıkışmaya zorlanan boşluk suyu basıncı artış göstermektedir.

Katı halden sıvı hale geçiş daha az geçirimli gevşek ila orta derecede sıklıktaki siltli kumlar veya kumlu-çakıllı zemin profillerinde daha hızlı gerçekleşir. Bu zeminlerde boşluk suyu drenajı zayıf geçirgenliğe sahip bir örtü veya ara katman tarafından engellenir. Sıvılaşma meydana geldiğinde, zemin yumuşar ve büyük kayma deformasyonu meydana gelir. Gevşek malzemeler daha kolay yumuşama ve kayma

mukavemeti kaybı yaşarlar, bu da büyük kayma gerilimi değişikliklerine ve akma sıvılaşmasına (flow liquefaction) neden olabilir. Öte yandan orta sıklıktaki zeminler için sıvılaşma geçici yumuşamaya neden olur ve çevrimsel kayma gerilmesini arttırır, ancak uzama eğilimi mukavemet kaybı ve büyük deformasyonların oluşmasına mani olur. Bu tür zeminlerde çevrimli sıvılaşma (cyclic liquefaction) olarak tariflenen olgu görülebilmektedir. Sıvılaşmanın meydana geldiği durumlarda temel altında bulunan zeminlerde ve şevlerde akma türü yenilme mekanizması oluşabilmekte, eğimsiz veya hafif eğime sahip sahalarda da yanal yayılma meydana gelebilir. Sıkı olmayan zeminlerde sıvılaşma sırasında rezidüel boşluk suyu basınçları sönümlenme aşamasındayken kum kaynamaları ve nihayetinde sıkışmalar ve oturmalar gözlenebilir (Özaydın, 2007).

Çevrimsel yumuşama deprem yükü gibi drenajsız dinamik bir yükleme sonucu gözlemlenebilen çevrimsel sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik olarak ikiye ayrılır. Bu hareketler sebebiyle oluşan tepkiler çevrimsel yüklemenin büyüklüğü ve süresine bağlı olarak değişebilir. Çevrimsel gerilme tersine dönüşleri meydana geldiğinde (örneğin, bir deprem sarsıntısı sırasında), aşırı boşluk suyu basıncındaki artış nedeniyle zeminler nihai duruma ulaşma eğilimindedir. Eğer kayma geri dönüşleri efektif gerilmenin önemli ölçüde azalması için yeterli ise çevrimsel sıvılaşma meydana gelir. Kayma mukavemeti azaldıkça, zeminin dayanımı da azalır ve neredeyse sıfır dayanıma ulaşır, bu da düz veya hafif eğimli zeminler için büyük deformasyonlara neden olur. Boşluk suyu basıncının yeniden dağılımı akma sıvılaşmasına neden olabilir veya çevrimsel yüklemekten sonra deformasyon durabilir. Zeminin sıfır efektif gerilme seviyesine ulaşması için yeterli olmayan çevrimsel yükleme durumunda, çevrimsel hareketlilik meydana gelir ve bu da nispeten küçük deformasyonlara neden olur. Çevrimsel hareketlilik durumunda, zeminin rijitliği de azalır, ancak esas olarak “sıfır” değerine ulaşmaz, bu da küçük deformasyonların nedenidir. Sonuç olarak, bir depremden sonra gözlenen deformasyonlara hangi mekanizmanın neden olduğunu belirlemek zordur. Arazide gözlemlenen en yaygın mekanizma, deprem yüklemesinden kaynaklanan çevrimsel yumuşamadır (Robertson ve Wride, 1998).

Akma sıvılaşması, zemin bloğunun statik dengesi için olması gereken kayma gerilmesi, sıvılaşmış durumdaki zeminin kayma mukavemetinden daha büyük olduğunda meydana gelebilir. Akma sıvılaşmasının tersine, çevrimsel hareketlilik,

statik kayma gerilmesi sıvılaşmanın görüldüğü zeminin kayma mukavemetinden daha düşük olması halinde görülebilir (Kramer, 1996).

Doygun bir kum yer titreşimlerine maruz kalırsa, sıkışma eğilimi gösterir ve hacmi azalır. Drenaj oluşmaz ise hacimdeki azalma eğilimi zemin taneciklerinin aralarındaki suyu sıkıştırmasına neden olarak boşluk suyu basıncında artışa neden olur. Efektif gerilme teorisine göre, efektif gerilme toplam gerilme ile boşluk suyu basıncının farkıyla hesaplanır.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

burada  $\sigma'$  = efektif gerilme,  $\sigma$  = toplam gerilme,  $u$  = boşluk suyu basıncını simgelemektedir. Normal gerilmenin ( $\sigma$ ) sabit kaldığı düşünülürse, boşluk suyu basıncındaki ( $u$ ) kademeli artış, efektif gerilmenin ( $\sigma'$ ) kademeli olarak azalmasına neden olur. Boşluk suyu basıncı toplam gerilmeye eşit olacak şekilde arttığında, efektif gerilme sıfır olur. Zeminin rijitliği ve mukavemeti, efektif gerilmenin yüksekliğiyle alakalı olduğundan, efektif gerilmenin sıfır olması durumunda ve zemin sıvılaştığında, zemin mukavemeti tümüyle ortadan kalkar (H. B. Seed ve Lee, 1966).

## 2.1. Zemin Sıvılaşma Analizi

Zemin sıvılaşmasının analizinde ilk adım, hangi zemin türlerinin potansiyel olarak sıvılaşabilir olduğunu değerlendirmektir. Sıvılaşma vaka geçmişi verileri derlendiğinde rapor edilen sahaların büyük çoğunluğunun kumlu zeminler olduğu görülse de çakıllı, siltli ve killi zeminlerinde uygun koşullar altında sıvılaşabileceği kabul edilmektedir. Bu nedenle, potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler hakkında bilgi edinmek önemli bir adımdır. Sıvılaşma potansiyeli, eşdeğer sismik yükler ve sıvılaşma direnci ölçümleri karşılaştırılarak değerlendirilir. Deprem yükünün karakterize edilmesi için kullanılan genel kanaat çevrimsel kayma gerilmelerinin kullanılması yönündedir. Çevrimsel kayma gerilmesi genliğinin başlangıç düşey efektif gerilme ile normalleştirilmesiyle bir çevrimsel direnç oranı (CSR) bulunur. CSR, zemin profilinde farklı derinliklerde görülen depremlerin etkisiyle maruz kalınan gerilme seviyelerini temsil eder. Çevrimsel kayma gerilmelerini değerlendirmek için farklı prosedürler vardır. Bunlardan saha tepki analizleri veya maksimum yer yüzü ivmesi genliğinin bir fonksiyonu halinde CSR'yi tahmin etmek için "basitleştirilmiş" yaklaşım kullanılabilir (Kramer ve Seed, 1988).

İri daneli (kumsu) zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için arazide uygulanan standart penetrasyon deneyi (SPT) verileri Seed ve ark, (1983) koni penetrasyon deneyi (CPT) verileri Robertson ve Wride (1998) veya kayma dalgası hızı (Vs) Andrus ve Stokoe (2000) kullanılabilir. Seed ve Idriss. (1971) deprem titreşimleri esnasında meydana gelen çevrimsel sıvılaşma potansiyelinin bulunabilmesi için yaygın bir şekilde kullanılan bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu metotlarda; bir dizayn depremi aracılığıyla belirlenen çevrimsel kayma gerilmesi oranının “cyclic stress ratio” (CSR) ve zeminin çevrimsel direnç oranının “cyclic resistance ratio” tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımlarda kabaca; eğer CRR, CSR’den küçükse çevrimsel sıvılaşma oluşabilir tanısı konulmaktadır. CSR’ın tahmini için basitleştirilmiş prosedür Seed ve Idriss (1971) tarafından;

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \right) \quad (2.2)$$

olarak verilmiştir. Burada;

$a_{max}$  = yüzeydeki en büyük yatay ivme

$\sigma_{vo}$  = toplam düşey gerilme

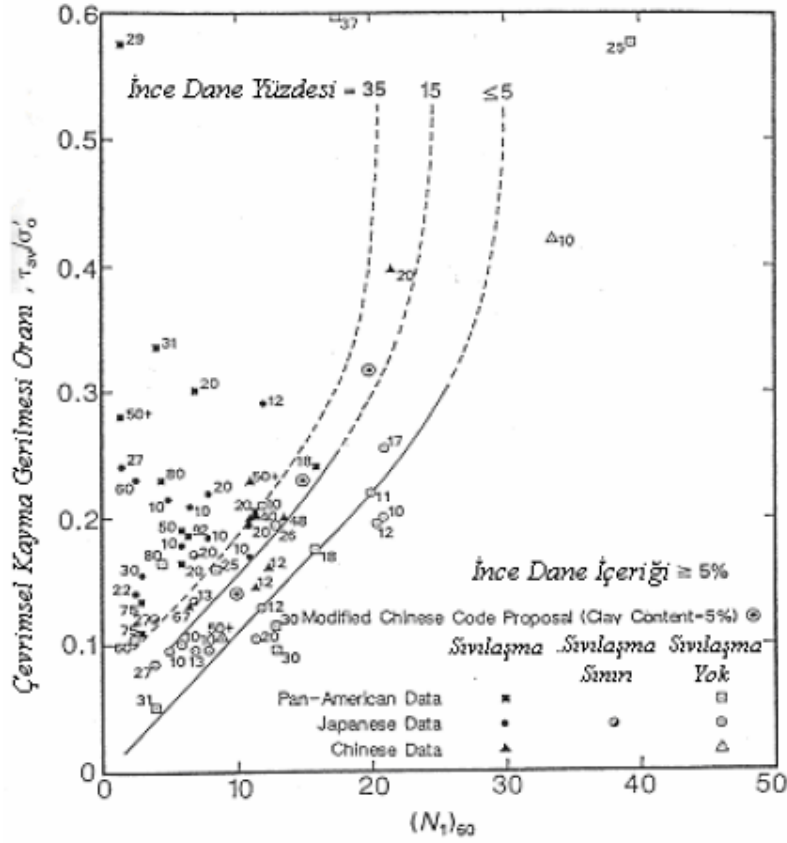
$\sigma'_{vo}$  = efektif düşey gerilme

$r_d$  = gerilme azaltma katsayısı

$r_d = 1 - 0.00765z$  ( $z \leq 9.15m$  için)

$r_d = 1.174 - 0.0267z$  ( $9.15m \leq z \leq 23m$  için)

$z$  = yüzeyden itibaren derinlik (metre cinsinden) olarak ifade edilmektedir.



**Şekil 2.1.** SPT-N Çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ilişkisi (Seed ve Idriss, 1971).

Çevrimsel direnç oranını (CRR) standart penetrasyon deneyi (SPT) ile kumlarda tahmin eden birden farklı formülasyon bulunmaktadır. Son yıllarda ise CPT kesintisiz okuma alması, güvenilirlik ve tekrar edilebilirliğinin yüksek olmasından dolayı CRR'ı tahmin etmede popüler olamaya başlamıştır. Son yıllarda kullanışlı arazi performans verilerinde özellikle CPT'de önemli artışlar olmuştur. Robertson ve Wride (1998) yaptığı çalışmada normalleştirilmiş koni uç direncini ( $q_{c1N}$ ) kullanmıştır.

$$q_{c1N} = \left( \frac{q_c}{P_{a2}} \right) C_Q = \frac{q_{c1}}{P_{a2}} \quad (2.3)$$

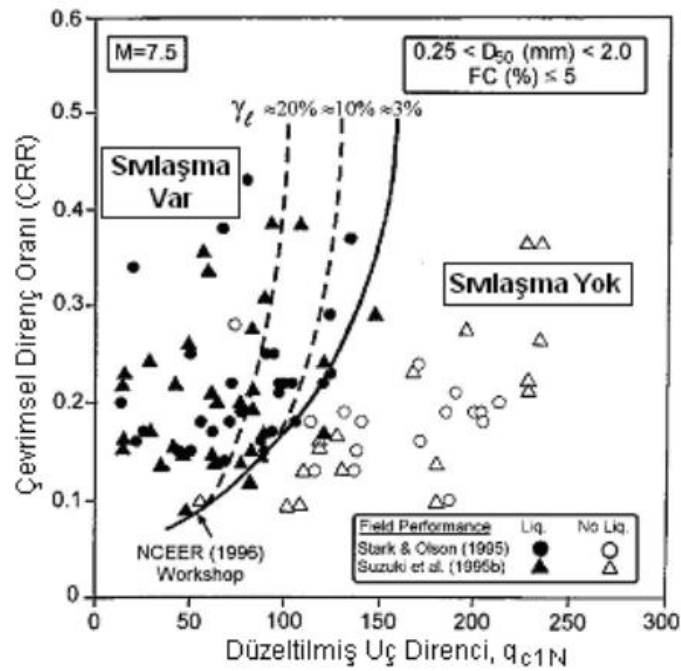
$$C_Q = \left( \frac{Pa}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (2.4)$$

Burada  $q_c$ , ölçülen koni uç direncidir;  $C_Q$  örtü yükü için düzeltmedir;  $Pa$ ,  $\sigma'_{vo}$  ile aynı birimlerdeki referans basınçtır ve  $P_{a2}$ , de  $q_c$ , ile aynı birimlerdeki referans basınçtır. Sığ derinliklerde genellikle maksimum  $C_Q = 2$  değeri uygulanır. Normalleştirilmiş koni penetrasyon direnci ( $q_{c1N}$ ) boyutsuzdur. CPT deneyinde arazide numune

alınmadığından CPT verileri ile sıvılaşma analizinde SPT' de olduğu gibi temiz kuma göre düzeltme yapmak zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) yardımı ile yapılmaktadır. Buna göre düzeltilmiş koni uç direnci;

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c(q_{c1N}) \quad (2.5)$$

olarak tarif edilir; burada  $K_c$  zeminin dane karakteristiğini ifade eden bir düzeltme faktörüdür.  $K_c$ 'nin tahmini için ise zemin sınıfını temsil eden zemin davranış tipi indeksi ( $I_c$ ) kullanılır. Düzeltilmiş koni uç direnci  $q_{c1N}$  ile CRR ilişkisi Şekil 2.2'de verilmiştir (Robertson ve Wride, 1998).



**Şekil 2.2.** Temiz kumlar için çevrimsel direnç oranı, CRR (Robertson ve Wride, 1998).

Robertson ve Wride (1998) zemin davranış indeksi  $I_c$  için denklem 2.6'yı önermiştir;

$$I_c = \sqrt{[3.47 - \log Q]^2 + [1.22 + \log F]^2} \quad (2.6)$$

denklemdaki  $Q$  boyutsuz normalize edilmiş koni penetrasyon direnci olup aynı zamanda  $q_{c1N}$ 'e eşittir ve denklem 2.7 ile hesaplanır:

$$Q = \left( \frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_{a2}} \right) \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (2.7)$$

burada,  $\sigma_{vo}$  ve  $\sigma'_{vo}$  sırasıyla toplam ve efektif gerilme,  $P_a$  ise referans basınç değeridir.  $P_a'$ 'nin birimi formülde kullanılan diğer parametrelerin birimiyle aynıdır.

Örneğin  $\sigma'_{vo}$  kPa birimiyle ifade edilmişse  $P_a = 100$  kPa, MPa birimiyle ifade edilmişse  $P_a = 0.1$  Mpa dır.

Yüzde cinsinden normalleştirilmiş sürtünme oranı  $F$  ise denklem 2.8 ile hesaplanır:

$$F = \left[ \frac{f_s}{(q_c - \sigma_{vo})} \right] \times 100 \quad (2.8)$$

burada;  $q_c$  koni uç direnci,  $f_s$  sürtünme direnci ve  $\sigma_{vo}$  toplam düşey örtü yükü basıncıdır. Robertson (2004) çalışmasında  $q_{c1N}$  veya  $Q$  formülündeki “n” değerinin ilk önce  $n=1$  alınarak  $Q$  ve  $F$  in tayininden sonra bir  $I_c$  değerinin elde edilmesini ve buna göre de aşağıdaki yöntemin kullanılabilceğini söylemiştir:

$$\text{eğer } I_c < 1.64 \Rightarrow n = 0.5; \text{ eğer } I_c > 3.30 \Rightarrow n = 1.0; \quad (2.9)$$

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

Robertson ve Wride (1998)  $I_c$  ile  $K_c$  arasındaki ilişkiyi şu şekilde önermiştir:

$$\text{eğer } I_c \leq 1.64 \Rightarrow K_c = 1.0 ; \quad (2.10)$$

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

böylelikle kumlarda sıvılaşmaya karşı direnç;

$$(q_{c1N})_{cs} < 50 \Rightarrow CRR_{7.5} = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05; \quad (2.11)$$

$$(q_{c1N})_{cs} \geq 50 \Rightarrow CRR_{7.5} = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08$$

olarak bulunur ve sonuç olarak sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı  $FS$  ise denklem 2.12 ile belirlenir.

$$FS = \left( \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) \cdot MSF \quad (2.12)$$

$$MSF = \frac{174}{M^{2.56}}$$

burada  $MSF$  deprem büyüklüğü ölçek faktörüdür (Youd ve Idriss, 2001). Birin üzerindeki değere sahip bir güvenlik katsayısı, deprem yükünün sıvılaşma direncinden düşük olduğunu ve bu sebeple sıvılaşma olasılığının düşük olacağını belirtir.



Seed ve ark, (1985) Çevrimsel kayma gerilmesi metodunun temiz kumlar ve siltli kumlar için kullanılabileceği ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede çevrimsel kayma gerilmesi yönteminin kullanmanın uygun olmayacağını belirtmişlerdir. İnce daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyeli genellikle zeminlerin fiziksel özellikleri göz önüne alınarak yapılmaktadır.

## **2.2. İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşması**

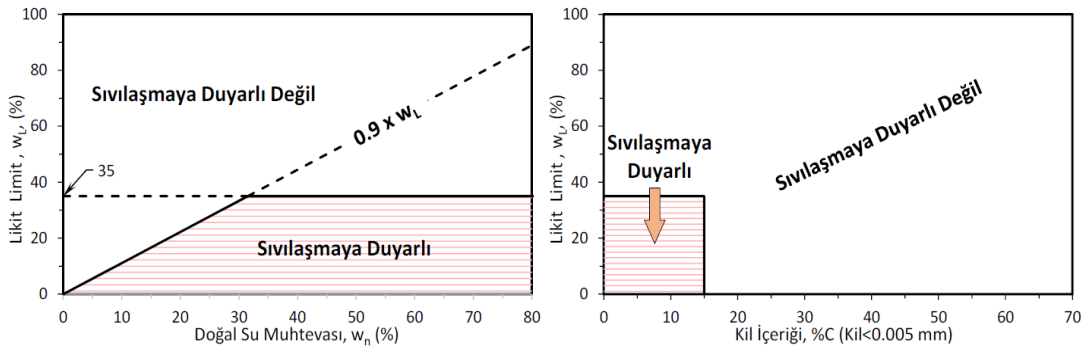
Şiddetli sismik yer hareketlerine maruz kalan tüm zeminler sıvılaşmaya duyarlı değildir. Sıvılaşmanın meydana gelebilmesi için gerekli olan bazı kriterler vardır. Kramer (1996) sıvılaşma potansiyelinin belirlenebileceği dört genel duyarlılık kriteri kategorisi belirtmiştir; tarihsel geçmiş, jeoloji, kompozisyon ve durum. Özellikle, bir zeminin sıvılaşmaya karşı hassaslığı irdelenirken tarihsel kriterler göz önünde bulundurulur. Deprem sonrası araştırmalara ve vaka geçmişi analizlerini baz alan araştırmalar, daha önce sıvılaşan bir alanın, zemin ve yeraltı suyu koşulları benzer şekilde kaldığı sürece yeniden sıvılaşabileceğini belirtmektedir (Youd, 1984).

Sıvılaşma meydana gelen alanlarda gözlemlenen arazi ve yeraltı suyu durumundaki benzeşmeler, sıvılaşmaya eğilimli diğer alanları değerlendirmek için bir kıstas olabilecek bir bilgi olarak kullanılabilir. Çökme ortamı, zeminlerin jeolojik yaşları ve yeraltı suyu durumları gibi jeolojik ölçütler zeminlerin sıvılaşmaya karşı hassasiyetinin belirlenmesinde rol oynayabilir. Sıvılaşabilen zemin ortamlarının aralığı, nispeten dar bir jeolojik aralıktır. Genel olarak, akarsu ve kolüvyal çökeller gibi gevşek durumda biriken topraklar, doymun olduklarında yüksek sıvılaşma duyarlılığına sahiptir. Sıvılaşmanın meydana gelebilmesi için zeminin yer altı su seviyesinin altında yani suya doymun durumda olması gerekmektedir, bu sebeple yeraltı suyu seviyesinin durumu da zemin sıvılaşma duyarlılığını etkileyen başlıca etmenlerdendir. Zemin gradasyonu, dane şekli, ince dane içeriği, plastisite indisi, likit limit ve su içeriği (wc) gibi birçok oluşumsal faktör, zeminin sıvılaşmaya karşı hassasiyetini belirleyen önemli değişkenlerdir (Youd, 1991).

İnce daneli zeminler için sıvılaşmaya karşı hassasiyetlerini belirlemek farklı araştırmacılar tarafından zeminlerin bazı fiziksel özelliklerinin kullanılması önerilmiştir. Zeminlerin likit limit, kil oranı, su içeriği, sıvılık indisi, ortalama dane boyutu gibi parametreleri kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin tahmin edilebileceği

belirtilmiştir. Literatürde bu parametreleri değişik sınır değerleriyle kullanan farklı sınıflama kriterleri mevcuttur.

İnce daneli zeminler için en popüler plastisite temelli kriterler, Çin'deki 1975 Haicheng ve 1976 Tangshan depremlerinden sonra geliştirilen “Çin Kriterleri” dir (Wang, 1979). Çin' deki depremlerden sonra sınıflama olayının yaşandığı ve meydana gelmediği yerlerden elde edilen verilere dayanarak, Wang (1979), ağırlıkça % 15 ila % 20' den daha az kil içeren (Çin tanımına göre %kil<5 mikron) ve doğal su muhtevasının ( $w_n$ ) likit limite oranı ( $w_L$ ) 0.9'dan daha büyük olan herhangi bir killi malzemenin sınıflandırmaya karşı hassas olduğunu tespit etmiştir. Bu verilere dayanarak Seed ve Idriss (1982) Çin Kriterini modifiye ederek ince daneli zeminlerin yalnızca aşağıdaki koşulların üçünün de karşılanması durumunda sınıflandırmaya duyarlı olabileceğini belirtmiştir: 5 mikrondan küçük daneler %15'ten az,  $w_L < 35$  ve  $w_n/w_L > 0.9$  olmalıdır. Bu standart menşei nedeni ile “Çin Kriterleri” olarak bilinmektedir ve Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

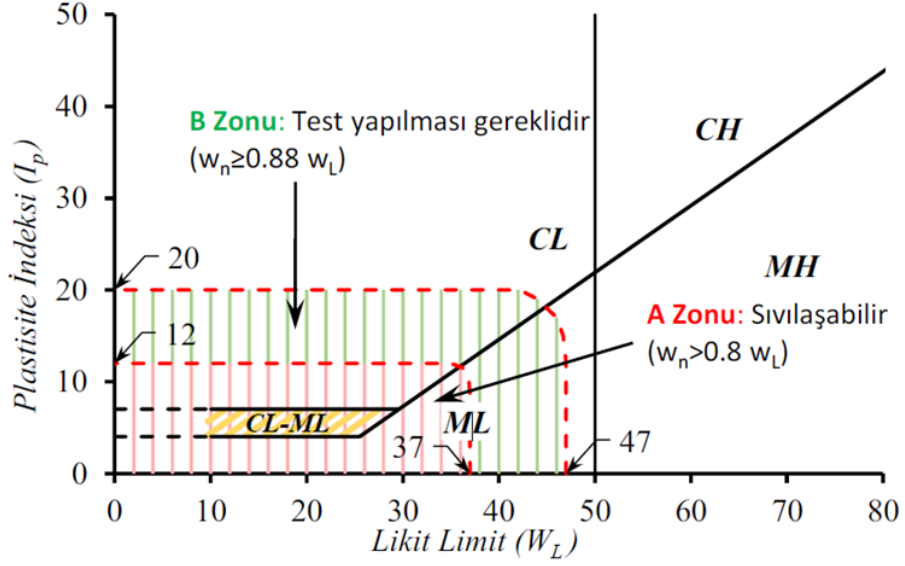


**Şekil 2.3.** Çin kriterlerinin grafik gösterimi (Youd ve ark, (2001); Wang (1979) ve Seed ve Idriss (1982).

Söz konusu kriter günümüze dek meydana gelen depremler sonucu oluşturulan arazi ve laboratuvar verileri ışığı altında birçok araştırmacının sunduğu yeni parametrelerle gelişmesini sürdürmüştür.

Seed ve ark, (2003) tarafından ayrıca Şekil 2.4'teki değerlendirme grafiği önerilmiştir. Bu grafikte A bölgesi ile temsil edilen bölgeye göre incelenen zeminin sınıflama gösterebilmesi için plastisite indisinin 12'den ve likit limitinin de 37'den küçük olması gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte sınıflama için diğer bir kriterin de doğal su muhtevasının likit limitin %80'inden daha fazla olması gerekmesidir. Ancak burada likit limitin 37 ile 47 arasında olduğu geniş bir gri bölgeye (test) düşen zeminlerin ileri

yöntemlerle sıvılaştırma potansiyeli taşıyıp taşımadığının belirlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

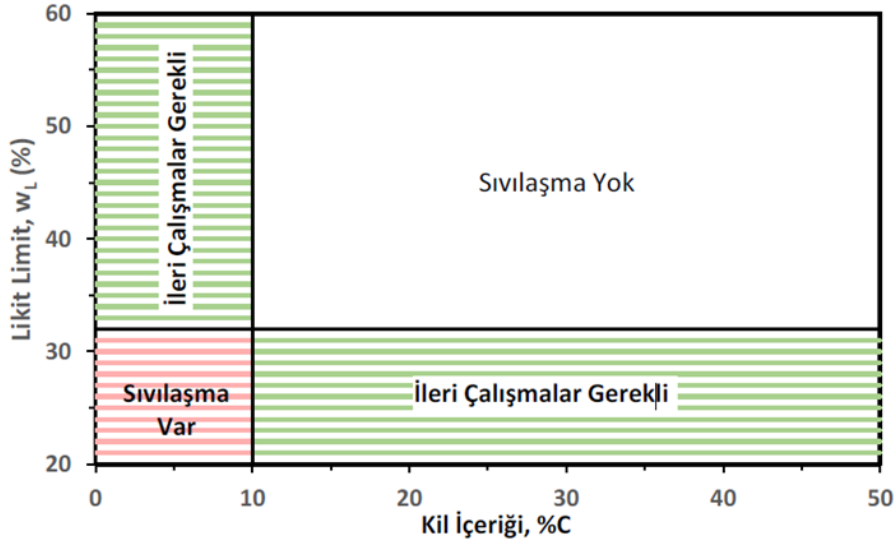


**Şekil 2.4.** Sıvılaştırılabilir Zemin Tiplerinin Değerlendirilmesine İlişkin Öneriler (Seed ve ark, 2003).

Koester (1994) çalışmasında sıvılaştırmanın meydana gelebilmesi için; likit limitin ( $w_L$ ) 36'dan küçük, kil oranının %10'dan küçük veya eşit, su içeriğinin  $0,9 \times w_L$  değerinden büyük olması gerektiğini ifade etmiştir.

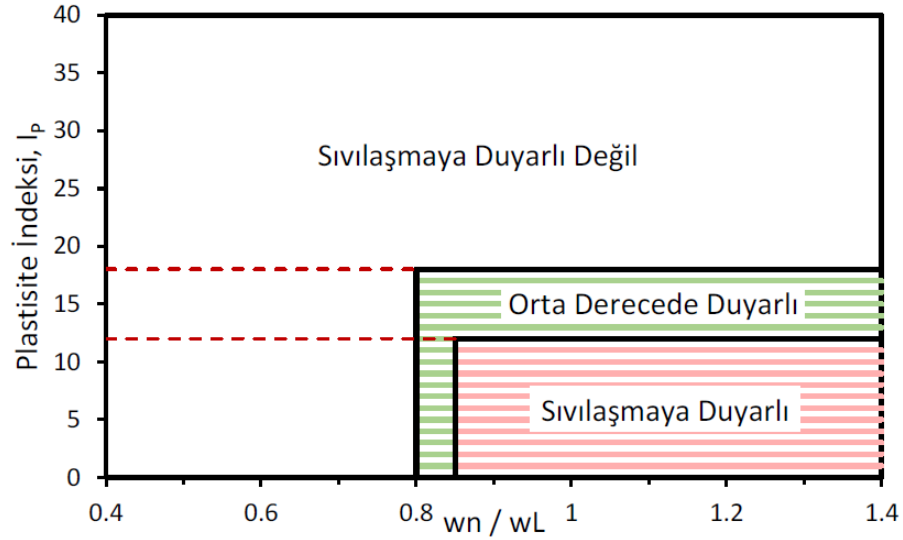
Finn ve ark, (1994) çalışmalarında sıvılaştırmanın meydana gelebilmesi için; likit limitin ( $w_L$ ) 34'ten küçük, kil oranının %10'dan küçük veya eşit olması gerektiğini ifade etmiştir.

Andrews ve Martin (2000) çalışmalarında sıvılaştırılabilir ve sıvılaştırmaz zeminlerin ayrımında kil içeriği ve likit limiti "anahtar" parametreler olarak kabul edilebileceğini belirtmiş ve; likit limitin ( $w_L$ ) 32'den küçük, kil oranının %10'dan küçük veya eşit olması durumunda zeminin sıvılaştırılabilir olduğunu, eğer zemin bu koşullardan herhangi birini sağlıyorsa ilave testler yapılması gerektiğini hiçbirini sağlamıyorsa zeminde sıvılaştırma beklenmediğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar kil – silt sınırını 0.002 mm olarak kabul etmiştir.



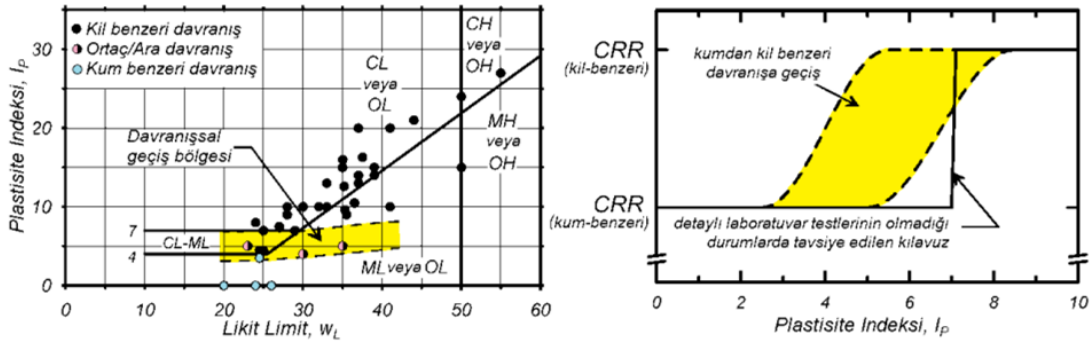
**Şekil 2.5.** Andrews ve Martin (2000) tarafından önerilen sıvılaşmaya yatkınlık kriterleri.

Bray ve Sancio (2006) Adapazarı'nda sıvılaşma gösteren sitelerden alınmış numuneler üzerinde yaptıkları değerlendirmede, ince daneli zeminlerde sıvılaşma olasılığının sadece doğal su muhtevası ve plastisite indisi ile değerlendirilebileceğini öne sürmüşlerdir. Bu çalışmaya göre; su muhtevası likit limitin %85'inden fazla ve plastisite indisi (IP) <18 olan tüm zeminler sıvılaşma potansiyeline sahip olup, 12<IP<18 arası zeminlerin orta derecede (gri bölge) sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu ve IP<12 ise sıvılaşmanın kaçınılmaz olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 2.6). Ancak, bu öneri "her IP<12 zeminin sıvılaşır olamayacağı" görüşü ile kendileri tarafından ayrıca tartışmaya açılmaktadır. Hemen tüm araştırmacılara göre ince daneli zeminlerin sıvılaşma değerlendirmesinde değişmez bir parametre olan likit limitin Bray ve Sancio (2006)'nın çalışmasında değerlendirme dışı kalması dikkat çekmektedir.



**Şekil 2.6.** Bray ve Sancio (2006) tarafından önerilen sıvılaşma duyarlılık kriterleri.

Boulanger ve Idriss (2006) çevrimsel deney sonuçlarına göre ince daneli zeminlerin çevrimsel tepkisini "kum benzeri" ve "kil benzeri" davranışlar altında iki gruba ayırmaktadır. Boulanger ve Idriss (2004, 2006) ince daneli zeminlerin kumlara benzeyen davranıştan, oldukça dar bir Atterberg sınırları aralığında temelde killere benzeyen davranışa geçiş yaptığını ifade etmektedirler (Şekil 2.7a). Buradaki davranışsal geçiş bölgesinin de bu çalışmanın gri bölgesi olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Araştırmacılar ince daneli zeminlerin  $IP=7$ 'ye sahip olmaları durumunda kil benzeri davranışlar sergileyeceklerini belirtmişlerdir. Araştırmacılar "kum benzeri" davranan zeminlerin sıvılaşılabilir olduğunu belirtmişlerdir, yani bu tür zeminlerin "kil benzeri" davranış sunan zeminlere oranla önemli ölçüde daha düşük çevrimsel direnç oranlarına (CRR) sahip olduklarına işaret etmektedirler (Şekil 2.7b). Araştırmacılara göre kilsi siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama (cyclic softening) olası iken kumsu karışımlarda tipik sıvılaşma (liquefaction) belirtileri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca araştırmacılar siltin çevrimsel kayma direncinin (CRR) artan plastisite indisi ile yükseldiğini göstermişlerdir. Ancak araştırmacıların sunmuş oldukları grafikte CRR ekseninin ölçeğinin verilmemiş olması kullanımı konusunda kısıtlama oluşturmaktadır.

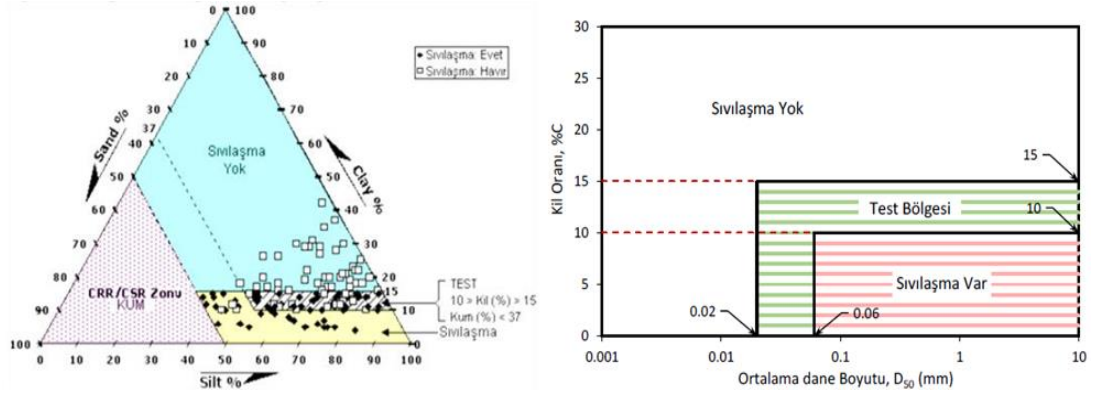


**Şekil 2.7.** a) Kohezyonlu, kohezyonsuz veya ara davranış sergileyen zeminler için temsili değerleri gösteren Atterberg tablosu, b) İnce daneli zeminler için kum benzeri davranıştan kil benzeri davranışa geçiş şeması (Boulanger ve Idriss, 2004, 2006).

Bol ve ark, (2010) siltli zeminlerin 1999 depreminde performansını yansıtan bilgilerin ışığı altında Adapazarı Kriteri'ni geliştirmişlerdir. Buna göre  $M_w=7$  büyüklüğündeki bir depremde, ince daneli bir zeminin sıvılaşabilmesi için likit limitin %35'ten küçük olması, kil içeriğinin ( $<0.002$  mm) %10'dan küçük olması, ortalama dane boyutunun ( $D_{50}$ ) 0.02 mm'den büyük olması ve sıvılık indisinin ( $I_P$  ölçülemiyorsa  $w_n/w_L$  oranının) 0.9' dan büyük olması koşullarının tümünün sağlanması gerekmektedir. Bu kriterde  $10 < \%C < 15$  aralıklarında numunelerin dinamik deneylerle yargılanması gerektiğini öne süren gri bölge bulunmaktadır (Şekil 9). Adapazarı kriterlerinde diğer araştırmacılar farklı olarak ince daneli zeminin ortalama dane boyutu da bir kriter olarak gösterilmiştir. Su muhtevasının ve plastisite indisinin sıvılaşabilirliğe etkisinin sıvılık indisi ( $IL$ ) ile ilişkisinin göz önüne alınması da önemli bir yaklaşım olabilir. Zira  $IL$ 'nin tanımında doğal su muhtevası ( $w_n$ ), plastisite indisi ( $I_P$ ) ile birlikte göz önüne alınmaktadır.

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_P} \quad (2.9)$$

Ancak plastik olmayan (non plastik-NP) siltlerde sıvılık indisi hesaplamasının mümkün olmaması söz konusu parametreye temkinli yaklaşılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.



**Şekil 2.8.** Bol ve ark, (2010)'a göre sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerin üçgen sınıflandırma kartındaki lokasyonları ve test bölgesi.

Polito (1999), Seed ve ark, (2003), Bray ve Idriss (2006) gibi bazı araştırmacılar sıvılaşma tayininde zeminlerin plastisite indisini göz önüne alan kriterler geliştirmiştir. Sıvılaşabilir zeminlerin genel olarak plastik özellik göstermeyen “non plastic (NP)” veya plastisite indisi tayininin çok zor olduğundan bu araştırmacılar tarafından geliştirilen kriterlerin uygulamada çok geniş alanda kullanılması zor görülmektedir.

Sıvılaşabilir ince daneli zeminlerin farklı araştırmacılar tarafından tanımlanması için geliştirdikleri kriterler Tablo 2.1’de özet halinde verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Farklı araştırmacılar tarafından önerilen sıvılaşma kriterleri.

Araştırmacılar	$w_L$ (%)	Clay (%)	$I_P$ (%)	$w_n/w_L$	$D_{50}$ (mm)	$I_L$	$\sigma'_{vo}$
Wang (1979)	---	$\leq 15-20$	---	$>0.90$	---	---	---
Jennings (1980)	---	$<10$	$<10$	---	$>0.02$	---	---
Seed&Idriss (1982)	$<35$	$\leq 15$	---	$\geq 0.90$	---	---	---
Koester (1992)	$<33.5$	$<20$	---	$>0.87$	---	---	---
Polito (1999)	$\leq 30$	---	$\leq 10$	---	---	---	---
Andrews&Martin (2000)	$<32$	$\leq 10$	---	---	---	---	---
Polito (2001)	$<25$	---	$<7$	---	---	---	---
Seed et al. (2003)	$<37$	---	$<12$	$>0.80$	---	---	---
Bray&Sancio (2006)	---	---	$\leq 12$	$\geq 0.85$	---	---	---
Bol et al. (2010)	$<33$	$<10$	---	---	$>0.02$	$>0.90$	---
Pathak (2016)	---	$\leq 15$	$\leq 15$	$\geq 0.90$	$>0.02$	---	150

Yapılan literatür taramasından anlaşılacağı üzere çoğu araştırmacı tarafından bir test bölgesi ifade edilmekte ve bu bölge için ilave deneyler yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu öneri makul bir yöntemdir fakat özellikle siltli zeminlerin araziden örselenmemiş bir şekilde getirilmesi çok zor ve pahalı bir yöntemdir. Çok önemli projeler olmadığı müddetçe bu yöntem kullanılmamaktadır. Standart yöntemle numune alındığı zaman siltli zeminler tüpe yerleştirilirken ve çıkarılırken aşırı örselenmektedir. Mevcut çalışmaların en büyük handikabı test bölgesi denilen karar verilmesi zor bir alanla karşı karşıya bırakmalarıdır. Bu belirsiz test bölgesinin tanımlanması için makine öğrenmesi yöntemleriyle çalışma yapılmıştır.



### 3. SIVILAŞMA TAHMİNİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ

Bu çalışma, sıvılaşabilir-sıvılaşmaz bölge olarak önerilen farklı geçiş bölgeleri arasındaki gri bölgeyi anlamayı amaçlamaktadır. Makine öğrenmesi (ML) modelleri doğrusal veya doğrusal olmayan ilişkileri ortaya çıkarmak için kullanılabilir. Makine öğrenmesi yöntemlerinden, karar ağaçları (DT), lojistik regresyon (LOGREG), destek vektör makineleri (SVM), k-en yakın komşular (KNN), stokastik gradyan inişi (SGD), rastgele orman (RF) ve yapay sinir ağı (YSA) gibi makine öğrenimi modellerinin zemin sıvılaşma potansiyelinin tahmini için avantajları ve etkinliği araştırılmıştır. Algoritmalar Python'da kodlanmış ve 1999 Kocaeli depreminden sonra Adapazarı/Türkiye bölgesinden alınan veri setine uygulanmıştır. Çalışmamızın ana katkısı (i) Zemin sıvılaşması için en iyi tahmin modelinin bulunmasıdır. (ii) Adapazarı verilerinde orijinal bir veri seti (makine öğrenmesi için hiç kullanılmamış) ML modelleri ile modellenmiştir. (iii) Farklı parametreler için farklı makine öğrenmesi modelleri denenmiş ve en iyi model karar ağacı algoritması olmuştur. (iv) Model Adapazarı ve benzer zemin oluşumlarına ait bölgelerden elde edilen zemin numunelerinde kullanılabilir.

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin fiziksel özelliklere dayalı kriterlere göre net olarak belirlenmesi kolay olmamaktadır. Bu noktada farklı “Makine Öğrenmesi” yöntemleri sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılabilir. Makine öğrenmesi algoritmaları karşılaştırılarak verilmiş olsa da öne çıkan algoritmalar ve çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

Tung ve ark, (1993) zemin sıvılaşma potansiyelinin tahmini için geliştirilmiş sinir ağlarını kullanarak bir bilgisayar modelini sunmaktadır. Model geçmiş olaylardan elde edilen veri setleriyle inşa edilmiştir ve ileride gerçekleşebilecek olayların anlaşılabilmesi için kullanılabilir ifade edilmektedir.

Garcia ve ark, (2012) çalışmalarında geoteknik, geometrik ve sismik yük parametrelerine dayalı olarak zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için bir makine öğrenmesi şeması sunmaktadır. CPT ve Vs ölçümlerinden ve tarihsel depremlerin alan sıvılaşma performans gözlemlerinden oluşan nispeten büyük bir veri

tabanı analiz edilmektedir. Bu veri tabanı, sinir ağı ve sınıflandırma ağaçları kullanılarak sıvılaşmanın meydana gelip gelmediğinin tahmin edilebileceği doğrusal olmayan bir ortam oluşturmak için kullanılmaktadır.

Ahmad ve ark, (2021) zeminin deprem kaynaklı sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için dört makine öğrenimi (ML) algoritmasının performansını koni penetrasyon deneyi sonuçlarını içeren vaka geçmişi kayıtlarına dayalı olarak incelemiştir.

Kumar (2021) sıvılaşma tayininde güvenilir zemin sınıflandırması için derin öğrenme (DL) modeli sunmuştur. DL modelinin uygulanabilirliği duygusal geri yayımlı sinir ağları (EMBP) ile test edilmiştir.

Hu (2021), dinamik penetrasyon testi ve kayma dalgası hızı veri tabanlarına dayalı olarak zemin sıvılaşmasını tahmin etmek için iki Bayes ağ modeli oluşturdu. Yapılan modeller mevcut modellerle karşılaştırılmış ve iyi bir performans verdiği belirtilmiştir.

Literatürde konuyla ilgili yapılan diğer çalışmalarda kullanılan yöntemler şu şekilde bulunabilir, yapay sinir ağları (Park ve ark, 2020; Tung ve ark, 1993); derin öğrenme (Feng ve ark, 2019); karar ağacı (Ahmad ve ark, 2021; García ve ark, 2012), destek vektör makineleri (Goh ve Goh, 2007; Samui ve Sitharam, 2011), çoklu doğrusal regresyon (Makasis ve ark, 2018), süper öğrenici (Taghizadeh-Mehrjardi ve ark, 2021), topluluk öğrenmesi (Alobaidi ve ark, 2019).

### **3.1. Makine Öğrenmesi Yöntemleri**

Yapay zekanın bir alt kümesi olan makine öğrenimi (ML) modelleri üç alt gruba ayrılabilir. Bunlar denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve güçlendirilmiş öğrenmedir. Denetimli öğrenme, veri setindeki hedef değişkenler bilindiğinde kullanılır. Denetimsiz öğrenmede ise hedef değişkenlerin değerleri başlangıçta bilinmemektedir (El Naqa ve Murphy, 2015). Bu çalışmada ele alınan hedef değişken, yani zemin sıvılaşma potansiyeli modele verilecektir. Bu nedenle denetimli öğrenme algoritmalarının kullanılması gerekecektir. Denetimli öğrenme algoritmaları regresyon ve sınıflandırma çalışmaları altında toplanabilir. Bu çalışmada hedef değişken ikili olduğundan çalışma bir sınıflandırma çalışması olarak ele alınacaktır. Çoğu çalışmada farklı algoritmalar denenerek hangisinin daha iyi çalışacağı belirlenebilir. Uygun makine öğrenmesi algoritmalarını seçmek için verideki

özelliklerin birbirleriyle olan ilişkisine bakılarak verinin niteliği ve niceliği belirlenebilir (Zhang, 2020). Verilerdeki ilişkiler ortaya çıkarıldıktan sonra veri seti lojistik regresyon, yapay sinir ağları, naive bayes gibi parametrik yöntemlerle veya k-en yakın komşu algoritması, karar ağaçları, destek vektör makineleri gibi parametrik olmayan yöntemlerle eğitilir (Bonaccorso, 2017). Veri setindeki özellikler arasında doğrusal modeller kullanılabilirse, model doğrusal makine öğrenimi algoritmaları ile daha iyi çalışacaktır. Bu çalışmadaki yaklaşımlar hem parametrik hem de parametrik olmayan yöntemleri içermekte olup aşağıda özetlenmiştir.

### 3.1.1. Karar ağaçları

Karar ağacı algoritması (DT), makine öğreniminde sınıflandırma görevleri için kullanılır ve hem kategorik hem de sürekli verilerle çalışabilir. Bu nedenle daha yaygın bir kullanıma sahiptir (Charbuty ve Abdulazeez, 2021). DT'ler kökten yapraklara doğru uzanan bir ağaç yapısında modelleme yapılmasını sağlar. Ağacın oluşturulmasına kökten başlanır. Kök düğümdeki özellik belirlenirken Gini indeksi veya entropi değerleri incelenir. Özelliğin safsızlık durumu, homojen olmama değerlerinin bir derecesini ifade eder. Bir durumun olasılığı  $p_i$ , ise entropi değeri (E) aşağıdaki gibi hesaplanır (Breiman ve ark, 1984; Kingsford ve Salzberg, 2008; Quinlan, 2014; Rokach ve Maimon, 2005):

$$E = - \sum_{i=1}^m p_i \log(p_i) \quad (3.1)$$

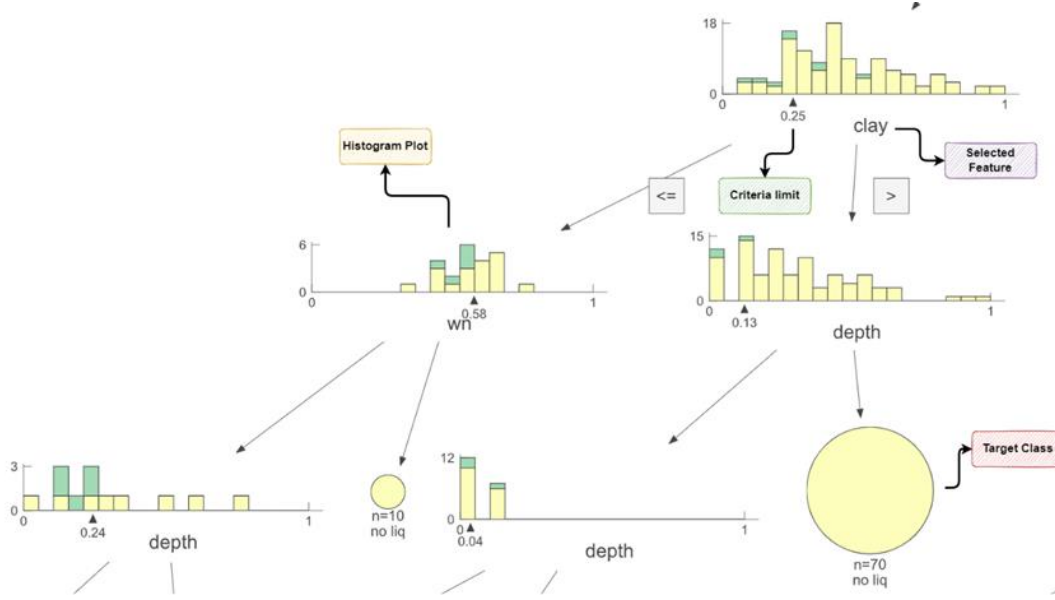
Gini indeksi (G) formülü aşağıda verilmiştir:

$$G = 1 - \sum_{i=1}^m p_i^2 \quad (3.2)$$

Bu ölçüler bir özelliğin impurity değerini belirler. İmpurity değerlerinden en yüksek olan tercih edilerek özellik belirleme işlemi tamamlanır. Çünkü impurity değeri yüksek olan özelliğin en fazla bilgi kazancı sağladığı bilinir. Karar ağacında hangi özellikten dallanma yapılacağına karar verildikten sonra kriterler belirlenir. Kriterler, hangi sayıdan büyük hangi sayıdan küçük diye dallanmalar ortaya çıkarılır. Eğer dal altında yüzde yüz bir sınıfa ait olma durumu varsa o daldaki gösterim tamamlanır.

Şekil 3.1, bu çalışmadaki verilerden oluşturulan örnek bir karar ağacıdır. Buna göre, kil ilk dallanma özelliği olarak seçilmiştir. Eğer kil 0.25'ten düşükse, sol tarafa ( $w_n$

tarafına) gitmelidir. Aksi takdirde, sağ tarafta, derinlik 0,13'ten düşükse, sol tarafa gitmelidir. Aksi takdirde sağa doğru dallanma sonucunda 70 örnek üzerinden hedef sınıf sınıflaşmamış olarak belirlenir.



Şekil 3.1. Karar ağacının örnek bir gösterimi.

### 3.1.2. Rassal orman (random forest)

Karar ağaçlarında tek bir ağaçtan yararlanılarak bir öğrenme gerçekleştirilir. Ensemble yöntemlerde ise birden fazla ağaç ile çalışılır. Karar ağaçlarında aşırı öğrenme sözü konusu olabilir. Bu durumun önüne geçebilmek için rassal orman algoritması bazı karar ağaçları ile çalışarak eğitim gerçekleştirir. Rassal orman algoritması karar ağaçlarını derecelendirerek en iyisi ile çalışma kararını alır. Rassal orman algoritması yüksek boyuttaki veri setlerinde aşırı öğrenmenin olmaması için karar ağaçları yerine kullanılabilir bir algoritmadır. Karar ağaçları ile geliştirilen diğer modeller ise boosting algoritmalarıdır. Bu çalışmada rassal orman algoritması ile ensemble karar ağaçları uygulanmıştır.

### 3.1.3. Destek vektör makineleri (support vector machines)

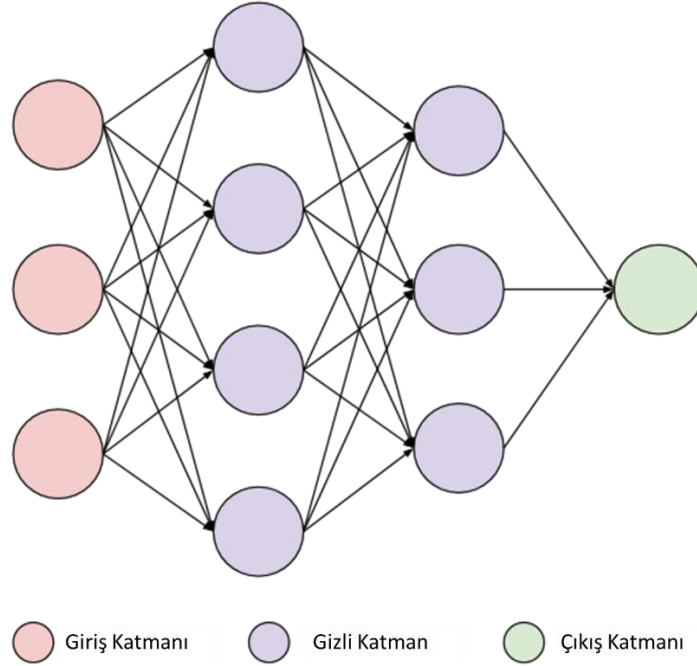
Destek vektör makineleri (DVM), sınıflar arasında sınır çizgileri çizerek sınıflandırılan Joachims (1998) ve hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir algoritmadır (Mavroforakis ve Theodoridis, 2006). DVM, sınır çizgilerinin çizildiği sınıflar arasındaki maksimum mesafeyi sağlar. Destek vektör makinelerinin sınır çizgileri bazen doğrusaldır bazen de daha fazla özelliği tahmin etmek için yüksek boyutlu çekirdeklerle çalışır.

### 3.1.4. K-en yakın komşular algoritması (K-NN)

K-En Yakın Komşular algoritması (K-NN) parametrik olmayan bir başka sınıflandırma algoritmasıdır. Hem sınıflandırma hem de regresyonda kullanılabilir (Altman, 1992). K-NN algoritması parametrik olmadığından, bir modele uymayan veriler için mükemmel bir fırsat sağlar. K-NN algoritmasındaki en önemli parametre, bir noktanın bir sınıfa ait kaç komşusu olduğunu belirten k sayısıdır. Bu çalışmada KNN algoritmasındaki k katsayısı farklı parametrelerle denenmiştir.

### 3.1.5. Yapay sinir ağları (artificial neural network- multilayer perceptron)

Yapay sinir ağları veya çok katmanlı algılayıcılar (MLP'ler) 3 katmandan oluşur: giriş, gizli ve çıkış katmanları. MLP'lerin gizli katmanları olmayabilir. Bu durum basit bir yapay sinir ağının (YSA) kullanıldığı anlamına gelir. Bunun yanında, gizli katmanlar daha karmaşık ilişkileri tespit etmek için kullanılabilir. Katmanlardaki birim sayısı bu algoritmaların en kritik parametrelerinden biridir. Katmanlar tamamen bağlantılıdır. Şekil 3.2'de temsili bir yapay sinir ağı gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Bir MLP'nin Ağ Mimarisi.

### 3.1.6. Lojistik regresyon

Doğrusal regresyon modelleri, çıktı değişkenlerinin sürekli olması durumunda kullanılır. Sınıflandırma problemlerinde regresyon modellerini kullanmak için lojistik regresyon modelleri geliştirilmiştir. Lojistik regresyonda kesişim ve eğim değerleri

doğrusal regresyon olarak tahmin edilir (Hosmer Jr ve ark, 2013). Tahmin edilen değerlerin aralıklı olması için bir fonksiyona, lojistik fonksiyona ihtiyaç vardır. Lojistik fonksiyon sayesinde doğrusal regresyondaki çıktı değerleri süreksizdir. Ortaya çıkan kategorik değişkenler bir sınıfı gösterir. Lojistik fonksiyonun formülü eşitlik 3.3'te verilmiştir.

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}} \quad (3.3)$$

burada;

$L$ : eğrinin maksimum değeri

$k$ : eğrinin lojistik büyüme oranı

$x_0$ : sigmoidin orta noktası  $x$  değeridir.

### 3.1.7. Stokastik gradyan azalması (SGD)

Stokastik gradyan inişi (SGD), birçok makine öğrenimi çalışmasında uygulanan iteratif bir prosedürdür. SGD algoritması, optimizasyon problemleri için Polyak'ın ağır top yöntemini taklit eder (Polyak, 1964). SGD, iyi bilinen Pytorch Ketkar ve Moolayil, (2021) ve Tensorflow Dillon ve ark, (2017) makine öğrenimi paketlerinde uygulanan iyi ve popüler bir algoritmadır.

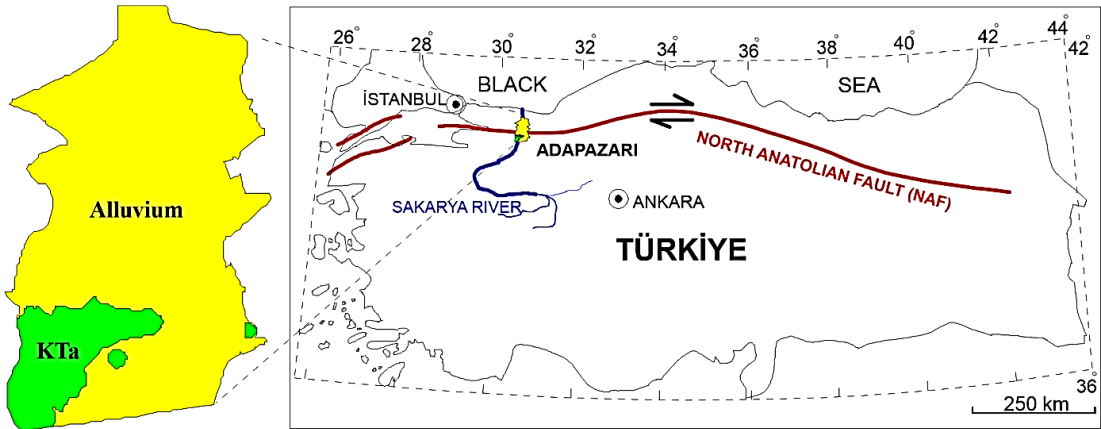
## 3.2. Çalışma Alanı ve Veriseti

Çok sayıda sondaj ve sismik koni penetrasyon testinin (SCPT) saha veri sonuçları, Adapazarı şehir merkezinin büyük bir bölümünü kapsayan veri setinde toplanmıştır. Ayrıca sahada daha önce yapılan çalışmalar kapsamında yapılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde sınıflandırma ve dayanım özellikleri deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar veri tabanına eklenmiştir (Önalp ve ark, 2001; Bol ve ark, 2008; Bol ve ark, 2010). Bray ve ark, (2004) Adapazarı'nda 1999 Kocaeli depreminden sonra sivilaşma nedeniyle zemin hasarının gözlemlendiği kritik tabakaları belirtmiş, bu tabakaların da zemin özellikleri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından yayınlanan rapordan alınarak veri tabanına eklenmiştir (Bray ve ark, 2001).

Zeminler, kalıntı ve taşınmış zeminler ana başlıkları da dahil olmak üzere birçok farklı ortamda oluşabilir. Geoteknikte sorun yaratan zemin türleri genellikle kalın tabakalı taşınma ile oluşmuş zeminlerdir. Bu tip zeminler çok farklı fasiyes ve alt fasiyes

ortamlarında da oluşabilir. Fasiyes belirli bir zaman dilimi içinde, belirli hidrodinamik şartlar altında ve belli bir depolanma ortamında oluşmuş tortul birikimine denir. Örneğin, buzullar tarafından taşınan morenler, rüzgarlar tarafından oluşturulan kumullar, yerçekimi ile oluşan taluslar ve son olarak su tarafından taşınan alüvyonlar. Su tarafından taşınan alüvyonların flüviyal kökenli olduğu düşünülmektedir. Özellikle bu çalışma kapsamında kullanılan zeminlerin kaynaklandığı menderesli nehir tabanlı flüviyal ortamlar çok farklı alt fasiyesler taşımaktadır. Örneğin, terk edilmiş nehir yatağı, set üstü çökelleri, yarık yayılması çökelleri, öküz boynuzu göl çökelleri ve taşkın ovası çökelleri. Bu çalışmada kullanılan zeminler de flüviyal kökenli taşkın ovası çökelleridir. Dolayısıyla bünyesinde birçok alt fasiyes barındırmaktadır.

Adapazarı ve çevresinin büyük bir bölümü Sakarya nehrinin getirdiği çakıllı ve siltli kumları içeren Kuvaterner alüvyon çökellerinden oluşmaktadır. Adapazarı ovasının farklı kesimlerinde değişen derinliklerde farklı fasiyesler gözlenmektedir. Kentin güneybatısındaki küçük bir bölüm Kretase yaşlı Akveren formasyonu üzerine kurulmuştur. Formasyon kiltası, kumtaşı, kireçtaşı ve marn tabakalarından oluşmaktadır. Nüfusun yoğun olduğu alanlar alüvyon tabakaları üzerindedir (Şekil 3.3). Adapazarı şehir merkezi ve çalışmanın araştırma noktaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışma alanının harita üzerinde konumu.



Şekil 3.4. Adapazarı şehir merkezi ve çalışmanın araştırma noktaları.

Başlangıç veri setinde Adapazarı bölgesinin farklı noktalarından alınan zemin örnekleri ve 8 zemin özelliği Tablo 2.1’de sunulmuştur. Kullanılan zemin özelliklerinin zemin sıvılaşmasına neden olup olmadığına dair bir sütun da [0,1] ikili değerleri ile veri setine dahil edilmiştir. "0" değeri sıvılaşmamış, "1" değeri ise sıvılaşmış zeminleri ifade etmekte olup veri bilimi uygulamalarında "hedef" değişken olarak bilinmektedir. Sıvılaşma var/sıvılaşma yok ikili kriteri, öncelikle kum kaynakmaları, zemin oturması ve yanal yayılma (veya bunların olmaması) gibi sıvılaşmanın yüzeysel belirtilerine dayalı olarak değerlendirilmiş ve bazı durumlarda (Bray ve ark, 2004 ve Bol 2010 tarafından bildirilenler gibi), kritik katmanlar ayrıntılı dinamik sonlu eleman analizleriyle desteklenen saha gözlemleriyle belirlenmiş veya mevcut birden fazla sıvılaşma değerlendirme yöntemiyle doğrulanmıştır.



**Tablo 3.1.** Zemin Özellikleri ve Tanımlamalar.

Kısaltma	Tanım	Birim	Veri Türü
<b>Clay</b>	Zemin dane dağılımı < 0.002 mm	yüzde (%)	Devamlı
<b>w<sub>L</sub></b>	Likit Limit	yüzde (%)	Kesikli
<b>IP</b>	Plastisite İndisi	yüzde (%)	Kesikli
<b>w<sub>n</sub></b>	Doğal Su Muhtevası	yüzde (%)	Devamlı
<b>D<sub>50</sub></b>	Ortalama Dane Çapı	mm	Devamlı
<b>FC</b>	İnce Dane İçeriği	yüzde (%)	Devamlı
<b>Depth</b>	Derinlik	m	Devamlı
<b>Liq</b>	Sıvılaşma	-	İkili

Veri ön işleme aşamasında, herhangi bir özelliği eksik olan veriler tespit edilmiş ve veri setinden çıkarılmıştır. Aynı zamanda veri setindeki tutarsız veriler (- değerler, sayısal olmayan, aynı anlama gelen farklı tipteki veriler) temizlenmiştir (cleansing). Ön işleme aşamalarından sonra, veri setinde tutarsız veya gürültülü olan çok az veri kalmıştır. Bir veri setinde eksik değerlerin olması model performansını düşürür (Kang, 2013). Özellik kümelerinin istatistiksel özeti, Tablo 3.2'de sunulan ortalama, standart sapma (std), minimum (min) ve maksimum (max) değerlerini içerir.

**Tablo 3.2.** Veri setinin özet istatistikleri.

	Clay	w <sub>L</sub>	IP	w <sub>n</sub>	D <sub>50</sub>	FC	Depth
<b>ort</b>	21.6	34.56	7.79	32.73	0.03	83.8	5.17
<b>std</b>	13.84	13.96	12.41	5.6	0.02	14.17	2.93
<b>min</b>	3	5	0	13	0	51	1
<b>maks</b>	73	95	66	52	0.1	100	16.2

### 3.3. Veri Ön İşleme

Veri setinin makine öğrenmesi uygulamalarına uygun hale getirilmesi için zemin sıvılaşmasındaki pratik faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla uzman görüşü ile belirlenen faktörler veri setine dahil edilir. Makine öğrenmesi algoritmalarının performansını artıran önemli bir ön işleme aşaması ölçekleme veya normalizasyon işlemidir. Bu çalışmada her bir özellik min-max ölçeklendirme ile

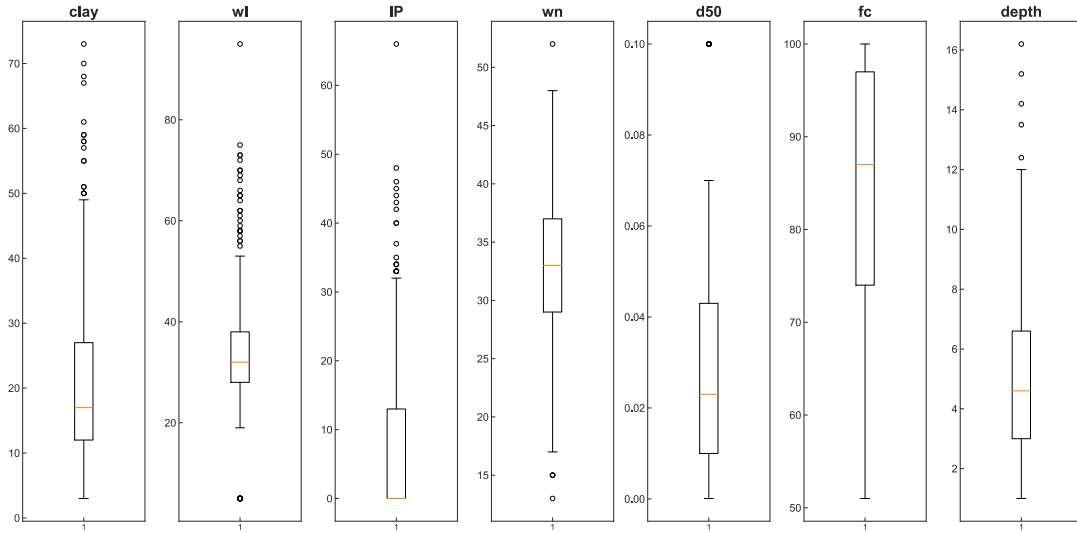
ölçeklendirilmiştir. Eşitlik 3.4 ve 3.5 kullanılarak, min-max ölçeklendirme yöntemi özellikleri [0,1] aralığına ölçeklendirir.

$$X_{std} = \frac{X - X_{min(axis=0)}}{X_{max(axis=0)} - X_{min(axis=0)}} \quad (3.4)$$

$$X_{scaled} = X_{std} \times (max - min) \quad (3.5)$$

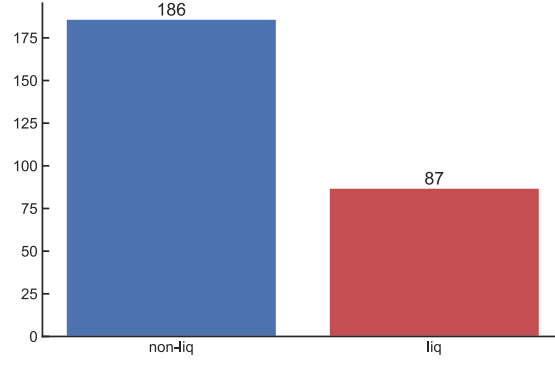
burada X orijinal değer, X\_minve X\_maxsırasıyla özelliğin minimum ve maksimum değeridir. X\_scaled ölçeklendirilmiş değerdir.

Aykırı verileri tespit etmek için boxplot grafikleri çizilmiştir (Şekil 3.5). Aykırı veri uç noktalarda olmadığı için modelden çıkarılmamıştır.



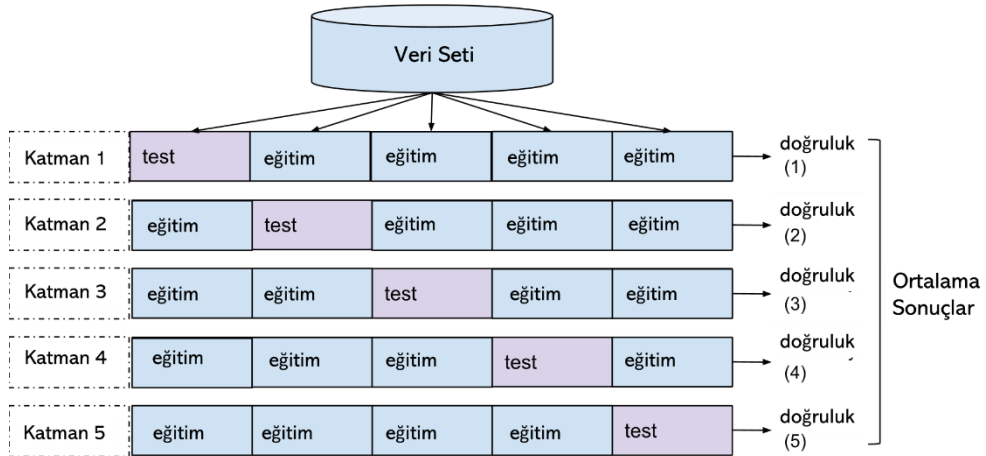
Şekil 3.5. Özelliklerin dağılımını gösteren boxplot grafikleri.

Veri setinde bulunan sınıvlaşmamış zeminler için 186 ve sınıvlaşmış zeminler için 87 veri noktası Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Makine öğrenimi uygulamalarının veri kümesi dengesiz ise (bir hedef sınıftaki gözlem sayısı diğer sınıftaki gözlem sayısından önemli ölçüde düşükse), bu durum eğitim ve test kümelerinde dikkate alınmalıdır. F1-skoru, modelin performansını hesaplamak için en uygun metriktir (Eşitlik 3.9). Eğitim setinde fazla sınıf varsa test setinde düşük performans gözlemlenebilir. Bu durumu ortadan kaldırmak için eğitim ve test setlerinde birbirine yakın dağıtık veri setleri belirlenebilir. Bu çalışmada çapraz doğrulama kullanılarak veri setinin tamamı hem eğitim hem de doğrulamada kullanıldığından birbirine yakın dağıtık veri seti tercihi gerek yoktur.



Şekil 3.6. Hedef değer frekansları.

En iyi model, veri setindeki eğitim ve test setine bağlı kalmadan çapraz doğrulama ile geliştirilebilir. Sadece bir eğitim ve test seti kullanılırsa, eğitim setine bağlı kalınarak elde edilen iyi bir performans tüm test setine veya veri setine genellenemeyebilir. Model, eğitim setindeki verilere çok yakın sonuçlar üretirken test setinde doğrulardan uzak sonuçlar üretiyorsa modelde 'aşırı uyum' ezberlemesi olabilir. Modelin eğitim setinde düşük, test setinde yüksek performans göstermesi, modelin basit olduğu anlamına gelir ve 'yetersiz uyum' olarak adlandırılır. Makine öğrenimi modellerinin geliştirilmesi hiper parametre optimizasyonu ve çapraz doğrulama yöntemleri ile mümkündür. Çapraz doğrulamada, veri seti k alt kümeye bölünür, ardından k-1 kümesi eğitim için kullanılır ve diğer küme test için kullanılır. Bu çalışmada çapraz doğrulama veri seti beş parçaya bölünmüştür. Başka bir deyişle, her bir doğrulamada %20 doğrulama ve veri setinin %80'i eğitim için kullanılmıştır. Çapraz doğrulama aşamasında veri setinin bir eğitim ve test setine nasıl ayrılacağı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Beş katmanlı çapraz doğrulama yöntemi.

### 3.3.1. Performans ölçütleri

Çapraz doğrulamada en iyi ortalama performans değerine sahip model, veri setini modellemek için kullanılmıştır. Modelin doğrulanmasında, veri seti eğitim ve test süreci için sırasıyla %80, %20 oranında bölünmüştür. Ayrıca, eğitim doğruluğu, test doğruluğu ve tüm veri setinin doğruluğu kaydedilmiştir. Modelin performansını değerlendirmek için performans metrikleri kullanılmıştır. Ele alınan problem ikili sınıflandırma problemi olduğu için performans karşılaştırmaları için 4 hücreli pencereden oluşan karışıklık matrisi kullanılabilir. Şekil 3.8'de bu çalışma için karışıklık matrisi gösterilmektedir.

		Gerçek Değerler	
		1: liq	0: no liq
Tahmin Edilen Değerler	1	TP	FP
	0	FN	TN

Şekil 3.8. Zemin sıvılaşma potansiyellerinin karışıklık matrisi.

TP (Doğru Pozitif): Sıvılaşmış zeminin doğru tahminleri.

TN (Doğru Negatif): Sıvılaşmamış zeminin doğru tahminleri.

FP (Yanlış Pozitif): Sıvılaşmış zemin için yanlış tahminler.

FN (Yanlış Negatif): Sıvılaşmamış zemin için yanlış tahminler.

Doğruluk, ikili sınıflandırma problemleri için kullanılan en yaygın performans ölçütüdür. Diğer bir performans ölçütü ise gerçek pozitif oranı (TPR) veya geri çağırma, gerçek pozitif tahminlerdir. Doğruluk ve TPR eşitlik 3.6-3.7 kullanılarak hesaplanır:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3.6)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.7)$$

Gerçek Negatif Oranı (TNR) veya Kesinlik, eşitlik 3.8 ile hesaplanabilen gerçek negatif tahminlerin oranıdır:

$$Precision = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3.8)$$

F1-skoru veya F-skoru ya da F-ölçüsü, kesinlik ve geri çağırma ağırlıklı ortalamadır. F1-skoru eşitlik 3.9 ile hesaplanabilir:

$$F_1 = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall} \quad (3.9)$$

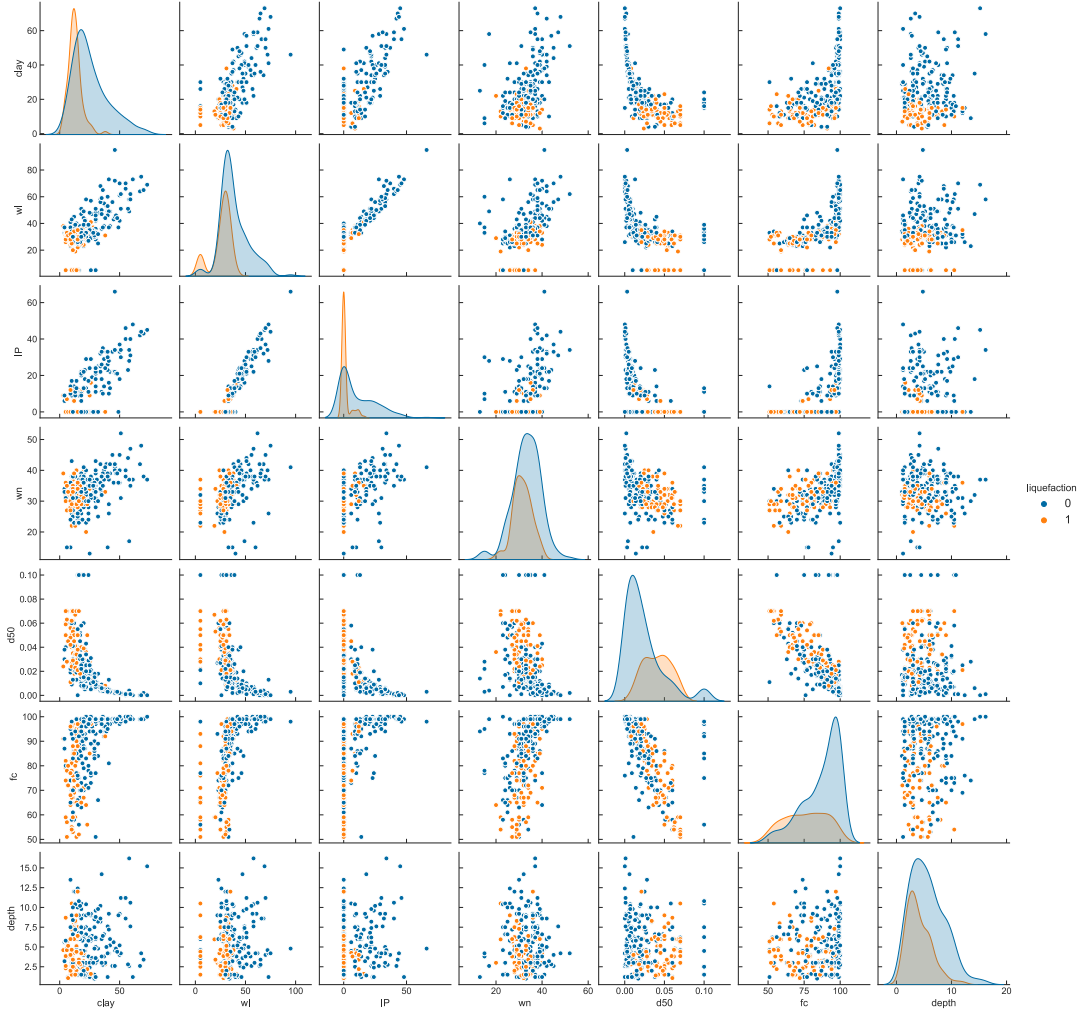
Eğri Altındaki Alan (AUC), Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC), farklı eşik değerleri için doğru pozitif ve yanlış pozitif oranlarını temsil eder.

### 3.3.2. Özellik seçimi

Veri hazırlama aşamasında hatalı veri tespiti ve temizliği, aykırı veri analizi ve eksik veri işlemleri gerçekleştirilmiştir. Aykırı verilerin temizlenmesi için aykırı olduğu düşünülen veriler veri setinden çıkarılmıştır. Ayrıca eksik verilerin eksik veri doldurma yöntemlerinden biri ile doldurulması nedeniyle model performansının düşeceği öngörüldüğünden eksik veriler veri setinden çıkarılmıştır.

Özellikler ve hedef değişken arasındaki dağılımları göstermek için dağılım grafikleri Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, bazı özellikler parametrik dağılım sergilememektedir. Sıvılaşmış ve sıvılaşmamış zeminler için farklı özellik değerlerine birlikte bakıldığında doğrusal bir ayırım yapmanın mümkün olmadığı görülmüştür. Bu gibi durumlar makine öğrenmesi algoritmalarının performansını etkileyecektir. Özellikle IP özelliğinde 0 değerlerinin yüksek sayılarda olduğu gözlemlenmiştir. Laboratuvarında, siltli zeminlerde plastik limitin ölçülmesi zordur ve operatöre çok bağımlıdır. Ayrıca plastik limit deneyinin tekrarlanabilirliği geoteknik laboratuvar deneyleri arasında en zor olanlardan biridir. IP'nin birçok sıvılaşma kriterinde dikkate alınmama nedeninin bu olduğu düşünülmektedir.

Özellikler arasındaki etkileşimler için korelasyon matrisi kullanılmıştır (Tablo 3.3). Eğer özellikler arasındaki korelasyon yüksekse, özelliklerden biri veri setinden çıkarılmalıdır. Bu çalışmada mümkün olduğunca çok özellik ile çalışılması hedeflenmiştir. Bu nedenle, en yüksek korelasyona sahip özellik (0,86 korelasyona sahip IP özelliği) veri setinden çıkarılmıştır. Dolayısıyla, bu çalışma için eşik değeri 0,85 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Özellikler arasındaki ilişkiler.

Tablo 3.3. Zemin özelliklerinin korelasyon matrisi.

	Clay	w <sub>L</sub>	IP	w <sub>n</sub>	D <sub>50</sub>	FC	Depth
w <sub>L</sub>	0.691						
IP	0.761	0.859					
w <sub>n</sub>	0.409	0.481	0.464				
d <sub>50</sub>	-0.616	-0.572	-0.550	-0.367			
FC	0.536	0.620	0.534	0.481	-0.679		
Depth	0.139	0.131	0.132	-0.050	-0.109	0.104	
Liquefaction	-0.437	-0.413	-0.355	-0.148	0.344	-0.370	-0.245

### 3.4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada performans hesaplamaları için geliştirilen makine öğrenmesi modelleri ve kodları için Python programlama dilinde Scikit-Learn kütüphanesi kullanılmıştır (Pedregosa ve ark, 2011). Çalışmada ele alınan veri seti 5 kat çapraz doğrulama ile eğitilmiştir. Çapraz doğrulama sonuçlarının ortalaması alınmış ve bir optimizasyon yöntemi olarak Grid Search tekniği kullanılarak farklı parametrelere göre sıralanmıştır. Tablo 3.4, kullanılan parametreler için değer aralıklarını ve her bir algoritmanın toplam deney sayısını vermektedir.

**Tablo 3.4.** Algoritmaların seçilmiş hiperparametreleri.

Model	Parametreler	No. of Exp.
DT	max_depth: [3,4,5,...,20], min_samples_leaf: [3,4,5,...,20], criterion: [gini, entropy], splitter: [best, random], max_features: [auto, sqrt, log2]	17340
LOGREG	penalty: [l1, l2, none], C: np.linspace(-100, 100, 50), fit_intercept: [True, False], solver: [newton-cg, lbfgs, liblinear]	4500
SVM	kernel: [rbf, linear], C: np.linspace(-100, 100, 50), gamma: np.linspace(0, 100, 20)	10000
KNN	n_neighbors: [1,5,10,...,100], weights: [uniform, distance], leaf_size: [20, 25, ..., 100], algorithm: [auto, ball_tree, kd_tree, brute]	25600
SGD	loss: [hinge, log, modified_huber, squared_hinge, perceptron], penalty: [l1, l2, elasticnet], alpha: np.linspace(0.001, 100, 50), learning_rate: [constant, optimal, invscaling, adaptive],	45000
RF	criterion: [gini, entropy], max_depth: [2,3,4,...,10], min_samples_split: [2,3,4,...,10], min_samples_leaf: [2,3,4,...,10], n_estimators: [2,3,4,...,10],	122880

**Tablo 3.4. (Devamı) Algoritmaların seçilmiş hiperparametreleri.**

Model	Parametreler	No. of Exp.
ANN	hidden_layer_sizes: [(2,), (3,), (4,), (2, 2), (2, 3), (2, 4),(3,3),(3,4),(4,3),(4,4),(5,5),(6,6)], activation: [tanh, relu, logistic], solver: [sgd, adam], alpha: [0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.05], learning_rate: [constant, adaptive]	3300

Çapraz doğrulama sonucunda elde edilen en iyi parametreler ile modeller geliştirilmiştir. Karar Ağacı (DT), Lojistik Regresyon (LOGREG), Destek Vektör Makineleri (DVM), k-En Yakın Komşu (KNN), Stokastik Gradyan İnişi (SGD), Rastgele Orman (RF) ve Yapay Sinir Ağı (YSA) çapraz doğrulama ile elde edilen en iyi beş kombinasyon Tablo 3.5 - Tablo 3.10'da verilmiştir.

**Tablo 3.5. DT algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.**

criterion	max_depth	max_features	min_samples_leaf	split_criterion	split0_test_score	split1_test_score	split2_test_score	split3_test_score	split4_test_score	mean_test_score	std_test_score
gini	12	auto	3	best	0.857	0.821	0.679	0.714	0.821	0.779	0.069
gini	7	auto	5	rand	0.786	0.714	0.750	0.786	0.821	0.771	0.036
gini	7	auto	3	best	0.821	0.786	0.714	0.714	0.786	0.764	0.043
gini	8	auto	3	best	0.857	0.821	0.679	0.750	0.714	0.764	0.066
gini	11	auto	3	best	0.857	0.714	0.679	0.714	0.821	0.757	0.069

**Tablo 3.6. LOGREG algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.**

C	fit_intercept	penalty	solver	split0_test_score	split1_test_score	split2_test_score	split3_test_score	split4_test_score	mean_test_score	std_test_score
10.204	True	11	liblinear	0.857	0.786	0.750	0.714	0.750	0.771	0.048
2.041	True	11	liblinear	0.821	0.786	0.750	0.714	0.750	0.764	0.036
2.041	False	11	liblinear	0.821	0.786	0.786	0.750	0.679	0.764	0.048
10.204	True	12	liblinear	0.821	0.786	0.714	0.750	0.714	0.757	0.042
10.204	False	12	newton-cg	0.786	0.750	0.786	0.786	0.679	0.757	0.042



**Tablo 3.7.** DVM algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.

C	gam	kerne	split0_test_sco	split1_test_sco	split2_test_sco	split3_test_sco	split4_test_sco	mean_test_sco	std_test_sco
26.53	0.100	linear	0.857	0.786	0.750	0.714	0.750	0.771	0.048
55.10	0.100	rbf	0.821	0.786	0.714	0.786	0.714	0.764	0.043
10.20	0.100	rbf	0.750	0.714	0.786	0.821	0.750	0.764	0.036
91.83	0.100	rbf	0.857	0.786	0.714	0.714	0.714	0.757	0.057
14.28	0.100	rbf	0.750	0.714	0.786	0.786	0.750	0.757	0.027

**Tablo 3.8.** KNN algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.

algorit hm	leaf_si ze	n_neighb ors	p weights	split0_test_ score	split1_test_ _score	split2_test_s core	split3_test_s core	split4_test_s core	mean_test_s core	std_test_s core
auto	20	11	1 uniform	0.821	0.786	0.750	0.750	0.750	0.771	0.029
auto	20	6	1 distance	0.857	0.714	0.714	0.750	0.821	0.771	0.058
auto	65	11	1 uniform	0.821	0.786	0.750	0.750	0.714	0.764	0.036
auto	20	21	1 distance	0.750	0.786	0.714	0.821	0.750	0.764	0.036
auto	20	11	1 distance	0.786	0.786	0.714	0.750	0.750	0.757	0.027

**Tablo 3.9.** SGD algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.

alpha	eta0	learning_rat e	loss	penal ty	split0_tes t_score	split1_tes t_score	split2_test_ _score	split3_test_ score	split4_test_ score	mean_test_ score	std_test_s core
0.001	10	invscaling	log	elastic	0.786	0.786	0.786	0.821	0.786	0.793	0.014
0.001	10	invscaling	hinge	l1	0.821	0.786	0.786	0.786	0.786	0.793	0.014
0.001	10	invscaling	log	l2	0.786	0.786	0.786	0.786	0.786	0.786	0.000
0.001	1	invscaling	modified	l2	0.821	0.786	0.750	0.821	0.714	0.779	0.042
0.001	100	adaptive	modified	l1	0.821	0.786	0.786	0.750	0.750	0.779	0.027

**Tablo 3.10.** YSA algoritması için en iyi hiper parametre kombinasyonları.

activat ion	alpha	hidden_lay er_sizes	learning_ rate	solve r	split0_tes t_score	split1_test_ score	split2_test_ score	split3_test_ score	split4_test_ score	mean_test_ score	std_test_ score
tanh	0.0001	(5, 5)	constant	adam	0.750	0.750	0.786	0.786	0.750	0.764	0.017
tanh	0.1	(5, 5)	constant	adam	0.750	0.750	0.786	0.750	0.750	0.757	0.014
relu	0.001	(5, 5)	constant	adam	0.750	0.750	0.750	0.714	0.750	0.743	0.014
relu	0.0001	(5, 5)	constant	adam	0.750	0.714	0.750	0.714	0.750	0.736	0.017
relu	0.0001	(3, 4)	constant	adam	0.714	0.750	0.750	0.714	0.679	0.721	0.027

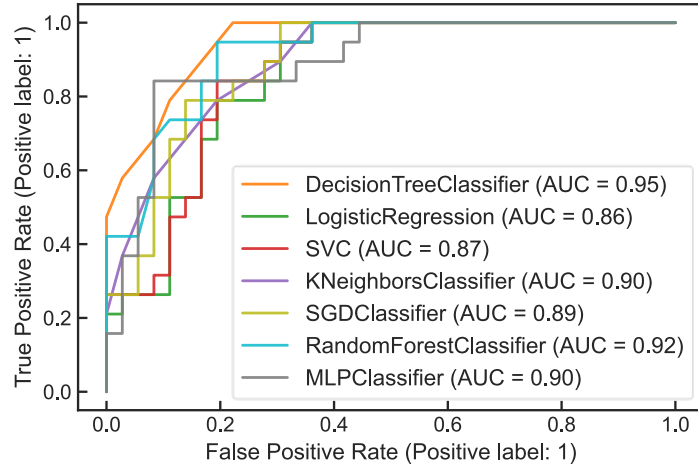
Çapraz doğrulama sonucu elde edilen en iyi parametreler ile modeller geliştirilmiştir. Çapraz doğrulama sonucunda en iyi sonucu veren algoritma ile rastgele seçilen %20'lik test setinde model tekrar denendiğinde elde edilen sonuçlar Tablo 3.11'de özetlenmiştir. Tüm veri kümesi için en iyi genel doğruluğa %90 ile DT sınıflandırıcısında ulaşılmıştır. DT sınıflandırıcısından sonra karar ağacı tabanlı bir algoritma olan RF sınıflandırıcısı %86 doğruluk oranı ile ikinci sırada gelmektedir. Tabloya göre DT, kesinlik (%91), geri çağırma (%96) ve f1-skorunda (%93, %83) da en iyi doğruluk oranını elde etmiştir. Buna ek olarak, RF algoritmasının elde ettiği sonuçlar da vurgulanabilir. RF, hassasiyet ve geri çağırma oranında en iyi sonuçları elde etmiştir.

**Tablo 3.11.** Modellerin performans karşılaştırmaları.

Models	Accuracy			precision		recall		f1-score	
	Train	Test	All	0 (non-liq)	1 (liq)	0	1	0	1
DT	0.90	<b>0.89</b>	<b>0.96</b>	0.90	<b>0.89</b>	<b>0.96</b>	0.77	<b>0.93</b>	<b>0.83</b>
LOGREG	0.83	0.71	0.88	0.83	0.71	0.88	0.62	0.86	0.66
SVM	0.83	0.71	0.88	0.83	0.71	0.88	0.62	0.86	0.66
KNN	0.86	0.67	0.84	0.86	0.67	0.84	0.71	0.85	0.69
RF	<b>0.91</b>	0.77	0.89	<b>0.91</b>	0.77	0.89	<b>0.80</b>	0.90	0.79
ANN	0.79	0.72	0.91	0.79	0.72	0.91	0.47	0.85	0.57
SGD	0.78	0.79	0.95	0.78	0.79	0.95	0.43	0.85	0.55

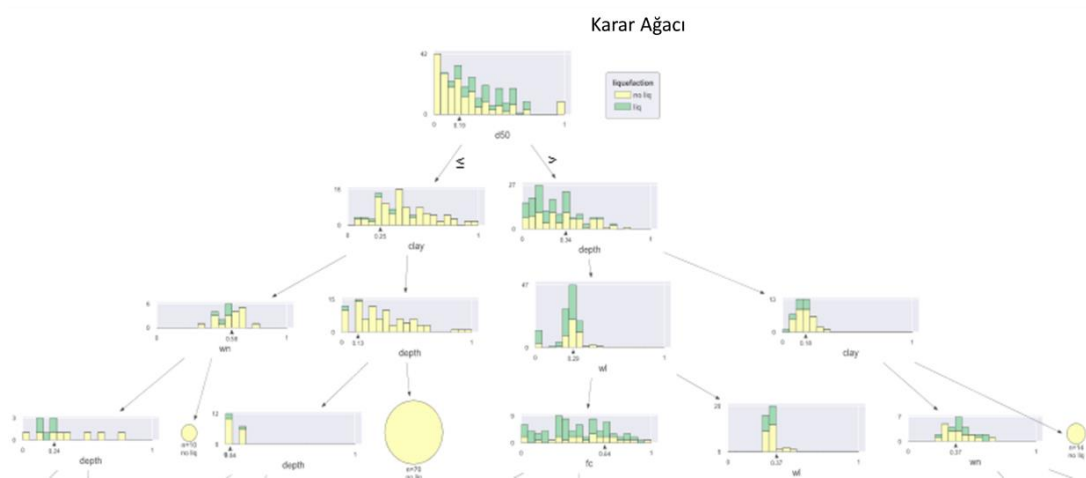
Bu çalışmada dikkat çeken bir diğer performans ölçütü de gerçek pozitif oranının genellikle Y ekseninde, yanlış pozitif oranının ise X ekseninde çizildiği ROC'dir (Alıcı İşletim Karakteristiği). Bu, "ideal" noktanın şeklin sol üst köşesinde olması gerektiğini, yanlış pozitif oranının sıfır ve gerçek pozitif oranının bir olduğunu göstermektedir (scikit-learn, 2022). Gerçek pozitif oran, modelin sıvılaşmış olarak tahmin ettiği sıvılaşmış zeminlerin yüzdesini temsil eder. Bunun tam tersi olarak, yanlış pozitif oran sıvılaşmamış zeminlerin yüzdesidir, ancak model bunları sıvılaşmış zemin olarak tahmin etmiştir. Bu metrik, bir sınıflandırıcının uyum iyiliğini özetlemektedir. Hem eğitim hem de test setleri için ROC eğrileri Şekil 3.10'da verilmiştir. En uygun tahmin yaklaşımı, ROC uzayının sol üst köşesinde bir nokta ile sonuçlanacaktır. Rastgele bir tahmin, sol alt köşeden sağ üst köşeye çapraz olarak

uzanan bir nokta ile sonuçlanacaktır. ROC eğrilerine bakıldığında, DT sınıflandırıcısının çeşitli parametrelerde eğitim setinde %97 ve test setinde %95 ile yine en iyi sonuçları verdiği görülebilir. RF sınıflandırıcısı ikinci sırada gelmektedir.



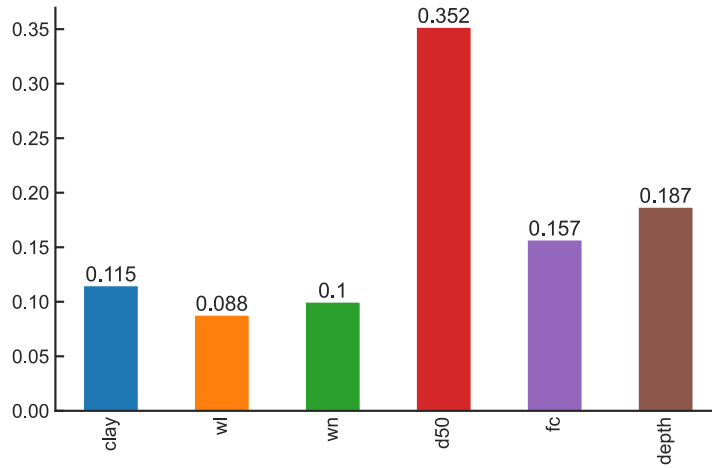
**Şekil 3.10.** Modellerin hem test hem de eğitim setleri için ROC Eğrisi.

Verilen sonuçlara göre DT sınıflandırıcısının zemin sıvılaşma potansiyelinin tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Karar ağacı ile yapılan sınıflandırmada 178 sıvılaşmayan zemin vakası doğru tahmin edilmiştir. Buna karşılık, 8 vaka yanlış tahmin edilmiştir. Sıvılaşmayan zeminlerden alınan 67 örnek doğru tahmin edilmiştir. Buna karşılık, 20 vaka yanlış tahmin edilmiştir. DT sınıflandırıcı, okunması ve yorumlanması kolay bir algoritmadır. Algoritmanın çıktılarından biri de karar kurallarıdır. Yeni verileri tahmin etmek için karar kuralları oluşturulabilir. Önemli olduğu düşünülen kararlardan birkaçı Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.11.** En iyi karar ağacı modeli görselleştirmesi.

Ayrıca,  $D_{50}$  özelliği Şekil 11'de gösterildiği gibi ilk ayırıcı özellik olarak bulunmuştur. Bu nedenle  $D_{50}$  veri setindeki en önemli özelliğe işaret etmektedir. Belirtildiği gibi, DT modeli için sıvılaşma tahmini üzerinde en güçlü etkiye  $D_{50}$  sahipken, derinlik özelliği ikinci en güçlü etkiye sahiptir. Zemin sıvılaşmasını tahmin etmek için her bir özelliğin göreceli önemi Şekil 3.12'de verilmiştir.



**Şekil 3.12.** DT modelinden elde edilen özelliklerin önemi.

Sonuçların gerçek değerleriyle değerlendirilebilmesi için sınır değerler ters ölçeklendirme ile hesaplanmıştır. Önemli karar kuralları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

if ( $d_{50} \leq 0.01948$ ) and ( $clay > 20.5$ ) and ( $depth > 2.9$ ) then class: no liq (proba: 100.0%) | based on 70 samples

if ( $d_{50} > 0.01948$ ) and ( $depth \leq 6.1528$ ) and ( $wl \leq 31.45$ ) and ( $fc \leq 82.507$ ) and ( $depth \leq 4.4504$ ) and ( $d_{50} > 0.03296$ ) and ( $clay \leq 14.48$ ) and ( $d_{50} \leq 0.0595$ ) then class: liq (proba: 100.0%) | based on 17 samples

if ( $d_{50} > 0.01948$ ) and ( $depth > 6.1528$ ) and ( $clay > 15.53$ ) then class: no liq (proba: 100.0%) | based on 14 samples

if ( $d_{50} \leq 0.01948$ ) and ( $clay \leq 20.5$ ) and ( $wn > 0.577$ ) then class: no liq (proba: 100.0%) | based on 10 samples

if ( $d_{50} \leq 0.01948$ ) and ( $clay > 20.5$ ) and ( $depth \leq 1.5472$ ) then class: no liq (proba: 100.0%) | based on 9 samples

if (d50 > 0.01948) and (depth <= 6.1528) and (wl > 31.45) and (wl <= 38.48) and (wn <= 38.506) and (d50 <= 0.055) and (fc <= 93.483) and (wl <= 35.95) and (fc > 88.485) then class: no liq (proba: 100.0%) | based on 6 samples

if (d50 <= 0.01948) and (clay > 20.5) and (depth <= 2.9) and (depth > 1.5472) and (d50 <= 0.0059) then class: no liq (proba: 100.0%) | based on 6 samples

### 3.5. Sonuçlar

Bu alışma, iyi bilinen yedi makine öğrenimi yaklaşımını kullanarak zemin sıvılaşma potansiyeli için bir model sunmaktadır: DT, LOGREG, SVM, KNN, RF, ANN ve SGD. Adapazarı veri seti uzman görüşü ile değerlendirildikten ve ön işleme aşamalarından geçirildikten sonra eğitilmiştir. Eğitim sürecinde algoritmaların farklı parametrelerle elde ettiği sonuçlar kaydedilmiştir. Böylece en iyi parametrelere sahip algoritmaların daha iyi sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Kullanılan algoritmalar tüm veri setinin eğitim kalitesine göre sıralandığında karar ağaçlarının %90 doğruluk başarı oranı ile en yüksek sonuçları elde ettiği görülmüştür. RF sınıflandırıcısının elde ettiği sonuçlar ise en iyi ikinci algoritma olmuştur. Belirtilen DT modeli, rastgele seçilen eğitim setinde %91 ve test setinde %84 doğrulukla sonuçlanmıştır. DT modelinin F1 skoru %96'ya ulaşmıştır. Daha önce uzman görüşü ile sıvılaşma olup olmadığını belirten kurallar makine öğrenmesi yöntemleri ile geliştirilmiştir. Bu alışmadaki DT modeli sıvılaşma tahmini için iyi bir alternatif sunmakta ve önceki çalışmalara göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Ancak literatürdeki birçok yöntem sıvılaşmaya kolayca karar verilemeyen bir test sahası sunmaktadır. Sonuçlar ve tartışma bölümünde karar ağaçları ile üretilen karar kuralları sunulmuştur. Özetle, bu kurallar kullanılarak zemin sıvılaşma kararları verilebilmektedir. Ayrıca ele alınan veri setindeki özelliklerin önemi karar ağaçları ile belirlenmiştir. Buna göre özellik sıralaması D<sub>50</sub>, derinlik, FC, kil, w<sub>n</sub>, w<sub>L</sub> olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan örneklerin alındığı Adapazarı zeminleri, flüviyal kökenli taşkın ovası sedimentleridir. Dünyanın her yerinde bu tür ortamlarda kelme şekli benzer olduğu için çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aynıoluşum koşullarına sahip ortamlarda da kullanılabilir. Farklı oluşum koşullarına sahip zeminlerde kullanılmak istendiğinde sonuçların farklı yöntemlerle teyit edilmesi gerekmektedir.



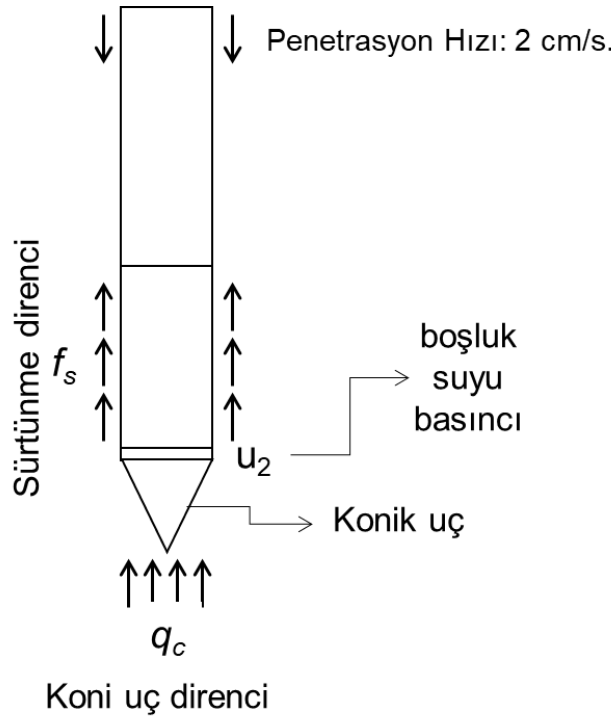
#### 4. KONİ PENETRASYON DENEYİ (CPT) İLE SIVILAŞMA TAYİNİ

Zemin incelemeleri çoğunlukla sondaj esnasında zeminden alınan örselenmemiş numunelerle gerçekleştirilen deneyler ve Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçlarına göre yapılmaktadır. Bu deney sonucunda alınan örselenmiş numunelerden zeminlerin fiziksel özellikleri elde edilirken, sondaj sırasında alınan örselenmemiş numunelerden ise mekanik özellikleri laboratuvar deneyleri neticesinde elde edilebilmektedir. SPT, basit bir prosedüre sahip olması ekonomik bir şekilde uygulanabilmesi, numune alınabilmesi gibi avantajlı yönleri olsa da operatör kaynaklı oluşabilecek uygulama hataları, uygulanabilen zemin türlerinin kısıtlı olması, deney sonucunda SPT-N darbe sayısı gibi kaba bir değer elde edilmesi gibi dezavantajlara sahiptir. Bununla birlikte sondaj, numune alma ve numunenin deney için hazırlanması süreçlerinde ne kadar dikkat edilse de numunede örselenmeler meydana gelmektedir. Bu örselenmelerin de laboratuvar deney sonuçlarını etkileyeceği aşikârdır.

CPT testinin temel kullanım alanı, zemin stratigrafisinin belirlenmesi ve geoteknik özelliklerin ön değerlendirmesidir. Test, dane boyutları çakıl fraksiyonuna kadar olan yumuşak ve orta sertlikteki zeminlerde, yani darbe veya döndürme kullanılmadan bir probun aşağı itilebildiği zeminlerde kullanılır. Bu zeminlerde yöntem, stratigrafinin rasyonel olarak belirlenmesi açısından eşsizdir. Temiz kumda, hidrostatik basınçların test sonuçlarını etkileyecek kadar yüksek olduğu su derinliklerinde yapılan deneyler haricinde, deney boşluk ölçümü yapılmadan da gerçekleştirilebilir. Diğer tüm zemin türlerinde CPT testi, penetrasyon sırasında oluşan boşluk basınçlarının eş zamanlı olarak kaydedilmesiyle gerçekleştirilir. Çakıl tabakaları, taşlar, sert ve/veya iri taneli dolgular, çok yoğun zemin tabakaları veya ana kaya nedeniyle penetrasyon durur (Larsson, 1995).

Gelişen teknolojilerle günümüzde arazide Koni Penetrasyon Deneyi (CPT: Cone Penetration Test) zemin incelemeleri için sıklıkla kullanılmaktadır. Koni penetrasyon deneyi yumuşak/gevşek ince daneli zeminlerden çakıl boyutundaki iri daneli zeminlere kadar kesit boyunca karşılaşılan zemin tabakalarında zeminlerin

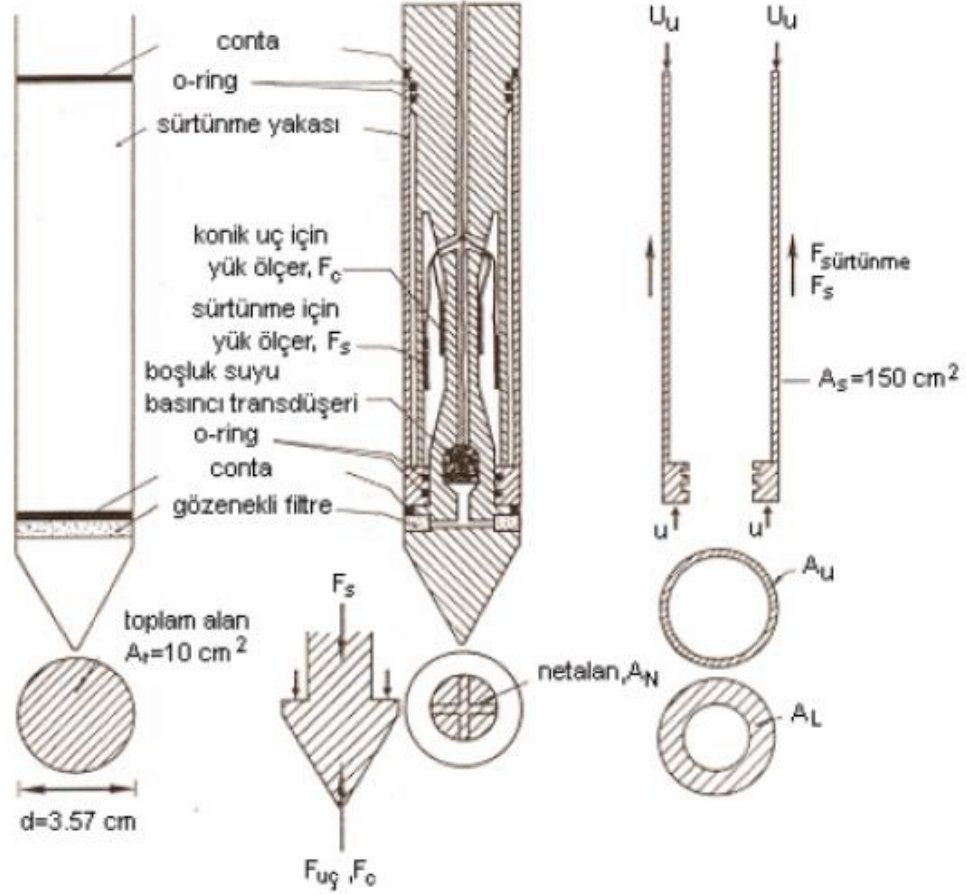
özelliklerini örselenme olmaksızın hassas bir şekilde arazide belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. CPT'nin hızlı bir şekilde uygulanabilmesi, 2 cm de bir okuma olarak sürekli bir zemin profili sağlaması, operatöre bağlı hataların olmaması ve birçok verinin elde edilmesi, kolayca tekrarlanabilmesi gibi avantajlarının yanında numune alınamaması sıkı iri daneli ve çimentolu zeminlerde uygulanamaması gibi dezavantajları mevcuttur. CPT deneyinde, kesit alanı  $10 \text{ cm}^2$ , konik uç açısı  $60^\circ$  olan silindir şeklinde bir sonda 20 mm/s sabit hızla zemine itilmektedir, deney esnasında ( $q_c$ ), koni uç direnci, ( $f_s$ ), sürtünme direnci, ( $u$ ), boşluk suyu basıncı parametreleri elektronik olarak ölçülmektedir (Şekil 4.1). Bu parametrelerden yola çıkarak birçok değişkenin hesaplanması mümkündür. Ayrıca istenilen derinliklerde penetrasyon durdurularak boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi kaydedilerek zeminin geçirimsizlik özellikleri hakkında veri elde edilebilmektedir.



**Şekil 4.1** Koni Penetrasyon deneyinde ölçümler

Konik penetrometrede her bir üretici firmanın kendine has tasarımları olabilir. Bu durumda ölçülen kuvvetlerin gerilmeye dönüştürülmesi aşamasında söz konusu koninin geometrik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir (Şekil 4.2).





**Şekil 4.2.** Sonda ve konik ucun geometrik özellikleri (Lunne ve ark, 1997).

Deneyin ilk uygulamalarında sadece; ucu konik olan bir gerecin zemine itilmesi esnasında karşılaşılan toplam direncin ölçümü yapılmıştır. Daha sonraları 1960'lı yıllarda koninin arka kısmına yerleştirilen bir sürtünme gömleği vasıtasıyla probun ilerlediği tabakaların sürtünme dirençlerini de belirlenmesi mümkün hale gelmiştir, böylelikle uç ve çevre dirençlerinin ayrı ayrı ölçülmesi mümkün olmuştur. Böylece zeminlerin türleri koni penetrasyon deney sonuçlarına bağlı olarak daha doğru bir şekilde belirlenmeye başlamıştır. Son zamanlarda ilerleyen teknolojik gelişmelerle birlikte koni içerisine yerleştirilen transdüser aracılığıyla deneyin yapıldığı zemin tabakaların anlık boşluk suyu basınçlarını ölçülmesi imkanı doğmuştur. Boşluk suyu basınçlarının da ölçülebildiği koni penetrasyon deneyinde CPT kısaltması ya ön P (piezocone) ekiyle PCPT veya U (u: boşluk suyu basıncını ölçen filtre) son ekiyle CPTU ibaresiyle ifade edilir. Bunun yanında koni penetrasyon deney cihazına monte edilebilen farklı aletler vasıtasıyla kayma dalgası hızları, zeminin elektriksel iletkenliği ölçülebilmekte, kamera ile geçilen tabakaların anlık olarak kaydedilmesi (vision cone penetrometer) mümkün olabilmektedir (Sert ve ark, 2015).

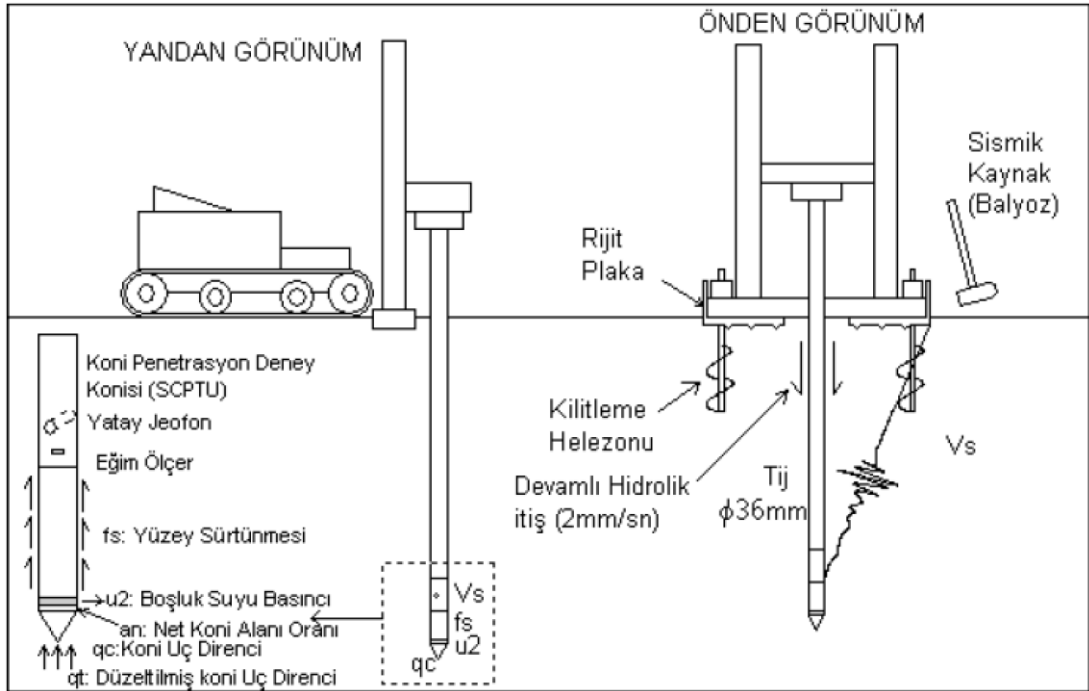
Deneyin ilk uygulamalarında zemin içinde ölçülen değerler basınç ölçerlere aracılığıyla yüzeyde okunurken ilerleyen süreçte elektronik koninin kullanılmasıyla birlikte kablolu sistemler ölçülen değerleri yüzeydeki veri alıcılara iletmeye başlamıştır. Gelişen teknolojiyle beraber ölçülen değerler kablosuz akustik sistemler aracılığıyla bir mikroişlemci vasıtasıyla ses sinyaline dönüştürülerek yüzeye hatasız bir şekilde gönderilebilmektedir. Bu sinyal sondanın temas ettiği bir mikrofon vasıtasıyla alınarak ara bağlantı ile veri toplayıcısına iletilmektedir. Veri toplayıcıda ayrıyeten sinyallerin iletiildiği zeminlerin derinlikleri de kaydedilmektedir. Bunlarla birlikte radyo frekanslarıyla veri aktaran yöntemler ve zemin verilerini yüzeye iletmeyen koninin içerisine monte edilmiş alıcılar vasıtasıyla elde eden sistemlerle de deney uygulanabilmektedir.

#### **4.1. Deneyin Uygulaması**

Koni penetrasyon cihazı, bir kamyonu veya paletli bir araca monte edilmiş vaziyette arazide çalışabilmektedir. Şekil 4.3'te Sakarya Üniversitesi'nin 200 kN kapasiteye sahip olan paletli CPTU deney aracı görülmektedir. Ölçülebilen maksimum uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı sınır değerleri kullanılan probun türüne bağlı olarak farklılık göstermekte Şekil 4.3'teki deney aleti için 50, 0,5 ve 2,5 MPa'dır. Adapazarı'na benzer yumuşak ve çok sıkı olmayan zemin ortamlarının çoğunlukla bulunduğu sahalarda için bu sınır değerler yeterli gelmektedir. Deney aleti deneyin tatbik edileceği sahaya getirilir, deneye başlamadan önce zemine sabitlenmesi amacıyla ankrajlar kullanılır ve yüzeyden başlayarak konik uçlu prob zemine dikey olarak ittirilir. Derinlik arttıkça deneye devam edilebilmesi için boyları 1 metre olan tijler ilave edilerek, deney esnasında karşılaşılabilecek direncin sınır değerlere ulaşmasına göre 0-30 m arasında değişen derinliklerde deney yapılabilmektedir. Sürekli olarak bilgisayar kontrolünde yapılan deney esnasında tijlerin yatayla yaptığı açı devamlı olarak kontrol edilip hatalı bir okuma yapılmasına müsaade edilmemektedir. Veri kaydetme sıklığının 1 cm'ye kadar düşecek hassaslıkla yapılabilmesi zemin değerlerinin ölçülmesinde devamlılığı getirmekte ve bu durum CPTU'nun başka zemin inceleme metodlarına göre daha çok daha hassas ve güvenilir veri almasını sağlamaktadır.



Şekil 4.3. Sakarya Üniversitesine ait paletli koni penetrasyon deney aleti.



Şekil 4.4. CPT deney sistemi ve ölçülen parametreler.

CPT deney cihazlarında uygulama esnasında konik ucun zemine ittirilmesi esnasında uç kısımda karşılaşılan kuvvetin kesit alanına oranıyla hesaplanan uç direnci ( $q_c$ ), sondanın yanağında bulunan sürtünme gömleğinin maruz kaldığı toplam yükün sonda

yanak yüzeyinin alanına bölünmesiyle hesaplanan çevre sürtünme/yapışması ( $f_s$ ); boşluk suyu basınçlarının da ölçüldüğü CPTU sistemlerde ( $u_1, u_2, u_3$ ) deney cihazına entegre olan bilgisayar tarafından kesintisiz bir şekilde kayıt altına alınmaktadır. Buna ilaveten boşluk suyu basınçlarının da ölçüldüğü deneylerde belirlenen derinliklerde sönümleme deneyleri (*dissipation test*) ve sismik ölçüm yapılan SCPTU deneylerde kayma dalgası hızları ( $v_s$ ) ölçümlerini yapmak mümkündür (Şekil 4.4). Yapılan ölçümlerle zeminlerin sınıfları belirlenebilmekte, zeminin taşıma gücü ve sıvılaşma potansiyeli gibi çeşitli konularda değerlendirmeler yapmak mümkün olmaktadır.

## 4.2. Deneyde Ölçülen Parametreler ve Tanımlar

CPTU deneyi esnasında sonda zemine ittirilirken ( $q_c$ ), koni uç direnci, ( $f_s$ ), sürtünme direnci, ( $u$ ), boşluk suyu basıncı parametreleri elektronik olarak ölçülmektedir.

Koni uç direnci ( $q_c$ ), birim alanda karşılanan kuvvettir. Bu da koni ucunun maruz kaldığı toplam eksenel yükün koni ucunun kesit alanına ( $1000 \text{ mm}^2$ ) bölünmesi ile hesaplanır ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Larsson, 1995).

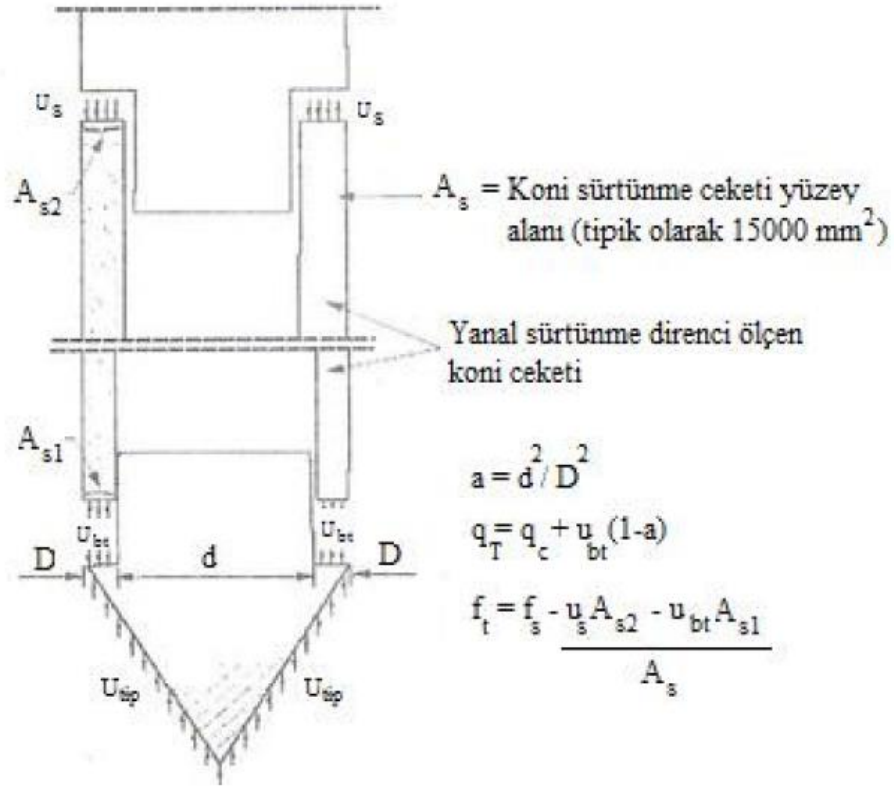
$$q_c = \frac{F_T}{A_T} \quad (4.1)$$

burada  $F_T$ ; koni ucunun karşıladığı toplam eksenel yük,  $A_T$  koni ucunun kesit alanıdır (Şekil 4.2).

Boşluk suyu basıncının ölçüldüğü deneylerde uç direnci boşluk suyu basıncının konik ucun geometrisine bağlı olarak meydana getirdiği değişimlerin yansıtılması için düzeltme yapılarak kullanılır.

$$q_t = q_c - u (1 - a) \quad (4.2)$$

Burada  $q_t$  boşluk suyu basıncı etkilerini hesaba dahil eden düzeltilmiş uç direnci,  $q_c$  ölçülen uç direnci,  $u$  ölçülen boşluk suyu basıncı,  $a$  net alan oranıdır. Alan oranı koni türüne bağlıdır ve yaygın olarak 0.55-0.90 arasında değerler almaktadır. İdeal olan  $a = 1$  durumunda  $q_t = q_c$  olmaktadır ( $u = 0$ ).



**Şekil 4.5.** CPTU’da boşluk suyu basıncının koni geometrisine etkisi (Mayne ve ark, 1990).

Sürtünme direnci ( $f_s$ ); sürtünme gömleğinin karşılaştığı toplam aksenal yükün sürtünme gömleğinin dış yüzey alanına ( $15000 \text{ mm}^2$ ) bölünmesi ile hesaplanır ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Şekil 4.5).

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (4.3)$$

düzeltilmiş sürtünme direnci aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir;

$$f_t = f_s - \left[ u \cdot b + 0,3 \Delta u \left( \frac{1-a}{15} - b \right) \right] \quad (4.4)$$

burada  $u$  boşluk suyu basıncı,  $\Delta u$  boşluk suyu basıncındaki değişim,  $a$  uç alan faktörü ve  $b$  sürtünme alan faktörüdür.

Sürtünme oranı ( $R_f$ ); sürtünme direncinin ( $f_t$ ) koni uc direncine ( $q_t$ ) bölünmesiyle elde edilir.

$$R_f = \frac{f_t}{q_t} \times 100 \quad (4.5)$$

Normalleştirilmiş sürtünme oranı ( $F_r$ ); toplam gerilme değerine ( $\sigma_{v0}$ ) göre bir bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4.6)$$

Boşluk suyu basıncı oranı (DPPR); oluşan fazla boşluk suyu basıncının ( $\Delta u$ ) ölçüm seviyesinde koni uç direncine ( $q_t$ ) oranıdır.

$$DPPR = \frac{\Delta u}{q_t} \quad (4.7)$$

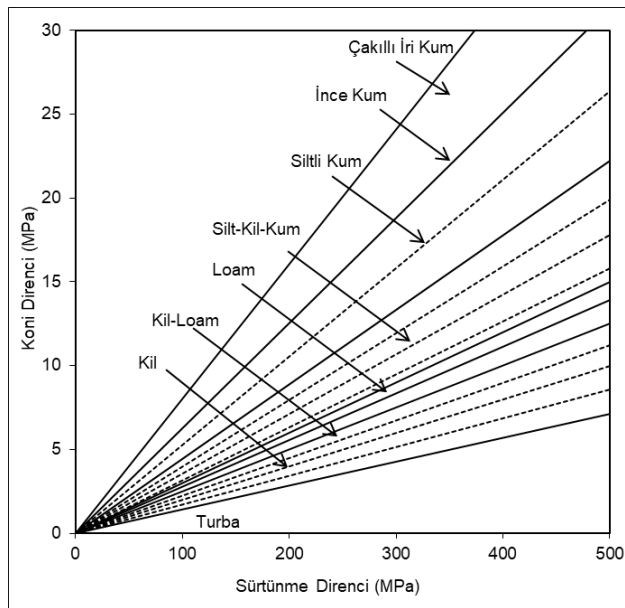
Boşluk suyu basıncı oranına alternatif olarak  $B_q$  parametresi de kullanılmaktadır.

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4.8)$$

burada,  $\Delta u$  boşluk suyu basıncındaki değişim,  $q_t$  koni uç direnci ve  $\sigma_{v0}$  toplam gerilme değeridir.

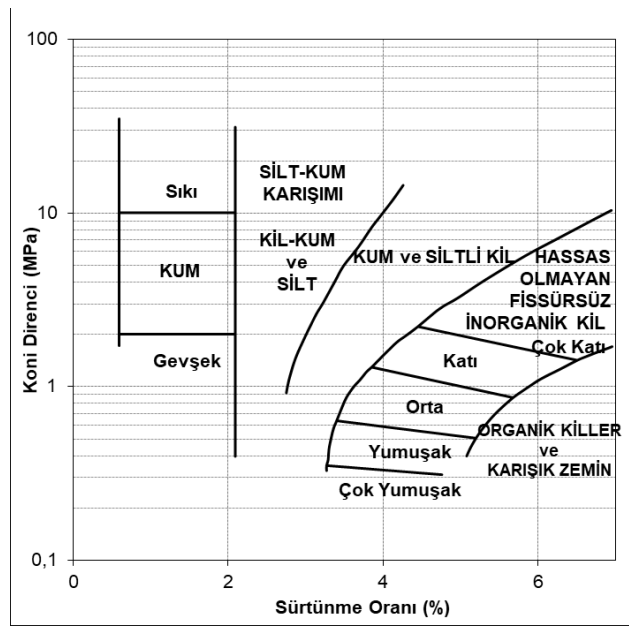
### 4.3. CPT ile Zeminlerin Sınıflandırılması

CPT ile numune eldesi yapılamadığından zeminlerin CPT ile sınıflandırılmasında farklı araştırmacılar tarafından test verilerini kullanılarak hazırlanan çeşitli grafikler önerilmiştir. İlk dönemlerde hazırlanan grafiklerde düzeltilmemiş parametreler olan koni uç direnci, ( $q_c$ ), sürtünme direnci ( $f_s$ ) kullanılırken (Begemann, 1965) daha sonraları normalize edilmiş sürtünme oranı ( $F_r$ ), normalleştirilmiş koni uç direnci ( $Q_t$ ) ve boşluk suyu basıncı oranı ( $B_q$ ) değerlerine göre düzenlenmiş sınıflandırma grafikleri kullanılmaktadır (Şekil 4.6).



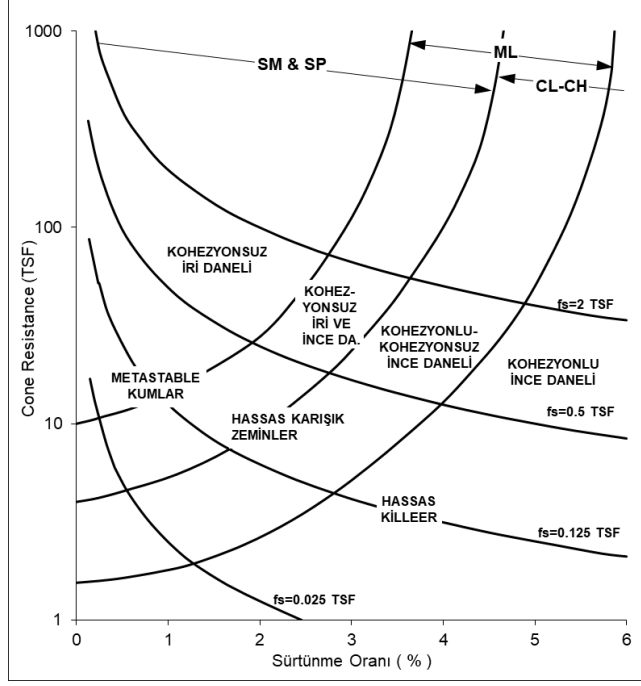
Şekil 4.6. Begemann (1965) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.

Schmertmann (1978) farklı bölgeleri tanımlamak için koni uç direncini ( $q_c$ ) logaritmik eksen üzerinde ve  $R_f$ 'i aritmetik eksen üzerinde göstermiştir (Şekil 4.7). Schmertmann'ın çizelgesi Begemann'inkinden (1965) farklı olarak kumları bağlı yoğunluklarına göre, killeri ise kıvamlarına göre sınıflandırmıştır. Bununla birlikte, ince daneli zeminlerin tüm spektrumu kapsamayan sınırlı kıvam aralıklarında temsil edildiği görülmektedir. Farklı bölgelerden elde edilen sonuçların, zeminlerin hassasiyeti ve sürtünme davranışları ve yeraltı suyu rejimi gibi faktörler nedeniyle grafiğin şeklini etkileyebileceğini vurgulayarak, yerel kullanım için grafikler geliştirmenin daha uygun olacağını öne sürmüştür.



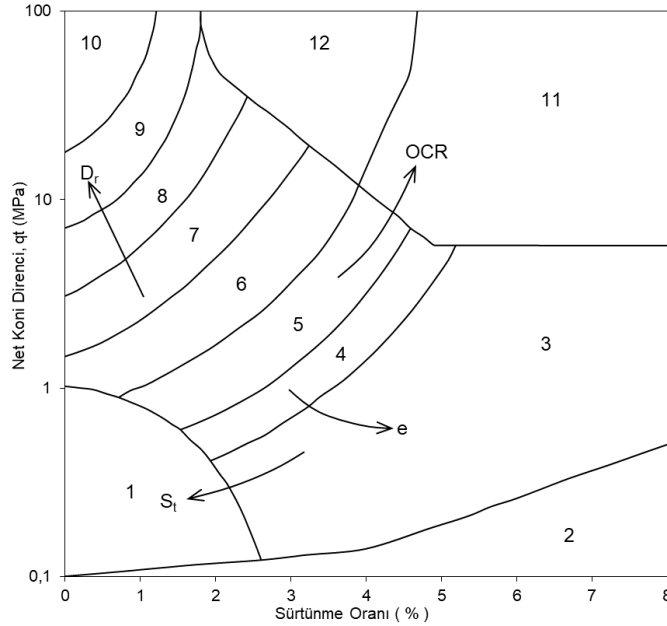
**Şekil 4.7.** Schmertmann (1978) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.

Douglas ve Olsen (1981) USCS sembollerinden bazılarını çizelgesine dahil etmeye çalışan ilk araştırmacılar. Buna ek olarak sıvılık indisi, duyarlılık ve boşluk oranı gibi özellikleri de dahil etmişlerdir. Bu araştırmacıların çizelgesi şu anda mevcut olan çizelgelerin öncüsü durumundadır ve Schmertmann'ın çizelgesinden çarpıcı farkı, zemin bölgelerini birbirinden ayıran çizgilerdir (Şekil 4.7).



Şekil 4.8. Douglas ve Olsen (1981) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.

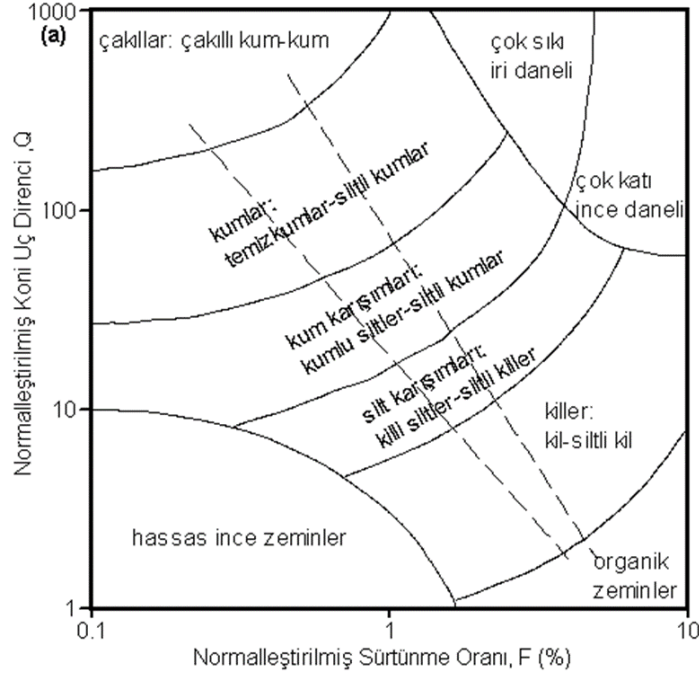
Robertson ve ark, (1986)  $q_t-R_f$  (%) ve  $q_t-B_q$  eksenleri kullanılarak 12 bölgenin tanımlandığı başka bir sınıflandırma çizelgesi geliştirmek için  $B_q$  ifadesini kullanmıştır. Senneset ve ark, (1989),  $q_t$  ekseninin aritmetik olması farkıyla, düzeltilmiş uç direnci  $q_t$  ve  $u_2$ 'nin bir fonksiyonu olan  $B_q$ 'nin kullanıldığı benzer bir çizelge önermiştir. Bu çizelgede maksimum uç direnci 16 MPa'nın altında sınırlandırılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Robertson ve ark, (1986) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.

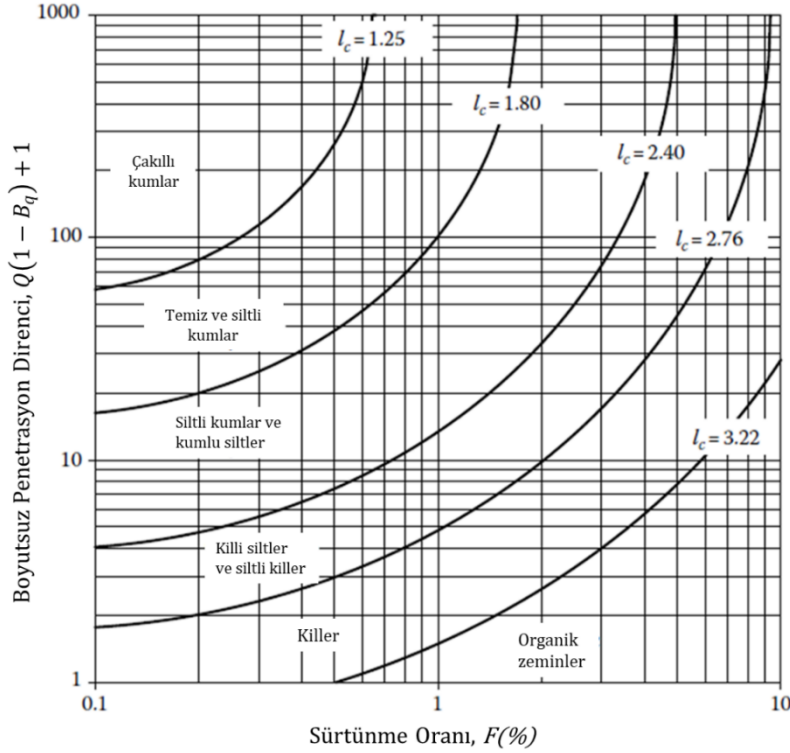


Robertson (1990) daha önce önerdikleri 1986 çizelgelerinin eleştirel bir değerlendirmesini yapmış ve eksenlerin etiketlerini normalleştirilmiş sürtünme direnci ( $F$ ) ve normalleştirilmiş uç direnci ( $Q$ ) olarak değiştirmiştir. Bu çalışmada zemin sınıfı bölgeleri 9'a indirilmiştir. Bu sınıflandırma tablosu günümüzde de en çok başvurulan sınıflandırma grafiklerinden biridir (Şekil 4.10).



**Şekil 4.10.** Robertson (1990) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.

Jefferies ve Davies (1991)  $Q$ ,  $F$  ve  $B_q$  arasındaki ilişkiyi gösteren iki grafiğin gerekli olmadığını ifade ederek Robertson (1990) grafiklerine farklı bir yorum getirmiştir. Tüm parametreleri tek bir grafikte göstermek için  $B_q$  eksenini  $Q(1 - B_q)$  olarak değiştirilerek grafik değiştirilmiştir. Böylece boşluk suyu basıncının etkisini de aynı grafikte ifade etmek mümkün olmuştur. Böyle bir gruplamanın ince daneli zeminler için bölgeyi gerektiği gibi genişlettiğini, kumlar için ise önemli bir değişiklik olmadığını ifade etmişlerdir (Şekil 4.11).

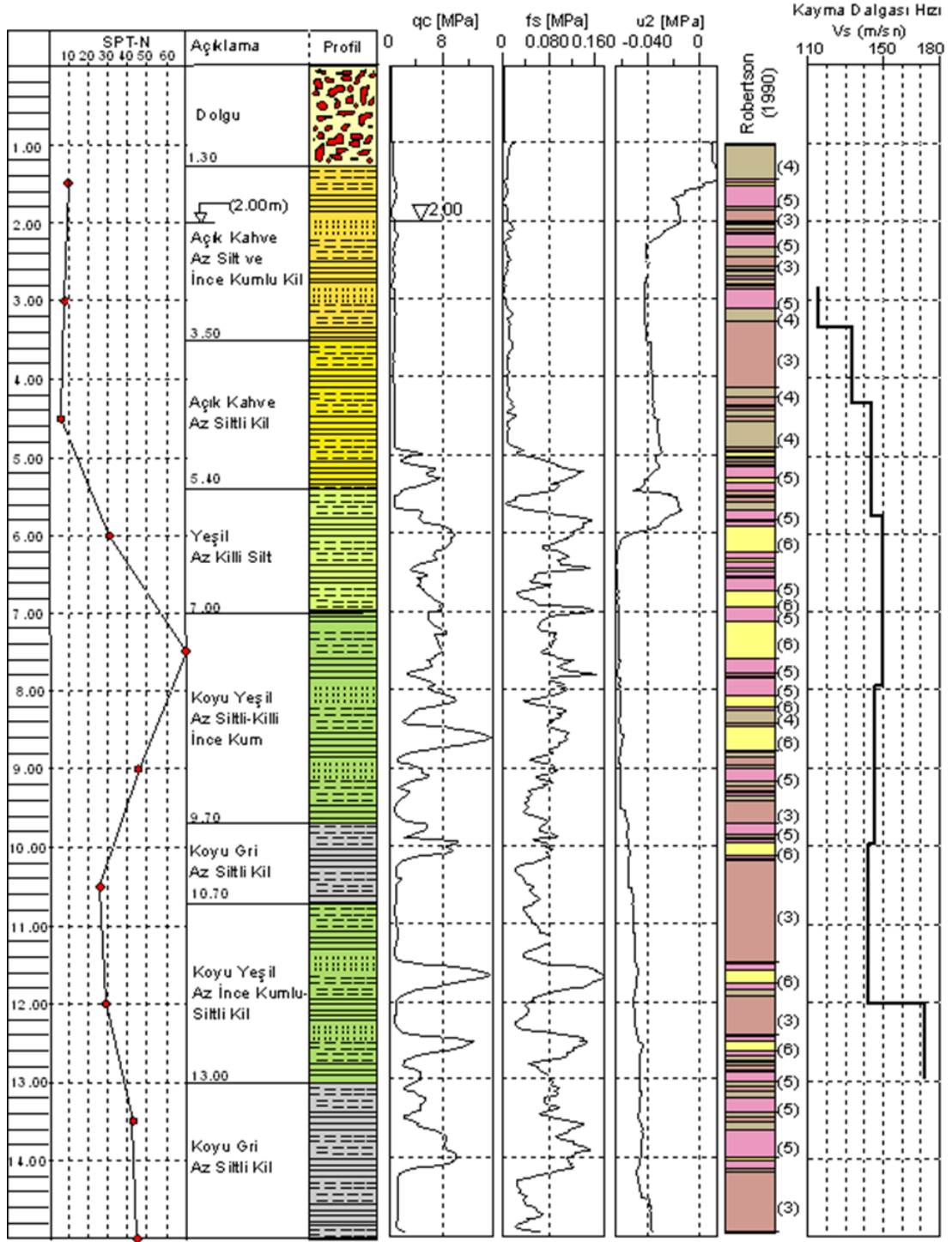


**Şekil 4.11.** Jefferies ve Davies (1991) tarafından önerilen sınıflandırma kartı.

Yukarıdaki tartışmadan, ilgili her bir parametrenin zeminin sınıflandırılmasında önemli bir rol oynadığı sonucuna varılabilir. Genel olarak, iri daneli zeminler ince danelilere göre daha yüksek koni direnci ( $q_c$ ) verir. Öte yandan, sürtünme oranı ( $R_f$ ) yüksek plastisiteli zeminler için daha büyüktür. Robertson ve ark, (1986)  $R_f$  'nin genel olarak  $q_c$  'den daha güvenilir sonuçlar verdiği görüşündedir.

Schneider ve ark, (2008) kil, silt ve kumları tanımlamak için daha  $B_q$  yerine  $\Delta_{u2}/u_0$  oranının kullanılmasının daha uygun olabileceğini belirtmiştir. Zemin davranışının, yükleme sırasında ortaya çıkan boşluk basınçlarının dağılımı tarafından yönetildiğini ifade etmiştir.

CPT deneyi uygulama esnasında her derinlik için ölçülen uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri derinliğe karşı noktalanarak grafik şeklinde sunulmaktadır. Şekil 4.12'de Adapazarı'nda aynı noktada gerçekleştirilmiş bir sondaj ve CPT çalışması sonucu ortaya çıkan zemin kesiti verilmiştir. SPT darbe sayıları ile PCPT uç dirençleri kıyaslandığında benzer davranışlar görülmekte fakat sondaj esnasında en hassas çalışmayla bile 10 m derinlik boyunca 9 farklı zemin tabakası ortaya koyulurken PCPT verileri ile aynı kesit üzerinde kırktan fazlan zemin tabakasını yakalamak mümkün olmuştur.



Şekil 4.12. Adapazarı'nda yapılan aynı noktaya ait sondaj ve CPT sonda logları.

#### 4.3.1. Zemin davranış tipi indeksi ( $I_c$ )

Zemin sınıflandırma grafiklerinin yanı sıra son yıllarda CPT verileri ile zemin sınıflandırması üzerine yapılan çalışmalar temel olarak normalize edilmiş koni direnci ( $Q$ ), normalize edilmiş sürtünme oranı ( $F$ ) ve bir boşluk basıncı katsayısının ( $B_q$ ) kullanıldığı "Zemin Davranış Tipi İndeksi"  $I_c$ 'nin tanımlanmasına yöneliktir.  $I_c$ , temelde merkezi olarak kabul edilen çemberlerin yarıçapıdır ve her bir farklı zemin

bölgesi arasındaki sınırları temsil eden boyutsuz bir parametredir. Tablo 4.1’de bu konuda çalışan çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  değerlerinin formülleri gösterilmektedir. Jefferies ve Davies (1993), çalışmasında Robertson (1990) çizelgesindeki eğrilerin merkezi çemberler olduğunu göstermiş; eksenleri  $F-Q(1-Bq)$  olan bir çizelge geliştirmiş ve zemin tipi davranış indeksi formülünü önermişlerdir. Formüldeki 1 değeri negatif  $Bq$  değerlerini bertaraf etmek için kullanılmıştır. Been and Jefferies (1992) tarafından önerilen formül Jefferies ve Davies (1993)’ten farklı olarak logaritmik kısımda “+1” ifadesi barındırmaktadır. Bu formüldeki  $(1 - B_q) + 1$  terimi, killeri siltelerden ayırmak için geliştirilmiştir.

Robertson ve Wride (1998) boşluk suyu basıncını dikkate almayan alternatif bir  $I_c$  tanımı sunmuştur. CPT verileriyle sıvılaşma potansiyelinin değerlendirildiği çalışmada Robertson (1990) çizelgesindeki merkezi yayları tanımlamak için  $I_c$  formülünün normalleştirilmiş penetrasyon direnci  $Q$  (boyutsuz) ve normalleştirilmiş sürtünme oranı  $F$  nin (yüzde cinsinden) kullanılmasını önermiştir.

$$Q = \left( \frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_{a2}} \right) \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (4.9)$$

$$F = \left[ \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} \right] 100 \quad (4.10)$$

burada,  $\sigma_{vo}$  ve  $\sigma'_{vo}$  sırasıyla toplam ve efektif gerilme,  $P_a$  ise referans basınç değeridir.  $P_a$ ’nın birimi formülde kullanılan diğer parametrelerin birimiyle aynıdır. Örneğin  $\sigma_{vo}$  kPa birimiyle ifade edilmişse  $P_a = 100$  kPa, MPa birimiyle ifade edilmişse  $P_a = 0.1$  Mpa dır.

Juang ve ark, (2003) sıvılaşma potansiyelini inceledikleri çalışmada  $I_c$  hesabında Robertson ve Wride (1998) formülünden farklı olarak  $q_{c1N}$  değişkenini kullanmıştır.

Li ve ark, (2007) önceki araştırmacılardan farklı olarak, kök altındaki kuvveti 2’den 2.25’e yükseltmiştir ve bu da sınıflandırma kartındaki dairelerin şekillerini değiştirmiştir.

**Tablo 4.1.** Farklı araştırmacılar tarafından önerilen bulunan zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) formülleri.

Araştırmacı	$I_c$ Formülü
Jefferies ve Davies (1993)	$I_c = \sqrt{\{3 - \log[Q(1 - B_q)]\}^2 + [1.5 + 1.3(\log F)]^2}$
Been ve Jefferies (1992)	$I_c = \sqrt{\{3 - \log[Q(1 - B_q) + 1]\}^2 + [1.5 + 1.3(\log F)]^2}$
Robertson ve Wride (1998)	$I_c = \sqrt{[3.47 - \log Q]^2 + [1.22 + \log F]^2}$
Juang ve ark, (2003)	$I_c = \sqrt{[3.47 - \log q_{c1N}]^2 + [1.22 + \log F]^2}$
Li ve ark, (2007)	$I_{c,m} = \sqrt{\{3.25 - \log[Q(1 - B_q)]\}^2 + [1.5 + 1.3(1 + \log F)]^{2.25}}$
Robertson (2010)	$I_{SBT} = \sqrt{[3.47 - \log(q_c/p_a)]^2 + [1.22 + \log R_f]^2}$
Bol (2013)	$I_c = \sqrt{\{3.47 - 0.9 \log[Q(1 - 0.01 i)]\}^2 + \{1.4 + 2[\log F / (1 - 0.01 i)]\}^2}$

$I_c$  formüllerinde boşluk suyu basıncının da  $B_q$  bağıntısı ile yer almasının daha gerçekçi sonuçlar vereceği öne sürülmektedir (Been ve Jefferies, 1992; Jefferies ve Davies, 1993). Boşluk suyu basıncının zemin tipi ile olan ilişkisi şu şekilde özetlenebilir: Yüksek oranda ince dane içeren zeminler ile yüksek hassaslık derecesine sahip zeminler yüksek  $u_2$  (hemen koni arkasına yerleştirilmiş filtrede ölçülen boşluk suyu basıncı) verirler. Buna karşın, iri daneli, sıkı ve sürtünmeli zeminler ile yüksek OCR' ye sahip zeminler düşük  $u_2$  okumaları verirler. Bu nedenlerle, boşluk suyu basınçlarını da göz önüne alan formülasyonların güvenilirliğinin daha yüksek olacağı düşünölmektedir.

$I_c$  ile zemin sınıflandırmasında bazı araştırmacılar tarafından zeminler birkaç farklı bölgeye ayrılmış ve bu bölgelerin sınırlarını belirleyen  $I_c$  değerleri ile bölgelerin hangi zemin türlerini içerdiiğini gösteren Tablo 4.2 aşağıda verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Zemin davranış tipi ( $I_c$ )'ye göre zemin bölgeleri sınırları.

Zemin Davranış Tipi	Bölge	Robertson&Wride (1998)	Been&Jefferies, (1992)	Jefferies&Davies (1993)
Organik Zeminler-Turba	2	>3.60	>3.22	>3.22
Killer: Siltli Kil-Kil	3	2.95-3.60	2.76-3.22	2.82-3.22
Silt Karışımları: Killi Silt-Siltli	4	2.60-2.95	2.40-2.76	2.54-2.82
Kum Karışımları: Siltli Kum-Kumlu Silt	5	2.05-2.60	1.80-2.40	1.90-2.54
Kumlar: Temiz Kum-Siltli	6	1.31-2.05	1.25-1.80	1.25-1.90
Çakıllı Kum-Sıkı Kum	7	<1.31	<1.25	<1.25

Bol (2013), CPTu testi sırasında boşluk suyu basınçlarında ( $i$ ) meydana gelen değişikliklerin zemin türüyle yakından ilişkili olduğunu belirtmiş ve  $i$  parametresinin CPT ölçümlerini kullanarak zeminleri sınıflandırmak için kullanılan diğer yöntemlere daha iyi bir alternatif olduğunu öne sürmüştür. Penetrasyon sırasında zemin profili boyunca boşluk suyu basıncı eğimlerini temsil eden  $i$  parametresi, hareket esnasında boşluk suyu basınçlarındaki değişiklikleri tanımlayan boyutsuz bir parametredir.

$$i = \frac{\Delta u_2}{\Delta \sigma_{vo}} = \frac{u_{2z2} - u_{2z1}}{(\sigma_{vo2} - \sigma_{vo1})} \quad (4.11)$$

burada  $z_1$  ve  $z_2$  zemin profilinde çalışılan tabakanın başlangıç ve bitiş derinlikleri  $u_{2z2}$  ve  $u_{2z1}$   $z_2$  ve  $z_1$  derinliklerindeki boşluk suyu basıncı değerleri,  $\sigma_{vo2}$  ve  $\sigma_{vo1}$  ise bu derinliklerde hesaplanan toplam gerilmelerdir.

Likit limit arttıkça  $i$  parametresinin arttığı, dane boyutu arttıkça ise azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, siltler gibi dilatif karakterli zeminler için  $i$  negatif değerler almıştır. Bol (2013), TS1500/(2000) zemin sınıflarına karşılık gelen zemin tipi davranış indeksi  $I_c$  aralıkları önermiştir (Tablo 4.3). Bu yöntemin diğerlerinden farkı, doğrudan laboratuvar test sonuçlarından elde edilen zemin sınıflarını göstermesidir.

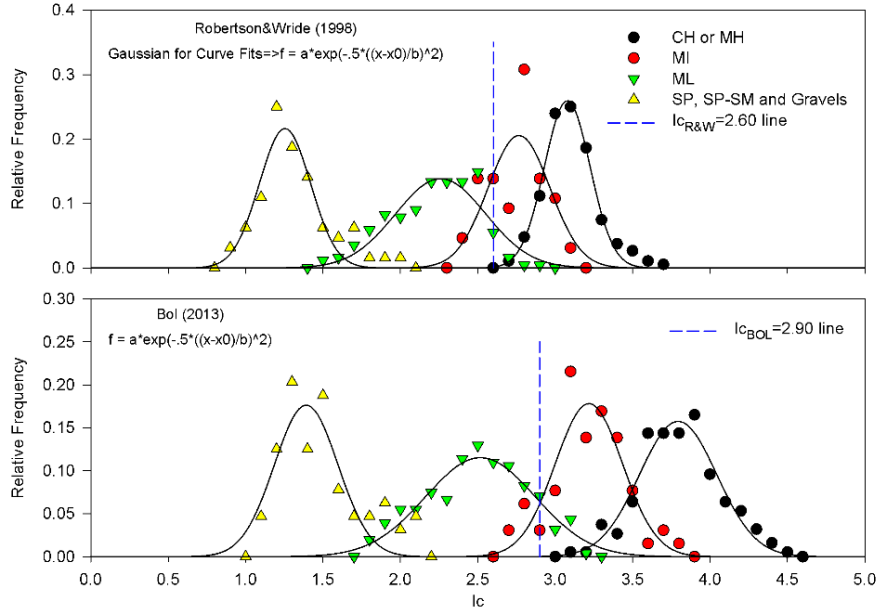
**Tablo 4.3.**  $I_c$  değerleriyle tanımlanan zemin sınıfları (Bol, 2013).

Bölge	$I_c$	Zemin Sınıfı
1	$I_c < 1.40$	SP or Gravels
2	$1.40 < I_c < 1.80$	SW-SM or SP-SM
3	$1.80 < I_c < 2.45$	SM or ML
4	$2.45 < I_c < 2.90$	CL-ML
5	$2.90 < I_c < 3.48$	CI-MI or CL
6	$3.48 < I_c < 4.00$	CH or CI
7	$I_c > 4.00$	CH

Bol (2013) tarafından önerilen  $I_c$  formülünün hesabında normalleştirilmiş penetrasyon direnci  $Q$ , Robertson ve Wride (1998) formülündeki  $q_c$  yerine düzeltilmiş toplam koni direnci  $q_t$  kullanılmaktadır.

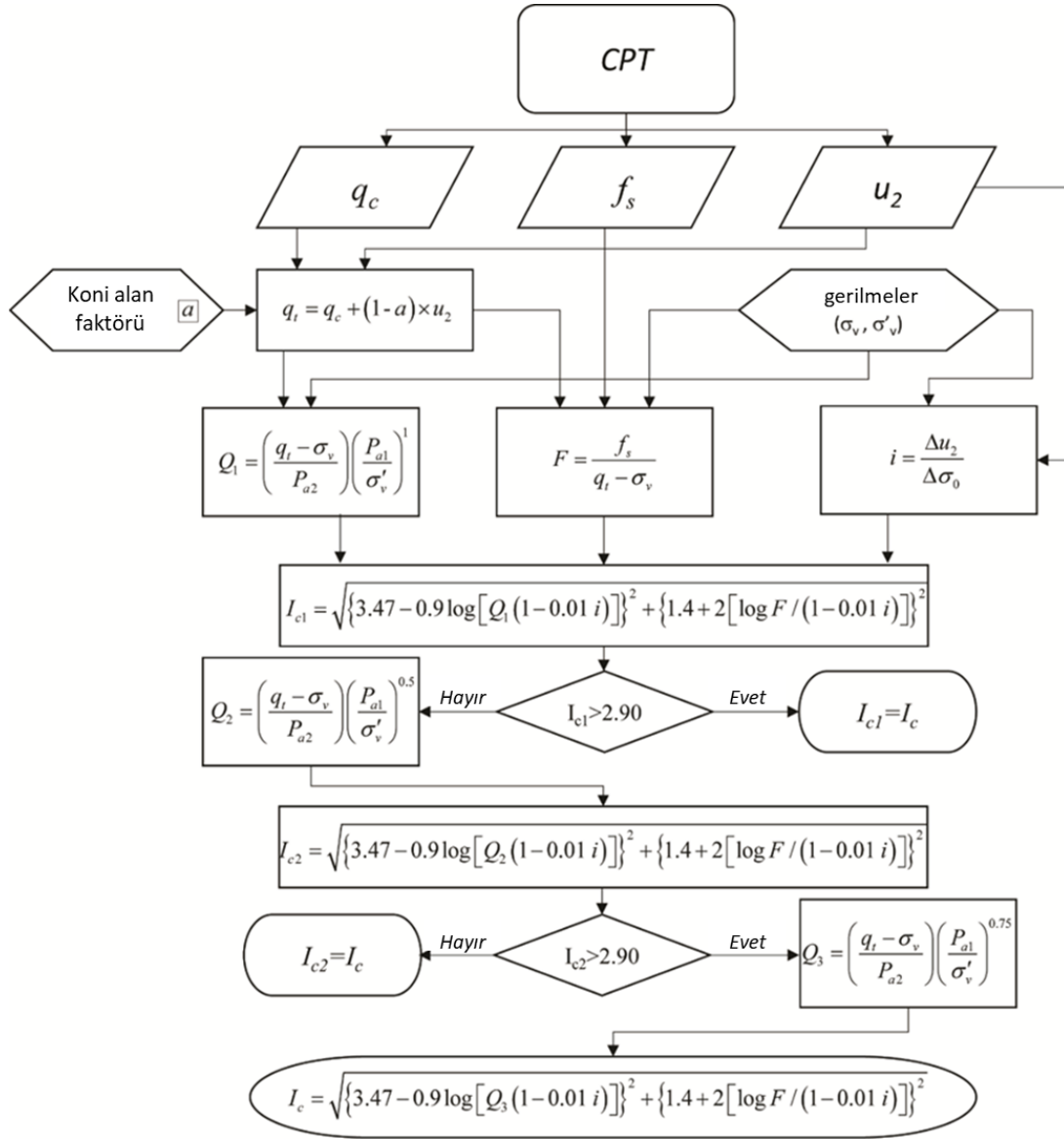
$$Q = \left( \frac{q_t - \sigma_{vo}}{P_{a2}} \right) \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (4.12)$$

Robertson ve Wride (1998)  $I_c$  değerinin belirlenmesinde killer için  $I_c > 2.60$  ise  $n=1$  alınmasının uygun olacağını ancak  $I_c < 2.60$  olan kumlu zeminler için  $n$  değerinin 0.5 olacağını belirtmiştir. Ancak Bol (2013) killer ve kumları ayıran sınırın Şekil 4.13'de gösterildiği gibi aslında  $I_{c(Bol)} = 2.90$  olduğunu belirtmiştir.



**Şekil 4.13.** Robertson ve Wride (1998) ve Bol (2013)'e göre zemin sınıflarının göreceli frekans diyagramları (Bol ve ark, 2019).

Bol (2013) önerdiği  $I_c$  formülünde  $Q$  hesabı için şu adımların izlenmesini söylemiştir.  $Q$ 'yu  $n=1$  olacak şekilde hesaplayın.  $I_c$  değerini hesaplamak için bulunan  $Q$  değerini kullanın. Eğer  $I_c > 2,90$  ise bu değer sınıflandırma için kullanılır.  $I_c < 2,9$  ise, ilk adımı tekrarlamak için  $n=0,5$  alın. Eğer  $I_c$  2,9'dan küçük çıkarsa, bu ikinci tahmin sınıflandırma için kullanılır. Ancak,  $I_c > 2.90$  ise  $Q$ 'nun nihai değerini ve bununla ilişkili  $I_c$ 'yi elde etmek için  $n=0.75$  alınır. Prosedürü gösteren akış şeması Şekil 4.14'te gösterilmektedir (Bol, 2013).

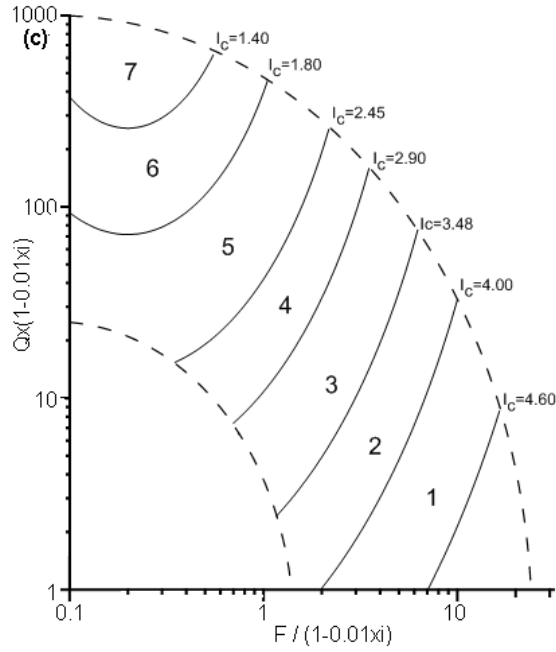


**Şekil 4.14.** Bol (2013) prosedürü kullanılarak CPT verilerinden zemin sınıflandırmasının uygulanmasını gösteren akış şeması.

Jefferies ve Been (2006)'ya göre; zemin davranış indeksi ilk olarak Roberston (1990)'ın ortaya attığı CPT verilerine dayalı zemin sınıflandırma grafiğini eleştiren Jefferies ve Davies (1991)'in tartışmasında Roberston (1990) CPT zemin tipi sınıflandırma çizelgesinde,  $Q$  yerine  $Q.(1 - Bq)$  kullanarak doğrudan piezometrik bilgileri içerebileceği fikrinden doğmuştur. Been ve Jefferies (1992) böylelikle çizim eksenini genişletilebileceğini ve killer ile siltler arasında bir ayrım yapmanın daha kolay olacağını ifade etmişlerdir. Aslında, Houlsby (1988) tarafından tanımlanan parametre grubunun  $[Q.(1 - Bq) + 1]$  kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Araştırmacılar "+1" terimi önemsiz bir fark gibi görünse de siltlerin ayırımında daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Zemin sınıflandırma



çizelgesini yatay ölçeği genişleterek yeniden düzenlemek, zemin tipi bölge sınırlarını yaklaşık dairelere dönüştürmektedir. Burada elde edilen dairelerin yarıçaplarının zemin davranış indeksini ( $I_c$ ) direk verebileceğini söylemişler, böylelikle sınıflandırma grafikleri kullanılmadan da zemin tipi hakkında fikir sahibi olabilmışlerdir. Boşluk suyu basıncının yanı sıra su basıncının derinlikle değişimi sırasında sunmuş olduğu eğimleri ( $i$ ) de göz önüne alan Bol (2013) yapmış olduğu çalışmada sınıflandırmada boşluk suyu basıncı eğilimlerin etkili olabileceğini göstermiştir (Şekil 4.15).

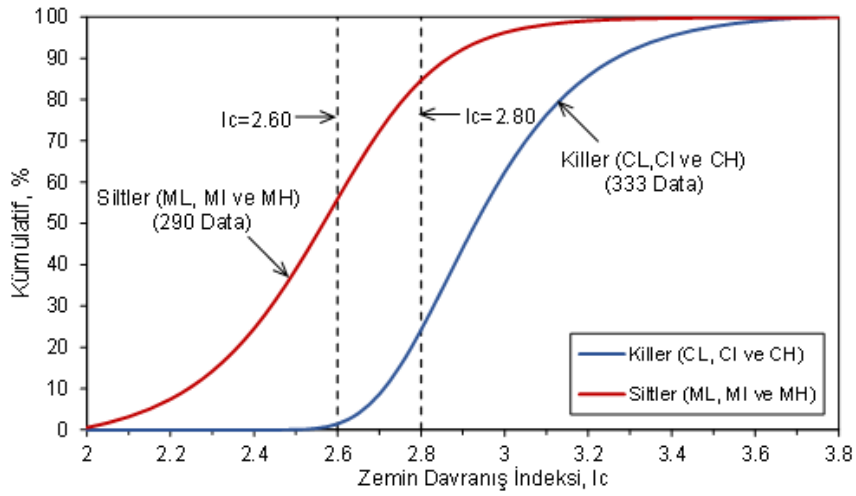


Şekil 4.15. Bol (2013) tarafından önerilen zemin sınıfları dağılımı.

#### 4.3.2. İnce daneli zeminlerin CPT ile sınıflandırılması

Robertson ve Wride (1998) ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede CPTU çıktılarından hesaplanan zemin tipi davranış indeksi  $I_c$ 'nin önemli bir parametre olduğunu ifade etmiş fakat sıvılaşabilir ince daneli zeminleri ayırt eden kesin bir sınır çizememiştir. Robertson ve Wride (1998) sıvılaşma potansiyeli olan kumları ve siltli zeminleri  $I_c=2.6$  değeri ile killerden ayırmakta ve bu değer üzerinde konumlanan zeminlerin kil içeriğinin çok yüksek olması sebebiyle sıvılaşmaz olarak kabul edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bazı araştırmacılara göre bu sınır değer indeks deneyleri ile sınıflaması yapılan zeminler ile bire bir örtüşmemektedir (Giltrap, 1998; Önalp ve ark, 2006). Gilstrap (1998)'e göre  $I_c$ 'nin 2.4 ile 2.6 değerleri arasında olan zeminler laboratuvar indeks deneylerine göre %20 ile %50 oranında killi zemin olarak sınıflandırılmaktadır.

Önalp ve ark, (2006) TS1500/2000' e göre kil ve silt olarak sınıflandırılan zeminlerin zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) üzerinde yapmış oldukları çalışma Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre araştırmacılar kendi veri tabanlarında bulunan killeri  $I_c > 2.60$  sınırı ile ayrılırsa siltlerin %50' ye yakınının  $I_c > 2.60$  olarak çıktığını ve hata oranının arttığını söylemişlerdir. Bununla birlikte kil sınırı  $I_c > 2.80$  alındığında ise siltlerde yaklaşık %20'lik bir hata yapılırsa dahi bu yüzdeye büyük çoğunlukla sınıflaşma potansiyeli bulunmayan plastik siltlerin (MI, MH) girmesi nedeniyle ayırım daha gerçekçi hale geleceğini ifade etmiştir. Çalışmadaki kil ve siltlerin Robertson ve Wride (1998)'in önerdiği  $I_c$  ile dağılımı Şekil 4.16'da görülmektedir.



**Şekil 4.16.** Kil ve siltlerin zemin davranış indisi ( $I_c$ ) açısından incelenmesi (Önalp ve ark, 2006).

Farklı araştırmacılar tarafından Tablo 4.1'de gösterilen  $I_c$  formülleri incelendiğinde bazı araştırmacıların CPTU deneyinde ölçülen boşluk suyu basıncını ( $u_2$ ) dolaylı olarak formüle dâhil etse de bazı araştırmacıların boşluk suyu basınçlarını tamamen göz ardı etmesi göze çarpmaktadır. Sınıflaşma analizlerinde yaygın olarak, boşluk suyu basınçlarının göz ardı edildiği, Robertson ve Wride (1998)'in önerdiği formülasyon kullanılmaktadır. Aynı araştırmacının 2010'da önerdiği yöntemde de boşluk suyu basınçları hesaba dâhil edilmemektedir (Robertson, 2010). Bunun sebebi CPT'nin tarihsel gelişimi ve araştırmacıların elinde bulunan veri tabanlarının niteliği ile açıklanabilir. Başlangıçta sadece uç direncini ölçen koniye 1950' li yılların başında sürtünme gömleği eklenerek sürtünme direnci ölçülmeye başlanmış Begemann (1953) ve ancak 1980'li yılların başında da boşluk suyu basıncı ölçen transdüserler eklenmiştir (Baligh ve ark, 1981; Tümay ve ark, 1981). Günümüzde de boşluk suyu basıncı

ölçümü yapılmayan arazi koni penetrasyon deneyleri pratik ve ekonomik olmasından dolayı tercih edilebilmektedir. Boşluk suyu basınçlarının hesaba dâhil edilmesi genellikle  $Q$  parametresinin boşluk suyu basınçlarının bir göstergesi olan  $(1-Bq)$  değeri ile çarpılması olmuştur. Jefferies ve Davies (1993) ile Been ve Jefferies (1992)  $Q$ ' nun  $Bq$  ile kullanımı sayesinde özellikle ince daneli zeminleri (silt-kil) birbirinden ayırmada üstünlük sağladığını belirtmişlerdir.

#### **4.4. Kil ve Silt Zeminlerin Zemin Davranış İndeksi $I_c$ ile Belirlenmesi**

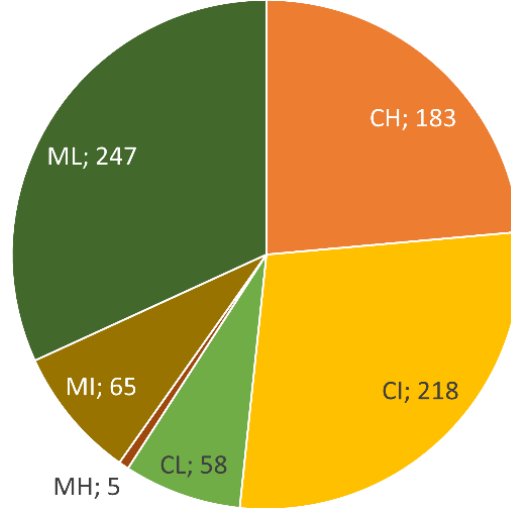
Kil ve silt zeminlerin sınırlarının  $I_c$  ile belirlenmesine yönelik 1999 Adapazarı depreminin ardından yapılan saha çalışmalarından elde edilen geniş bir veri tabanı kullanılmıştır. CPTU verileri Sakarya üniversitesine ait 200 kN kapasiteli akustik alıcılı CPTU makinesiyle yapılan deneylerden elde edilmiştir. Veri tabanında Önalp ve ark, (2007), Bol ve ark, (2010) çalışmalarındaki CPT deneyleriyle eş zamanlı olarak yapılan sondajlardan elde örselenmiş ve örselenmemiş numunelerle yapılan fiziksel özellik deney sonuçları da bulunmaktadır. Böylece CPTU verisiyle birlikte geleneksel sınıflandırma yöntemlerinde kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri verileri bir araya getirilmiş, bu verileri karşılaştırma ve analiz etme imkanı doğmuştur. Bunlara ek olarak Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) araştırmacıları tarafından 1999 depremi sonrası Adapazarı zeminlerinde yaptıkları çalışmadan ortaya çıkan bazı verilerde kullanılmıştır (Bray ve ark, 2001).

Bu çalışmada, 1999 yılında meydana gelen yıkıcı depremin yeri olan Adapazarı'ndan (Türkiye) elde edilen zengin veri tabanı kullanılarak yapılmıştır. Veri tabanında bulunan laboratuvar indeks özellikleri belirlenmiş bulunan seviyelerde ölçülen arazi koni penetrasyon değerleri analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu aşamada 776 veri kullanılmıştır. Tablo 4.4'te veri tabanının bir kısmı örnek olarak gösterilmektedir. Söz konusu her bir verinin likit limit, plastik limit, kil yüzdesi, su muhtevası, ince dane oranı ve ortalama dane çapı gibi bilgileri bulunmaktadır. Bunu takiben laboratuvar araştırmalarında ilk adım olan; iki veya dört harfli semboller kullanarak incelenen seviyelerin sınıflandırılmasıdır. Bu amaçla İngiliz standardının değiştirilmiş bir versiyonu olan ASTM D 2487-93 (1994), BS 5930 (1981) ve TS1500 (2000) kullanılmaktadır. Bu çalışmada numunelerin sınıflandırılması, USCS'nin bir uzantısı olan TS1500'e (2000) göre yapılmıştır, söz konusu sistemin USCS' den tek farkı, plastisite tablosunun, BS plastisite tablosunda önerildiği gibi 35 ila 50 likit limitler için

bir ara bölge (Intermediate Plasticity-I) içermesidir. Kullanılan 776 numunenin TS1500 (2000) sınıflarının dağılımı Şekil 4.17’de gösterildiği gibidir.

**Tablo 4.4.** Örnek veri tabanı içeriği.

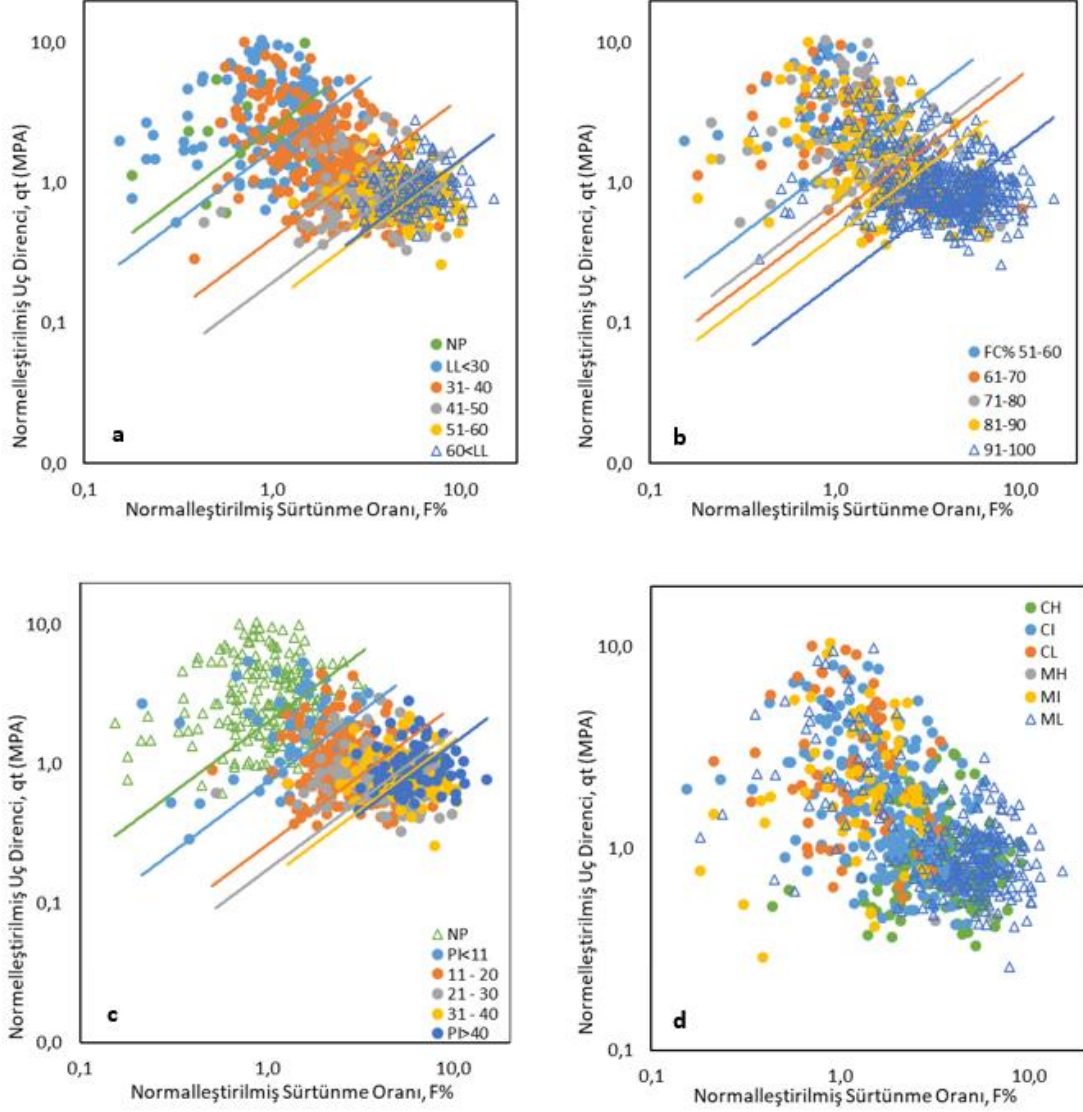
ID	Sondaj No	z (m)	wL (%)	wP (%)	wn (%)	FC (%)	Kil (%)	D50 (mm)	SINIF TS1500	qc (MPa)	fs (MPa)	u2 (MPa)
755	SIS570	4,4	36	28	35	98	14		MI	1,959	0,030	-0,286
24	STYG02	5,17	30	18	29	90	20	0,028	CL	1,633	0,020	-0,086
30	STYG03	3,03	44	23	40	100	23	0,008	CI	0,735	0,011	-0,082
25	STYG02	5,91	28		28	53	5	0,073	ML	9,300	0,078	-0,082
39	STYG03	7,28	35	20	36	86	17	0,018	CL	1,355	0,035	-0,082
31	STYG03	3,39	49	22	45	99	32	0,003	CI	0,684	0,022	-0,082
22	STYG02	4,7	31		27	66	6	0,065	ML	1,727	0,044	-0,082
38	STYG03	6,55	31	26	33	94	13	0,025	ML	3,338	0,053	-0,082
43	STYG04	2,58	29	23	37	79	13	0,034	ML	2,747	0,006	-0,082
28	STYG03	2,47	19		21	63	8	0,054	ML	2,712	0,037	-0,081
23	STYG02	4,84	28	23	32	76	4	0,048	ML	5,381	0,082	-0,081
1040	SHAST1	12,12	56	27	40	98	35		CH	2,124	0,064	-0,081
29	STYG03	2,72	21		20	54	7	0,062	ML	5,352	0,022	-0,080
36	STYG03	5,67	28	16	26	64	13	0,042	CL	4,472	0,085	-0,080
33	STYG03	4,66	23	20	31	66	11	0,044	ML	4,349	0,029	-0,079
958	SOZ630	7,64	24		31	72	20	0,030	ML	4,732	0,090	-0,079
32	STYG03	3,73	38	18	38	97	29	0,006	CI	0,707	0,014	-0,079
766	SSM233	5,12	33		30	91	22	0,020	ML	3,246	0,046	-0,078
832	SSM679	5,36	33		30	91	25	0,020	ML	4,431	0,034	-0,078
40	STYG03	8,22	47	21	46	98	48	0,002	CI	1,037	0,033	-0,077
6	STYG01	5,76			17	51	1	0,072	ML	5,240	0,044	-0,077
34	STYG03	5,17	41	21	38	95	24	0,009	CI	0,785	0,020	-0,076
50	STYG04	6,15	36	23	41	95	14	0,020	CI	1,040	0,017	-0,075
59	STYG05	3,59	36	17	37	89	22	0,016	CI	0,830	0,012	-0,075
610	SSM599	9,42	72	27	39	99	54		CH	1,049	0,080	-0,075
7	STYG01	6,12	35	22	32	98	10	0,017	CI	1,640	0,051	-0,074
49	STYG04	5,41	22		32	53	9	0,061	ML	3,958	0,025	-0,074
624	SYG100	2,79	28		33	53	13	0,070	ML	1,995	0,011	-0,074
44	STYG04	2,9	32	18	37	93	18	0,020	CL	0,940	0,004	-0,074
62	STYG05	4,85	29	22	31	85	11	0,040	CL	1,193	0,014	-0,073
61	STYG05	4,59	25		27	61	8	0,062	ML	4,671	0,016	-0,075



**Şekil 4.17.** Kullanılan zeminlerin TS1500 (2000) sınıflarının dağılım grafiği.

Veri tabanındaki zeminlerin fiziksel özelliklerinin normalleştirilmiş uç direnci  $q_t$  ve sürtünme oranı  $F$  eksenlerinde dağılımları Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu dağılımlar incelendiğinde zeminlerin likit limit değerlerinin 30 ila 50 arasında yoğunlaştığı, artan likit limit değerleriyle uç dirençlerinde düşüş sürtünme oranlarında ise artış olduğu söylenebilir. Benzer şekilde zeminlerin ince dane oranları %60 ila %80 arasında değişmekte; ince dane oranı arttıkça uç dirençleri azalır sürtünme oranı artmaktadır. Plastisite indisi dağılımlarına bakıldığında non-plastik zeminlerin daha yüksek uç direnci ile daha yüksek sürtünme oranlarına sahip olduğu görülürken artan plastisite indisleriyle uç dirençlerinin düştüğü sürtünme oranlarının arttığı görülmektedir.

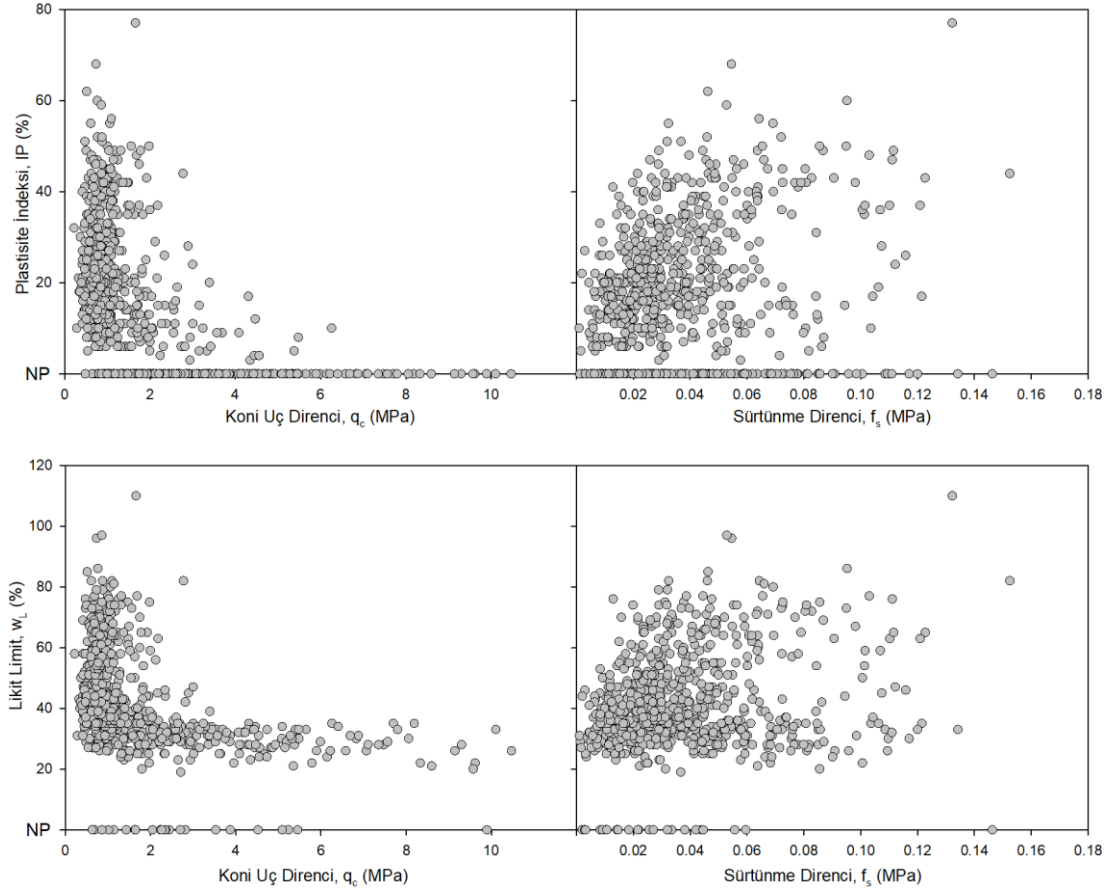
Arazi koni penetrasyon deneyi ile ölçülen uç direnci, sürtünme direnci ve boşluk suyu basıncı gibi değerler ile bu değerlerden üretilmiş normalize uç direnci, normalize sürtünme oranı ve zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) gibi değerler veri tabanında bulunmaktadır. Veriler, 200 kN’lik bir akustik CPTU makinesi kullanılarak toplanmıştır. Veriler son araştırma projelerinde [TUB.-104M387 (Önalp ve ark, 2007); TUB.-106M042 (Önalp ve ark, 2010)] koni değerlerinin “geleneksel” verilerle ilişkilendirilebilmesi için CPT sondajları ile eş zamanlı olarak açılan sondaj kuyularından alınan örselenmiş ve örselenmemiş örneklerle birlikte verilmiştir.



**Şekil 4.18.** a) Veri tabanında likit limit dağılımı b) Veri tabanında FC, ince dane dağılımı c) Veri tabanında plastisite indisi dağılımı d) Veri tabanında zemin sınıfları dağılımı.

Veri tabanında bulunan zeminlerin fiziksel özellikleriyle CPT deneyinde ölçülen uç direnci, sürtünme direnci ve boşluk suyu basıncı değerleri karşılaştırılmış ve Şekil 4.19 ile 4.22’de verilmiştir. Zeminlerin koni uç dirençleri minimum 0.218 MPa ile maksimum 10.468 MPa arasında değişirken sürtünme dirençleri minimum 0.001 MPa ile maksimum 0.153 MPa arasında değişmektedir. Buna göre zeminlerin artan likit limit değerleriyle koni uç dirençlerinin düştüğü, sürtünme dirençlerinin ise kısmen arttığı görülmektedir.

Plastisite indisi dağılımlarında da likit limit dağılımlarıyla benzer şekilde; artan plastisite değerleriyle koni uç dirençlerinin düştüğü, sürtünme dirençlerinin ise kısmen arttığı görülmektedir.

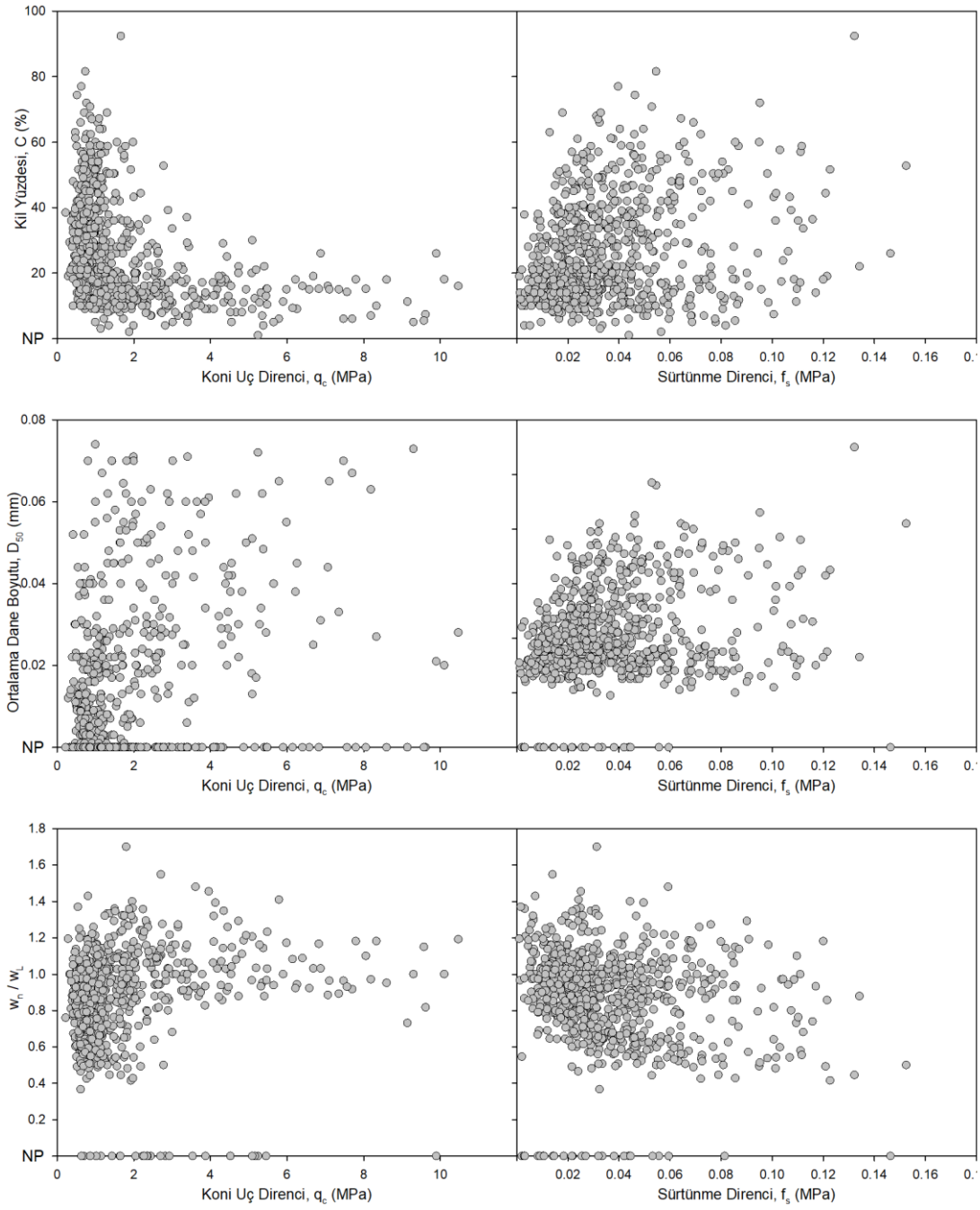


**Şekil 4.19.** Veri tabanında bulunan zeminlerin likit limit ve plastisite indisinin CPT deneyinde ölçülen değerler ile karşılaştırılması.

Kil yüzdesi ile koni uç direnci ve sürtünme direnci dağılımlarında da artan kil yüzdesi değerleriyle koni uç dirençlerin düştüğü, sürtünme dirençlerinin ise kısmen arttığı görülmektedir.

Ortalama dane boyutu dağılımında koni uç dirençleriyle anlamlı bir doğrusal ilişki görülmemekle birlikte sürtünme direncinin artan ortalama dane boyutu değerleriyle arttığı görülmektedir.

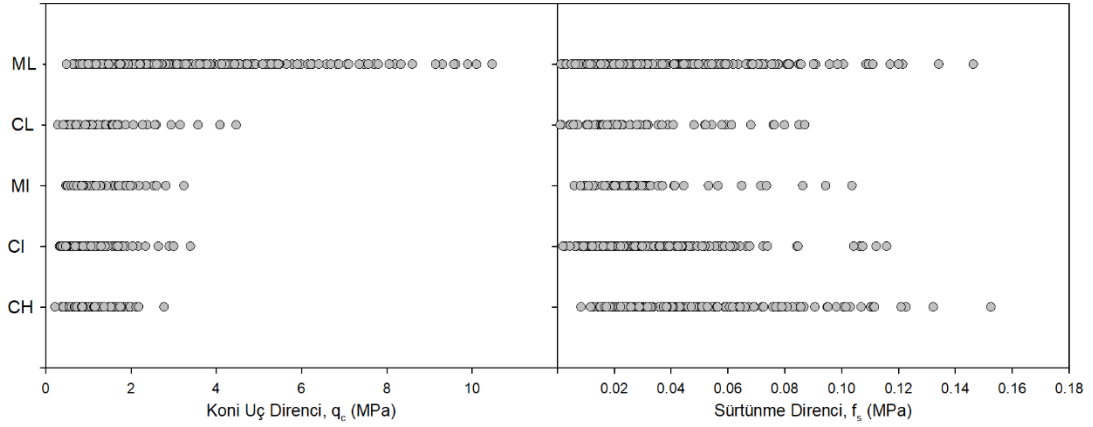
Doğal su muhtevası ile likit limit oranı  $w_n/w_L$  dağılımını incelendiğinde artan  $w_n/w_L$  değerleriyle koni uç dirençlerinin de arttığı, sürtünme dirençlerinin ise kısmen düştüğü görülmektedir.



**Şekil 4.20.** Veri tabanında bulunan zeminlerin kil yüzdesi,  $D_{50}$  ve  $w_p/w_L$  değerlerinin CPT’de ölçülen değerler ile karşılaştırılması.

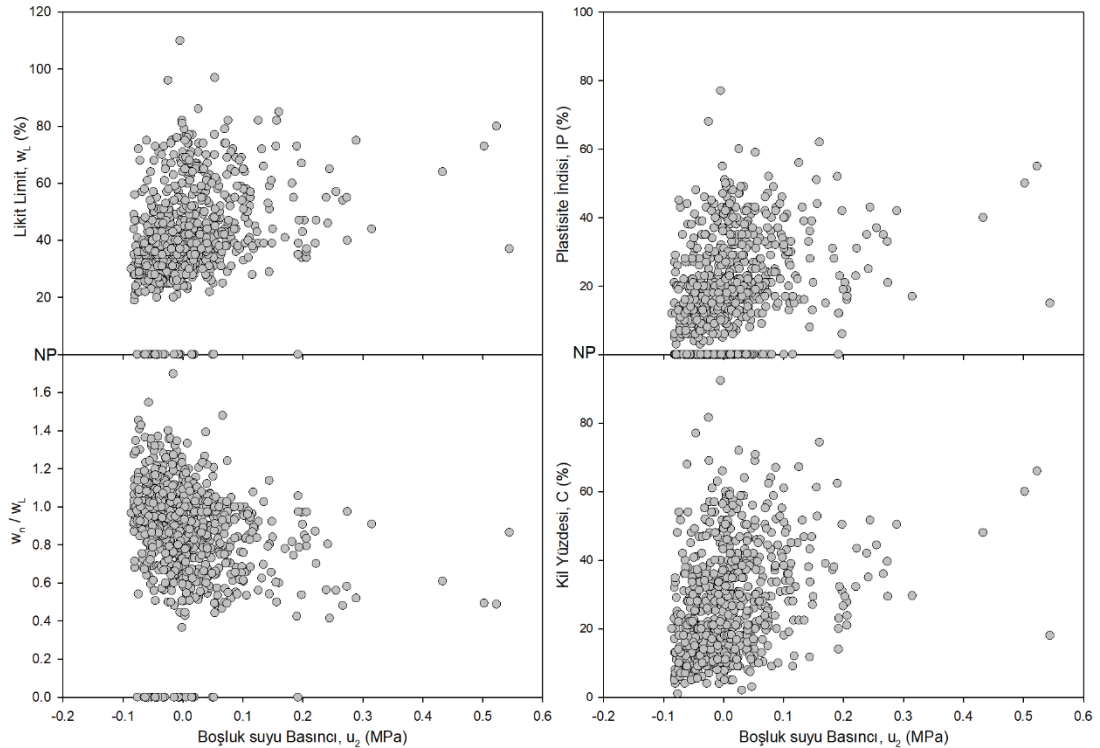
Zemin sınıfları ile koni uç direnci dağılımları incelendiğinde siltli zeminlerin killi zeminlerden, düşük plastisiteli zeminlerin de yüksek plastisiteli zeminlerden daha yüksek uç dirençlerine sahip olduğu; sürtünme direnci dağılımlarında ise yüksek plastisiteli killi zeminlerin daha yüksek sürtünme direnci gösterdiği söylenebilir.





**Şekil 4.21.** Veri tabanında bulunan zeminlerin zemin sınıflarının CPT’de ölçülen değerler ile karşılaştırılması.

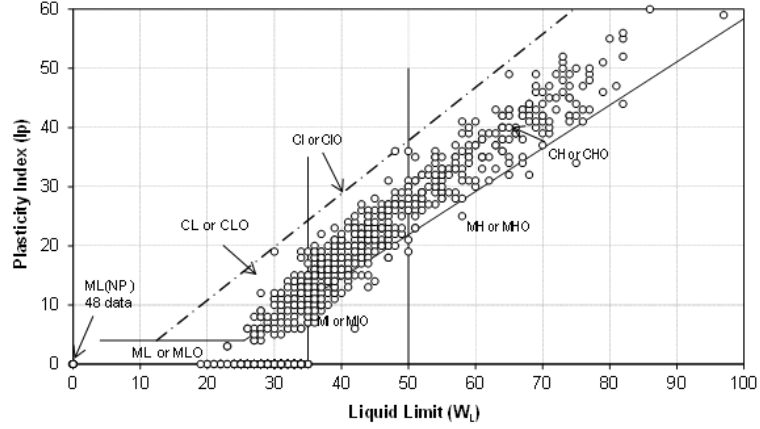
Zeminlerin fiziksel özellikleriyle boşluk suyu basıncı dağılımları incelendiğinde artan likit limit, plastisite indisi ve kil yüzdesi değerleriyle boşluk suyu basıncı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Doğal su muhtevası ile likit limit oranı  $w_n/w_L$  dağılımı incelendiğinde ise artan  $w_n/w_L$  değerleriyle boşluk suyu basıncı değerlerinin kısmen düştüğü görülmektedir.



**Şekil 4.22.** Veri tabanında bulunan zeminlerin fiziksel özelliklerinin CPT deneyinde ölçülen değerler ile karşılaştırılması.

Robertson (1998) ve diğer araştırmacılar tarafından hazırlanan CPT zemin sınıflandırma çizelgeleri, zemini sembollerle değil, yalnızca belirli terimleri

kullanarak sınıflandırır. 135 sondaj kuyusundan toplam 776 numune sınıflandırılmış ve bunlara karşılık gelen CPTU kimlikleri karşılaştırılmıştır. Tüm siteler Adapazarı alüvyal ovasında yer almaktadır. En üst 50 m büyük nehirlerin taşkın yataklarına özgü olan; nokta barı (point bar deposits) yatakları (kumlar-ince kumlar), art bataklıklar (killer-siltler), terk edilmiş kanal yatakları (kumlar ve çakıllar), setler (siltli kumlar) ve yarık yayılımları (siltler ve ince kumlar) gibi alt fasiyeslerden oluşur (Bol ve ark, 2010; Bol, 2012). Araştırma alanından alınan 53 numune üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deneyleri, bu makalede kullanılan zeminlerin hafif aşırı konsolide olduğunu göstermektedir ( $OCR_{avg} \approx 3$ ). Standart Penetrasyon Testi (SPT) Türk standardına göre genellikle bir sondaj kuyusunda 150 cm aralıklarla yapılır. Bu testte yaklaşık 30 cm uzunluğunda zemin numunesi alınır. Ayrıca, farklı derinliklerde UD numune alıcılarla yaklaşık 30–40 cm bozulmamış zemin numunesi alınabilir. Bu çalışma için kullanılan CPTU sondaları 2 cm aralıklarla veri sağladığından, tek bir SPT veya UD veri noktası için yaklaşık 15 veri noktası elde edilebilir. Bu aşamada sadece bir satır CPT okuması kullanmak yanlış olabilir çünkü SPT kaşığından alınan 30 cm uzunluğundaki zemin numunesi karıştırılarak daha sonra laboratuvarında sınıflandırma için test edilir. Bu nedenle, her veri aralığı için  $q_c$  ve  $f_s$  değerleri hesaplanmış ve  $I_c$  denkleminde kullanılmak üzere tek bir ortalama değer elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan verilerin çoğu sonda (Geotech CPT Classic Probe) içinde sayısallaştırılır ve daha sonra akustik olarak (delikten aşağı kablo olmadan) yüzeye ve arayüze aktarılır. Bu prosedür, testleri kablo problemleri kullanan testlerden daha hızlı hale getirir. Bu nedenle, sonda çubuklarının değiştirilmesi çok az zaman harcanır, dolayısıyla bu prosedür tüm test sonuçları için sürekli bir profil sağlar. Bazen, genellikle 1 m aralıklarla problemler değiştirirken prob üzerindeki yük kaldırıldığından okumalar daha düşük değerlere düşer. Ancak bu durum yalnızca bir satır hatalı okumalara neden olur. Bu nedenle yanlış veriler, bu çalışma için yapılan hesaplamalarda kullanılmadan önce düzeltilmiştir. Koni çevresinde oluşan aşırı boşluk basınçları yeterince kısa sürede dağılamadığı için, boşluk basıncı profilinin özellikle ince taneli zeminlerde diğerlerinden ( $q_c$  ve  $f_s$ ) daha az hatalı veri vermesi ilginçtir. Tespit edilen plastisite tablosundaki zeminlerin konumu Şekil 4.23'te gösterilmektedir. Buradan yüksek plastisiteli siltlere nadiren rastlandığı görülebilir.

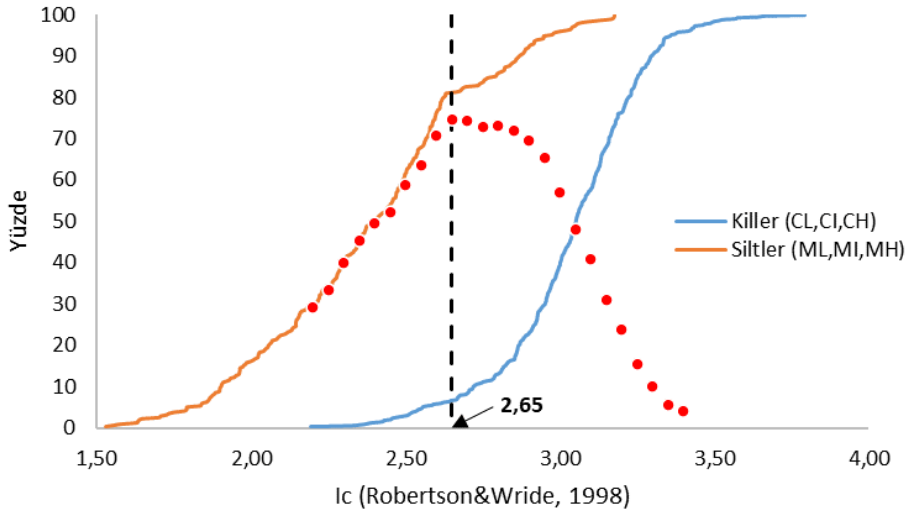


**Şekil 4.23.** Kullanılan verilerin TS1500(2000) plastisite kartındaki pozisyonları.

İnce daneli zeminlerin sınıflarını belirlemek için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen zemin davranış indeksi ( $I_c$ ) değerleri kullanılmaktadır fakat kil ve silt zeminler için belirli bir  $I_c$  değeriyle tam bir ayırım yapılamamaktadır. Seçilen her bir  $I_c$  değeri aralığında killer ve siltler bir arada bulunabilmektedir. Öyleyse kil ve siltlerin en iyi ayırımını yapan öyle bir  $I_c$  belirlensin ki bu değer altında maksimum seviyede siltler bulunurken minimum seviyede killer bulunsun.

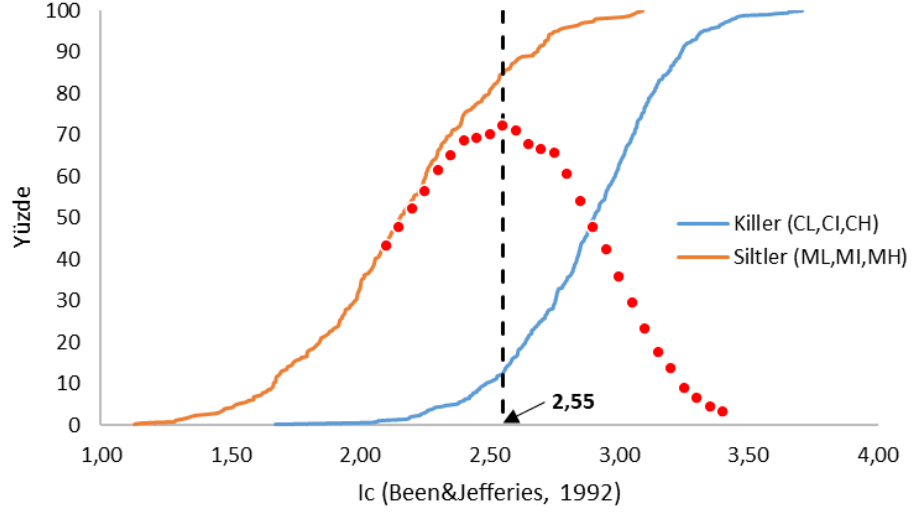
Veri tabanındaki zeminlerin  $I_c$  değerleri Robertson ve Wride (1998)'in önerdiği  $I_c$  formülüne göre hesaplanmış ve kil ve silt zeminlere karşılık gelen  $I_c$  değerleri Şekil 4.24'deki grafikte gösterilmiştir. Grafikte turuncu eğri siltleri, mavi eğri killeri göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere killer ve siltler bazı bölgelerde üst üste çakışmaktadır. Killeri ve siltleri ayıran bir  $I_c$  değeri belirlenmek istendiğinde bu değerde her iki zemin sınıfı da bulunmaktadır. Siltler en düşük 1.528 en yüksek 3.177; killeri ise en düşük 2.194 en yüksek 3.794  $I_c$  değerleri arasındadır. Siltlerin %100'ü 3.177 değerinin altındadır fakat bu değer altında %73 dolayında kil olarak sınıflandırılan zeminlerin olduğu görülmektedir. Killerin en düşük  $I_c$  değeri 2.194'tür ve killerin %100'ü bu değer üzerinde bulunmaktadır fakat bu değer üzerinde %70 dolayında siltlerde bulunmaktadır. Öyleyse öyle bir optimum  $I_c$  değeri seçilmeli ki kil ve siltler seçilen bu değerde birbirlerinden en yüksek doğruluk payıyla ayrılabilirsin. Bunu yapabilmek için minimum kil ve maksimum silt sınırları  $I_c$  2.2 ve 3.2 değerleri arasında analiz edildiğinde Şekil 4.24'teki sonuç ortaya çıkmaktadır. Buna göre  $I_c$  2.65 değeri sınır olarak kabul edilirse bu değer altında kalan siltlerin %81 doğrulukla belirlenebildiği bununla birlikte bu değer altında sadece %6.5 oranında killerin kaldığı görülmektedir. Bu iki oran arasındaki fark doğruluk payı olarak kabul edilmiş

ve farklı  $I_c$  değerlerine karşılık gelen doğruluk payı grafikte kırmızı noktalı eğriyle gösterilmiştir.  $I_c$  2.65 değerinin üzerinde kalan siltler incelendiğinde de büyük oranda sıvılaşma potansiyeli düşük olan MI ve MH sınıfında zeminler olduğu görülmektedir. Sonuç olarak sıvılaşma potansiyeli yüksek siltlerin Robertson (1998)'in önerdiği  $I_c$  formülüne göre 2.65 değerinin altında kalan zeminler olduğu söylenebilir.



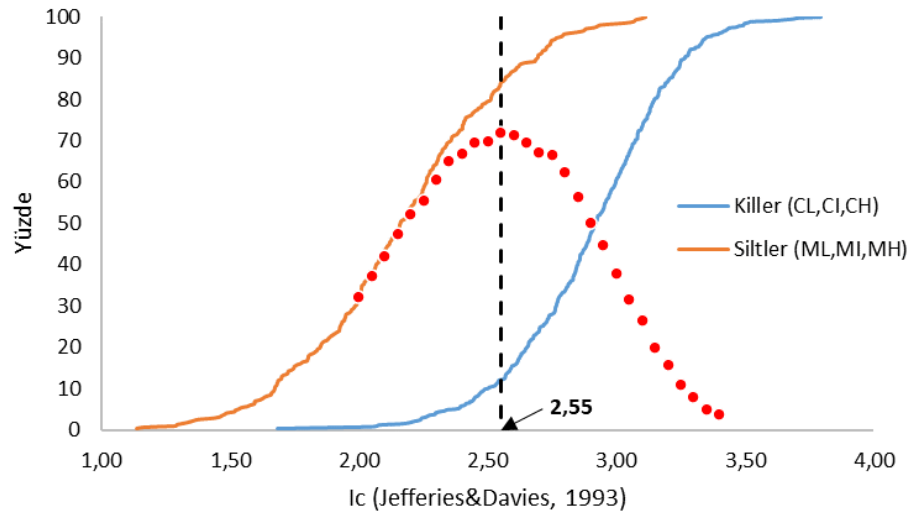
**Şekil 4.24.** Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Robertson ve Wride 1998) dağılımı.

Yukarıda bahsedilen değerlendirme yöntemi önerilen farklı  $I_c$  formülleri içinde yapılmıştır. Been ve Jefferies (1992) formülüne göre hesaplanan  $I_c$  değerlerine karşılık silt ve kil zeminler Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Buna göre siltler en düşük 1.130 en yüksek 3.091; killer ise en düşük 1.673 en yüksek 3.708  $I_c$  değerleri arasındadır.  $I_c$  2.55 değeri silt ve killeri ayıran değer olarak belirlendiğinde siltlerin %84,5'i bu değerinin altında kalırken killerin ise %12'si bu değerinin altında kalmaktadır.



**Şekil 4.25.** Kıl ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Been ve Jefferies 1992) dağılımı.

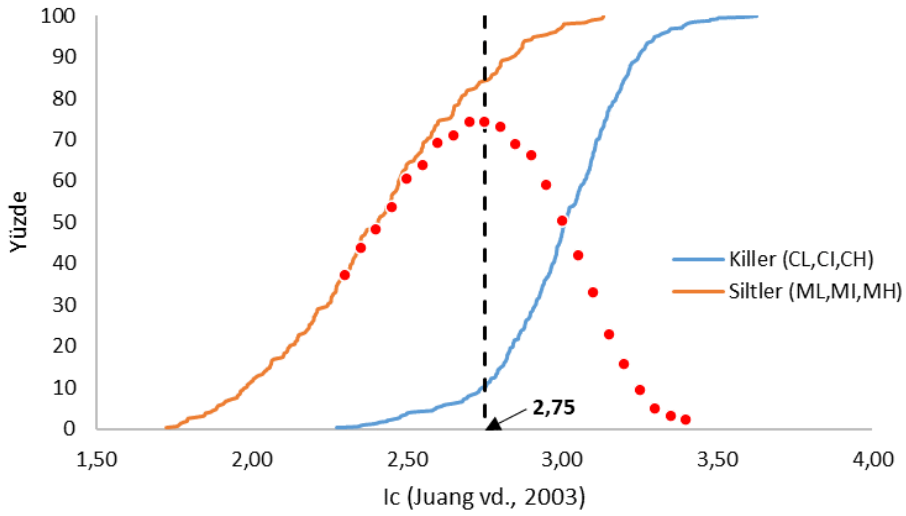
Jefferies ve Davies (1993) formülüne göre hesaplanan  $I_c$  değerlerine karşılık silt ve kıl zeminlerin dağılımı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Buna göre siltler en düşük 1.135 en yüksek 3.113; killer ise en düşük 1.684 en yüksek 3.796  $I_c$  değerleri arasındadır.  $I_c$  2.55 değeri silt ve killeri ayıran değer olarak belirlendiğinde siltlerin %83.9'u bu değer altında kalırken killerin ise %11.9'u bu değer altında kalmaktadır.



**Şekil 4.26.** Kıl ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Jefferies ve Davies 1993) dağılımı.

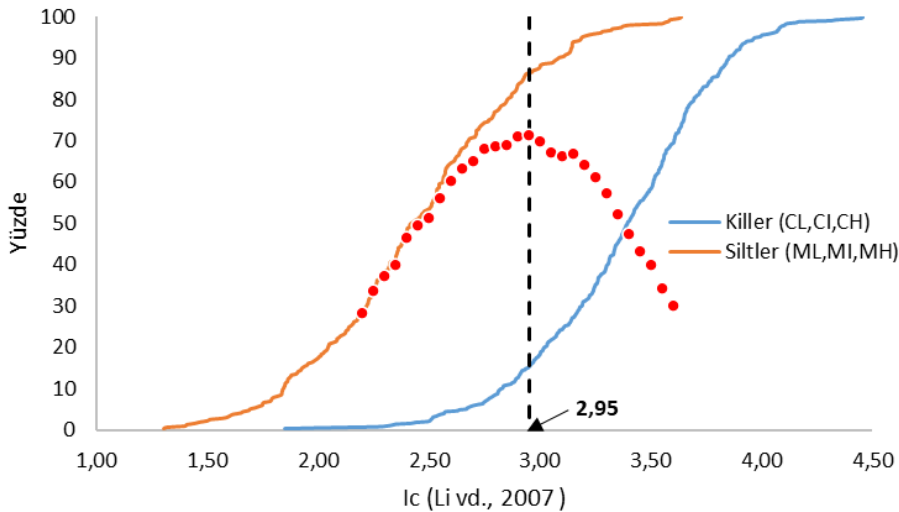
Juang ve ark, (2003) formülüne göre hesaplanan  $I_c$  değerlerine karşılık silt ve kıl zeminlerin dağılımı Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Buna göre siltler en düşük 1.726 en yüksek 3.133; killer ise en düşük 2.274 en yüksek 3.629  $I_c$  değerleri arasındadır.  $I_c$

2.75 değeri silt ve killeri ayıran değer olarak belirlendiğinde siltlerin %84.2'si bu değerin altında kalırken killerin ise %10'u bu değerin altında kalmaktadır.



**Şekil 4.27.** Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Juang ve ark, 2003) dağılımı.

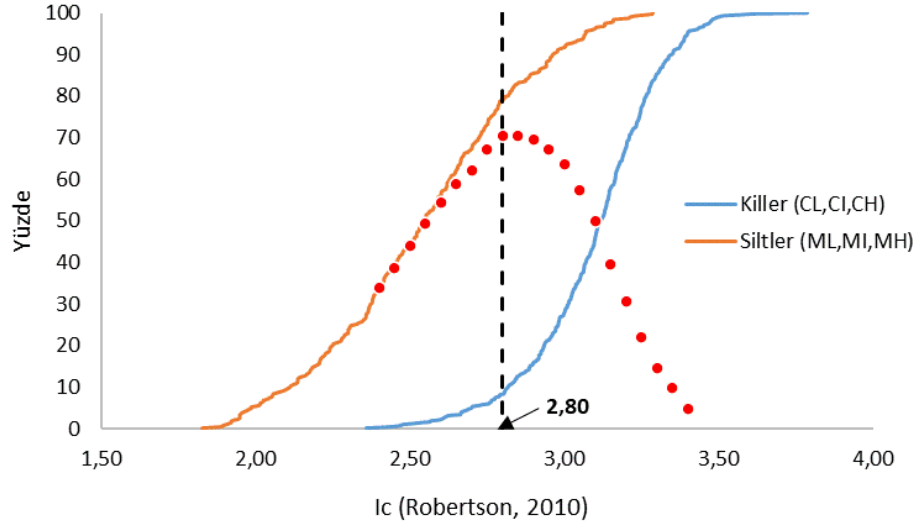
Li ve ark, (2007) formülüne göre hesaplanan  $I_c$  değerlerine karşılık silt ve kil zeminlerin dağılımı Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Buna göre siltler en düşük 1.305 en yüksek 3.637; killeri ise en düşük 1.852 en yüksek 4.456  $I_c$  değerleri arasındadır.  $I_c$  2.95 değeri silt ve killeri ayıran değer olarak belirlendiğinde siltlerin %86.4'ü bu değerin altında kalırken killerin ise %15'i bu değerin altında kalmaktadır.



**Şekil 4.28.** Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Li ve ark, 2007) dağılımı.

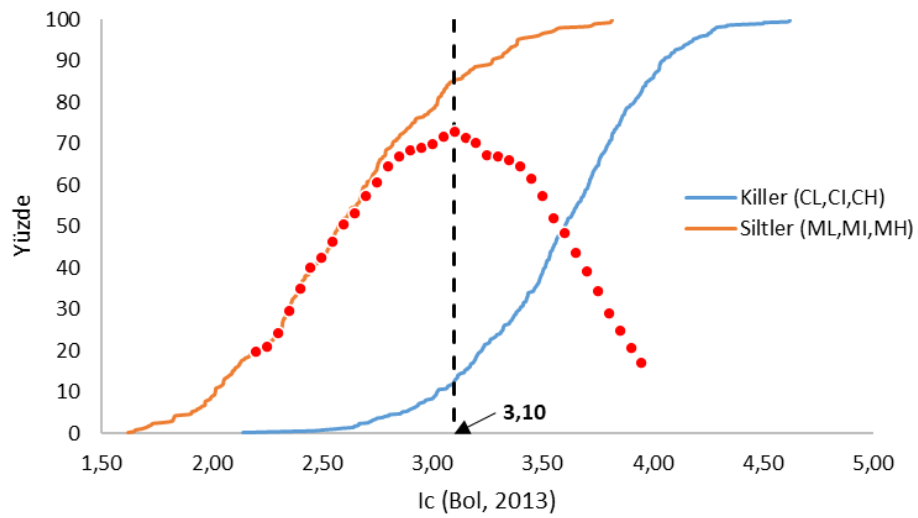
Robertson (2010) formülüne göre hesaplanan  $I_c$  değerlerine karşılık silt ve kil zeminlerin dağılımı Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Buna göre siltler en düşük 1.827 en

yüksek 3.285; killeri ise en düşük 2.358 en yüksek 3.787  $I_c$  değerleri arasındadır.  $I_c$  2.80 değeri silt ve killeri ayıran değer olarak belirlendiğinde siltlerin %78.7'si bu değer altında kalırken killerin ise %8.2'si bu değer altında kalmaktadır.



**Şekil 4.29.** Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Robertson, 2010) dağılımı.

Bol (2013) formülüne göre hesaplanan  $I_c$  değerlerine karşılık silt ve kil zeminlerin dağılımı Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Buna göre siltler en düşük 1.620 en yüksek 3.816; killeri ise en düşük 2.142 en yüksek 4.619  $I_c$  değerleri arasındadır.  $I_c$  3.10 değeri silt ve killeri ayıran değer olarak belirlendiğinde siltlerin %85.5'i bu değer altında kalırken killerin ise %12.6'sı bu değer altında kalmaktadır.



**Şekil 4.30.** Kil ve Siltlerin Zemin davranış indeksi  $I_c$  (Bol, 2013) dağılımı.

Özet olarak farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  formülleriyle kil ve siltlerin dağılımları incelendiğinde kil ve siltleri ayırmada en yüksek doğrulukla ayırabilecek  $I_c$  sınır değeri, kil ve siltlerin her bir  $I_c$  formülüne göre aldıkları minimum ve maksimum değerleri gösteren Tablo 4.5 aşağıda verilmiştir. Kil ve siltleri ayırmada belirlenen sınır  $I_c$  değerinin altında kalan oranların farkına göre sonuçlar incelendiğinde Robertson ve Wride (1998) formülünün  $I_c=2.65$  sınır değeriyle %74.5 fark oranı ile en iyi ayrımı yaptığı söylenebilir.

**Tablo 4.5.** Kil ve siltlerin minimum, maksimum ve sınır  $I_c$  değerleri.

Referans $I_c$ Formülü	Siltler		Killer		Sınır Değer	Sınır altında kalan		
	min	maks	min	maks		%silt	%kil	fark
Been ve Jefferies (1992)	1,130	3,091	1,673	3,708	2,55	84,5	12,0	72,5
Jefferies ve Davies (1993)	1,135	3,113	1,684	3,796	2,55	83,9	11,9	72,0
Robertson ve Wride (1998)	1,528	3,177	2,194	3,794	2,65	81,0	6,5	74,5
Juang ve ark, (2003)	1,726	3,133	2,274	3,629	2,75	84,2	10,0	74,2
Li ve ark, (2007)	1,305	3,637	1,852	4,456	2,95	86,4	15,0	71,4
Robertson (2010)	1,827	3,285	2,358	3,787	2,80	78,7	8,2	70,5
Bol (2013)	1,620	3,816	2,142	4,619	3,10	85,5	12,6	72,9

#### 4.5. Farklı Araştırmacılara Göre Sıvılaşma Değerlendirmesinin CPT Sonuçları ile Karşılaştırılması

Çalışmanın bu aşamasında fiziksel özellikleri bilinen ince daneli 776 numunenin farklı araştırmacılara göre sıvılaşma değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan bu değerlendirmelere göre her bir yöntemde göre sıvılaşan, sıvılaşmayan ve test bölgesine düşen veriler tespit edilmiştir. Daha sonra sıvılaşan ve sıvılaşmayan numuneler ait ortalama koni penetrasyon uç direnci, sürtünme direnci ve boşluk suyu basınçları ( $u_2$ ) tespit edilmiş ve bu ham verilerden zemin sınıflamasına yönelik olarak normalize edilmiş uç dirençleri ile sürtünme oranları tespit edilmiştir. Sıvılaşan ve sıvılaşmayanlar Robertson (1990)'un önerdiği Q-F uzayında farklı renler ile noktalanmışlardır. Bunlar belirlendikten sonra Robertson ve Wride (1998)'e göre zemin davranış indeksleri ( $I_c$ ) tespit edilmiştir. Sıvılaşan sıvılaşmayan ve test bölgesine düşen  $I_c$  değerlerinin normal dağılım grafikleri de ayrıca çizilmiştir.

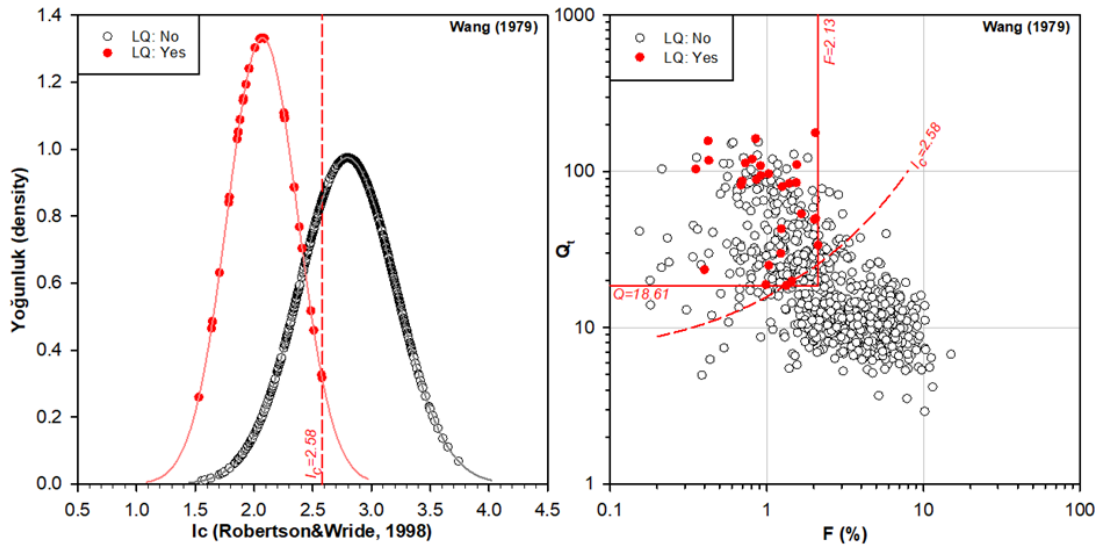
İlk değerlendirme Wang (1979)'a göre yapılmıştır. Wang'ın çalışmasında günümüzde hala yer yer kullanılan Çin kriterinin temelleri atılmıştır. Bu çalışmaya göre; Wang (1979), Haicheng-1975 ve Tangshan-1976 depremlerinde; kohezyonlu zeminlerin de



sıvılaştığını belirtmiş ve sıvılaştırılabilir kohezyonlu zeminlerin %20'den daha az kil (<0.005 mm) oranına sahip olduğunu, likit limitlerinin ( $w_L$ ) 21-35 arasında olduğunu, plastisite indislerinin (IP) 4-14 arasında olduğunu ve incelenen zeminin doğal koşullarda faz durumunun bir göstergesi olarak kabul edilen doğal su muhtevası/likit limit oranının ( $w_n/w_L$ ) %90'dan fazla olduğunu söylemiştir.

Seed ve ark, (2003) Çin Kriteri olarak da bilinen Wang (1979) ve Seed ve Idriss (1982) tarafından önerilen sıvılaşma değerlendirmesini grafik olarak göstermişlerdir (Şekil 2.3). Bu kritere göre ince daneli bir zeminin sıvılaşması için aşağıda sıralanan üç kriteri de yerine getirmesi gerekmektedir: a) Zemin içinde %15'ten daha az kil (<0.005 mm) oranı olmalı, b) Likit limiti ( $w_L$ ) %35'ten az olmalı ve c)  $90 \times w_L$ ' den daha yüksek su içeriğine ( $w_n$ ) sahip olmalıdır. Araştırmacılar bu özellikleri taşıyan zeminler, eğer plastisite çizelgesinde A çizgisinin üzerinde çizilirse, tekrarlı yükleme özelliklerini belirlemenin en iyi yolunun test olduğunu belirtmişlerdir. Wang (1979) ile Seed ve ark, (2003)'ün çalışması benzer sonuçlar vermiş olduğundan burada sadece Wang (1979)'un sonuçları gösterilmiştir.

Şekil 4.31'de Wang (1979)'a göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Söz konusu şeklin ilk grafiğinde Wang (1979)'a göre sıvılaşan (kırmızı) ve sıvılaşmayan (siyah) verilerin zemin davranış indekslerinin normal dağılım eğrileri çizilmiş ve bu eğriler üzerinde veri noktaları da işaretlenmiştir. Sıvılaşmayan zeminlerin ortalaması ( $\mu$ ) 2.796 ve standart sapması ( $\sigma$ ) 0.409, sıvılaşan zeminlerin ortalaması ise ( $\mu$ ) 2.072 ve standart sapması ( $\sigma$ ) 0.299 olarak tespit edilmiştir. Burada zemin davranış indeksinin 2.58' den büyük değerlerinde ( $I_c > 2.58$ ) sıvılaştırılabilir zeminlerin hiçbir şekilde noktalanmadığı izlenebilir. Şeklin ikinci kısmında ise yine Robertson (1990) CPT zemin sınıflandırılması kartında Wang (1979)'a göre sıvılaşan (kırmızı) ve sıvılaşmayan (siyah) verilerin dağılımları verilmiştir. Robertson (1990) grafiğinde sıvılaşan zeminler ile sıvılaşmayan zeminleri birbirinden ayıran zemin davranış indeksi (burada  $I_c = 2.58$ ) eğrisi de ayrıca gösterilmektedir. Bununla birlikte normalize uç direncinin ( $Q_t$ ) 18.61' den küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ( $F$ ) 2.13'ten büyük olduğu durumlarda Wang (1979)'a göre hiçbir zeminin sıvılaşmayacağı anlaşılmaktadır.



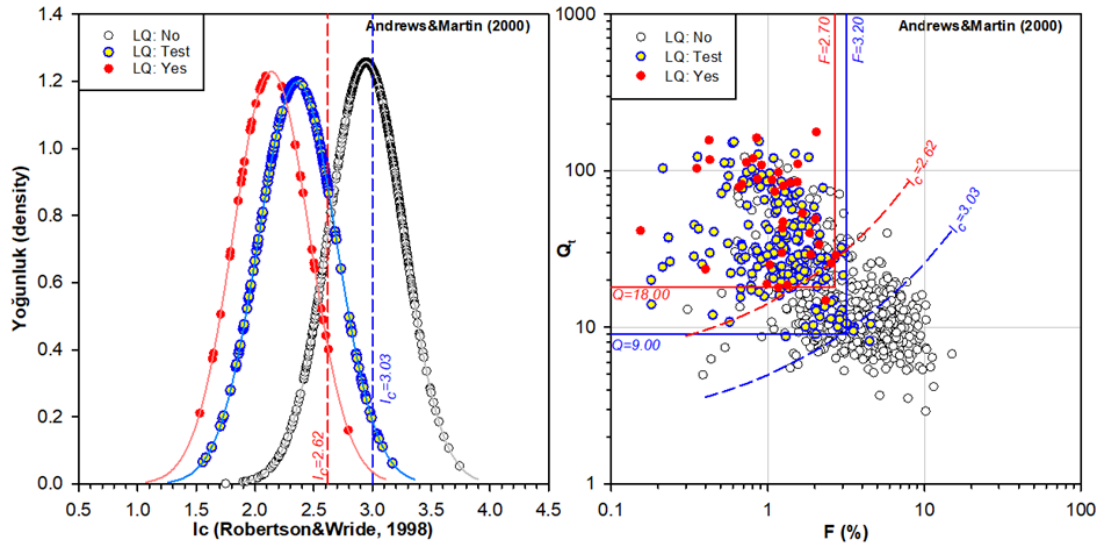
**Şekil 4.31.** Wang (1979)'a göre yapılan sınıflama değerlendirilmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.

Andrews ve Martin (2000) siltli doğal zeminler ve dolgularda sınıflamanın oluşabileceğini belirtmiş, bu değerlendirmede siltin kil içeriği ( $<2\mu\text{m}$ ) ile likit limitinin sınıflama olayında “anahtar” parametreler olarak nitelendirilebileceğini bildirmişlerdir. Sınıflanabilir zeminler için verilen limitler  $w_L < 32$  ve  $\%C < 10$  dur (Şekil 2.5). Bu çalışma sonucuna göre  $\%C < 10$  ve  $w_L \geq 32$  arasında olduğu bölge ile  $\%C \geq 10$  ve  $w_L < 32$  arasında olduğu bölgelere düşen zeminlerin ileri çalışmalar (test bölgesi) ile sınıflamaya karşı duyarlılıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Söz konusu iki gri bölgenin oldukça büyük bir alanı kapsadığını söylemek yanlış olmayacaktır.

Şekil 4.32’de Andrews ve Martin (2000)’e göre yapılan sınıflama değerlendirilmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Söz konusu şeklin ilk grafiğinde Andrews ve Martin (2000)’e göre sınıflanan (kırmızı), sınıflanmayan (siyah) ve test bölgesine düşen (mavi) verilerin zemin davranış indekslerinin normal dağılım eğrileri çizilmiş ve bu eğriler üzerinde veri noktaları da işaretlenmiştir. Sınıflanmayan zeminlerin ortalaması ( $\mu$ ) 2.994 ve standart sapması ( $\sigma$ ) 0.317, sınıflanan zeminlerin ortalaması ( $\mu$ ) 2.139 ve standart sapması ( $\sigma$ ) 0.324 ve test bölgesine düşen zeminlerin ise ortalaması ( $\mu$ ) 2.360 ve standart sapması ( $\sigma$ ) 0.333 olarak tespit edilmiştir.

Burada zemin davranış indeksinin 3.03’ den büyük değerlerinde ( $I_c > 3.03$ ) sınıflanabilir zeminlerin hiçbir şekilde noktalanmadığı, sınıflanabilir zeminlerin ise  $I_c = 2.62$  değerinin altında noktalandığı izlenebilir. Şeklin ikinci kısmında ise yine Robertson (1990) CPT zemin sınıflandırılması kartında Andrews ve Martin (2000)’e göre sınıflanan (kırmızı),

sıvılaşmayan (siyah) ve test bölgesine düşen (mavi) verilerin dağılımları verilmiştir. Robertson (1990) grafiğinde sıvılaşabilir ve test bölgesine düşen zeminleri sıvılaşmayan zeminlerden ayıran zemin davranış indeksi (burada  $I_c=3.03$ ) eğrisi de ayrıca gösterilmektedir. Bununla birlikte normalize uç direncinin ( $Q_t$ ) 9.00' dan küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ( $F$ ) 3.20 den büyük olduğu durumlarda Andrews ve Martin (2000)'e göre hiçbir zeminin sıvılaşmayacağı anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.32.** Andrews ve Martin (2000)'e göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.

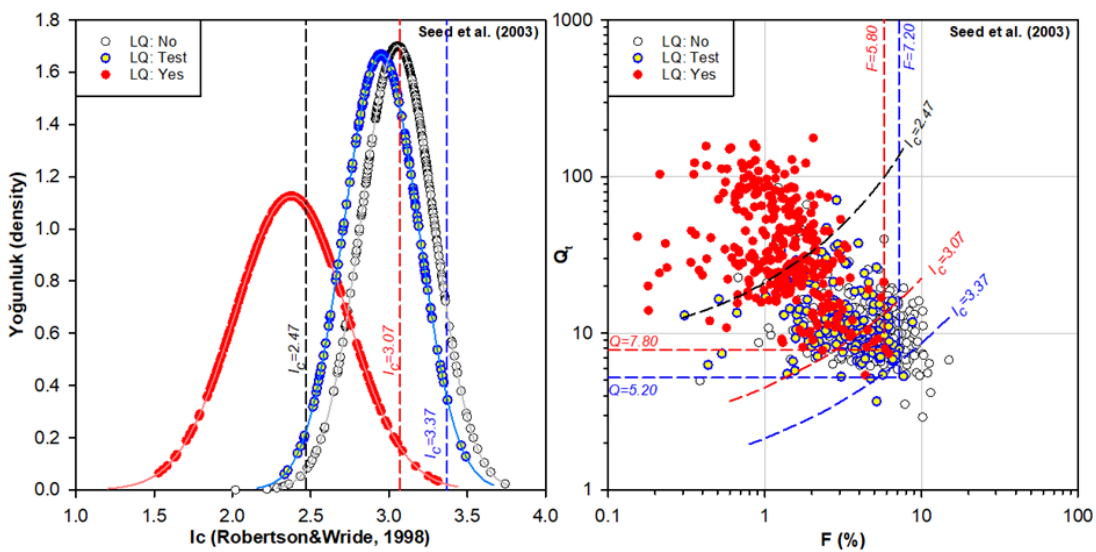
Bununla birlikte Seed ve ark, (2003) tarafından ayrıca bir değerlendirme grafiği önerilmiştir (Şekil 2.4). Değerlendirme USCS plastisite kartı üzerinden yapılmaktadır. Bu grafikte A bölgesi ile temsil edilen bölgeye göre incelenen zeminin sıvılaşma gösterebilmesi için plastisite indisinin 12'den ve likit limitinin de 37'den küçük olması gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte sıvılaşma için diğer bir kriterin de doğal su muhtevasının likit limitin %80'inden daha fazla olması gerekmektedir. Ancak burada likit limitin 37 ile 47 ve plastisite indisinin de 12 ile 20 arasında olduğu geniş bir gri bölgeye (test) düşen zeminlerin ileri yöntemlerle sıvılaşma potansiyeli taşıyıp taşımadığının belirlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.33'te Seed ve ark, (2003)'e göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Söz konusu şeklin ilk grafiğinde Seed ve ark, (2003)'e göre sıvılaşan (kırmızı), sıvılaşmayan (siyah) ve test bölgesine düşen (mavi) verilerin zemin davranış indekslerinin normal dağılım eğrileri çizilmiş ve bu eğriler üzerinde veri noktaları da işaretlenmiştir. Sıvılaşmayan zeminlerin ortalaması

( $\sigma$ ) 3.054 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.235, sıvılaşılan zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.375 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.354 ve test bölgesine düşen zeminlerin ise ortalaması ( $\sigma$ ) 2.949 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.239 olarak tespit edilmiştir.

Burada zemin davranış indeksinin 3.37'den büyük değerlerinde ( $I_c > 3.37$ ) sıvılaşılabılır zeminlerin hiçbir şekilde noktalanmadığı, sıvılaşılabılır zeminlerin ise  $I_c = 2.47$  değerinin altında noktalandığı izlenebilir. Şeklin ikinci kısmında ise yine Robertson (1990) CPT zemin sınıflandırılması kartında Seed ve ark, (2003)'e göre sıvılaşılan (kırmızı), sıvılaşımayan (siyah) ve test bölgesine düşen (mavi) verilerin dağılımları verilmiştir. Robertson (1990) grafiğinde sıvılaşılabılır ve test bölgesine düşen zeminleri sıvılaşımayan zeminlerden ayıran zemin davranış indeksi (burada  $I_c = 3.37$ ) eğrisi de ayrıca gösterilmektedir. Bununla birlikte normalize uç direncinin ( $Q_t$ ) 5.20'den küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ( $F$ ) 7.20'den büyük olduğu durumlarda Seed ve ark, (2003)'e göre hiçbir zeminin sıvılaşımayacağı anlaşılmaktadır.

Tüm bunların yanında Seed ve ark, (2003)'e göre yapılan değerlendirmede hem normal dağılım hem de sınıflama kartından görüleceği üzere sıvılaşımayan ve test bölgesine düşen zeminlerin dağılımları büyük oranda üst üste binmektedir. Bu durum söz konusu sıvılaşıma kriterinde test bölgesine düşen zeminlerin hem likit limit hem de plastisite indisi bakımından geniş bir aralığa sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Seed ve ark, (2003)'ün önerdiği sıvılaşıma kriterine sıvılaşılabılır zeminlerin çoğu (%95)  $I_c$ 'nin 2.47'den küçük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır.



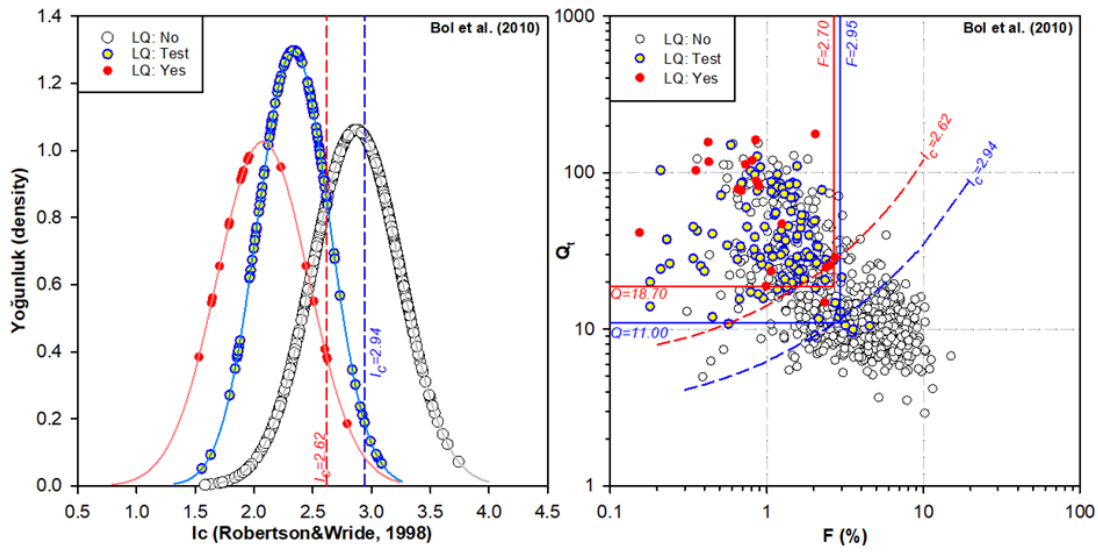
**Şekil 4.33.** Seed ve ark, (2003)'e göre yapılan sıvılaşıma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.

Bol ve ark, (2010) siltli zeminlerin 1999 depreminde performansını yansıtan bilgilerin ışığı altında Adapazarı Kriterini geliştirmişlerdir. Buna göre  $M_w=7$  büyüklüğündeki bir depremde, ince daneli bir zeminin sıvılaşabilmesi için likit limitin %35'ten küçük olması, kil içeriğinin ( $<0.002$  mm) %10'dan küçük olması, ortalama dane boyutunun ( $D_{50}$ ) 0.06 mm'den büyük olması ve sıvılık indisinin (IP ölçülemiyorsa  $w_n/w_L$  oranının) 0.9'dan büyük olması koşullarının tümünün sağlanması gerekmektedir. Adapazarı kriterlerinde diğer araştırmacılar farklı olarak ince daneli zeminin ortalama dane boyutu ( $D_{50}$ ) da bir kriter olarak gösterilmiştir. Bu kriterde kil oranının  $10<\%C<15$  veya ortalama dane boyutunun  $0.002<D_{50}<0.06$  aralıklarında numunelerin dinamik deneylerle yargılanması gerektiğini öne süren gri (test) bölge bulunmaktadır (Şekil 2.8). Su muhtevasının ve plastisite indisinin sıvılaşabilirliğe etkisinin sıvılık indisi (IL) ile ilişkisinin göz önüne alınması da önemli bir yaklaşım olabilir. Zira IL'nin tanımında doğal su muhtevası ( $w_n$ ), plastisite indisi (IP) ile birlikte göz önüne alınmaktadır. Ancak plastik olmayan (non plastik-NP) siltlerde sıvılık indisi hesaplamasının mümkün olmaması söz konusu parametreye temkinli yaklaşılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Şekil 4.34'te Bol ve ark, (2010)'a göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Söz konusu şeklin ilk grafiğinde Bol ve ark, (2010)'a göre sıvılaşan (kırmızı), sıvılaşmayan (siyah) ve test bölgesine düşen (mavi) verilerin zemin davranış indekslerinin normal dağılım eğrileri çizilmiş ve bu eğriler üzerinde veri noktaları da işaretlenmiştir. Sıvılaşmayan zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.870 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.376, sıvılaşan zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.075 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.389 ve test bölgesine düşen zeminlerin ise ortalaması ( $\sigma$ ) 2.337 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.307 olarak tespit edilmiştir.

Burada zemin davranış indeksinin 2.94'ten büyük değerlerinde ( $I_c>2.94$ ) sıvılaşabilir zeminlerin hiçbir şekilde noktalanmadığı, sıvılaşabilir zeminlerin ise  $I_c=2.62$  değerinin altında noktalandığı izlenebilir. Şeklin ikinci kısmında ise yine Robertson (1990) CPT zemin sınıflandırılması kartında Bol ve ark, (2010)'a göre sıvılaşan (kırmızı), sıvılaşmayan (siyah) ve test bölgesine düşen (mavi) verilerin dağılımları verilmiştir. Robertson (1990) grafiğinde sıvılaşabilir ve test bölgesine düşen zeminleri sıvılaşmayan zeminlerden ayıran zemin davranış indeksi (burada  $I_c=2.94$ ) eğrisi de ayrıca gösterilmektedir. Bununla birlikte normalize uç direncinin ( $Q_t$ ) 11'den küçük

ve normalize edilmiş sürtünme oranının (F) 2.95'ten büyük olduğu durumlarda Bol ve ark, (2010)'a göre hiçbir zeminin sıvılaşmayacağı anlaşılmaktadır.

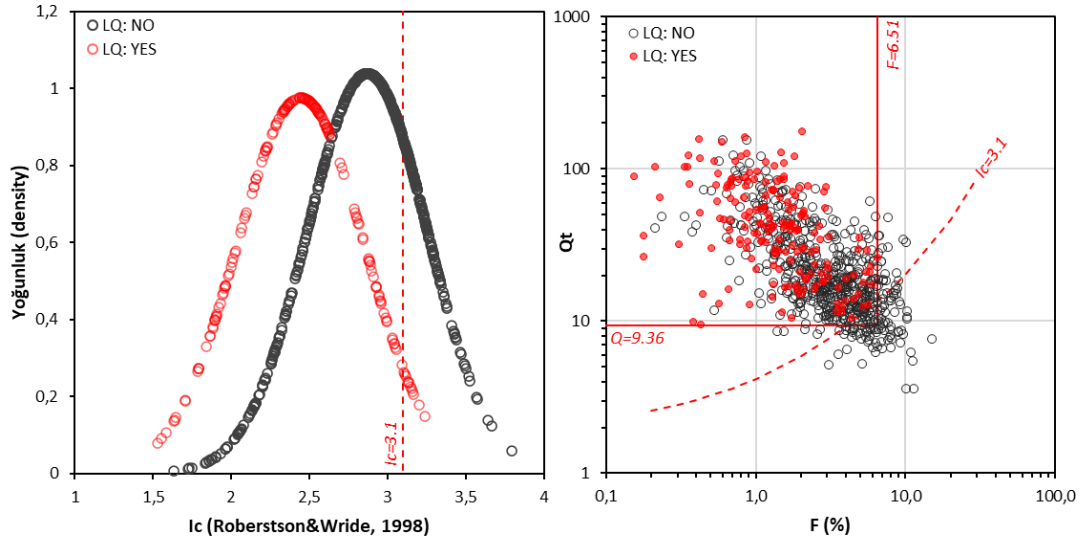


**Şekil 4.34.** Bol ve ark, (2010)'a göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.

Tezin üçüncü bölümünde makine öğrenmesi yöntemlerinden karar ağaçları kullanılarak elde edilen sıvılaşma kriteri geliştirilmiştir. Bu kriter zeminlerin fiziksel özelliklerine dayalı çeşitli karar kuralları ortaya koymaktadır, bu kurallar kullanılarak zemin sıvılaşma kararları verilebilmektedir. Ayrıca ele alınan veri setindeki fiziksel özelliklerin önemi belirlenmiştir. Buna göre fiziksel özelliklerin sıvılaşmaya göre önem sıralaması  $D_{50}$ , derinlik, FC, kil,  $w_n$ ,  $w_L$  olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.35'te makine öğrenmesine göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Söz konusu şeklin ilk grafiğinde makine öğrenmesine göre sıvılaşan (kırmızı) ve sıvılaşmayan (siyah) verilerin zemin davranış indekslerinin normal dağılım eğrileri çizilmiş ve bu eğriler üzerinde veri noktaları da işaretlenmiştir. Sıvılaşmayan zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.870 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.384, sıvılaşan zeminlerin ortalaması ise ( $\sigma$ ) 2.44 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.401 olarak tespit edilmiştir. Burada zemin davranış indeksinin 3.1'den büyük değerlerinde ( $I_c > 3.1$ ) sıvılaşabilir zeminlerin hiçbir şekilde noktalanmadığı izlenebilir. Şeklin ikinci kısmında ise yine Robertson (1990) CPT zemin sınıflandırılması kartında makine öğrenmesine göre sıvılaşan (kırmızı) ve sıvılaşmayan (siyah) verilerin dağılımları verilmiştir. Robertson (1990) grafiğinde sıvılaşan zeminler ile sıvılaşmayan zeminleri birbirinden ayıran zemin davranış indeksi (burada  $I_c = 3.1$ ) eğrisi de ayrıca

gösterilmektedir. Bununla birlikte normalize uç direncinin ( $Q_t$ ) 9.36'dan küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ( $F$ ) 6.51'den büyük olduğu durumlarda makine öğrenmesine göre hiçbir zeminin sıvılaşmayacağı anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.35.** Makine öğrenmesi sonuçlarına göre yapılan sıvılaşma değerlendirmesinin CPT sonuçları ile karşılaştırılması.

Yapılan bu çalışmada literatürde ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede kullanılan farklı yöntemler CPT verileri eşliğinde incelenmiştir. Bu çalışmaya göre sıvılaşmaz, sıvılaşabilir ve test bölgesine düşen zeminlerin zemin davranış indeksleri ile normalize edilmiş uç direnci ve sürtünme oranları göz önüne alınmıştır. Yapılan bu çalışmada sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminler genellikle üst üste çakışmaktadır. Bununla birlikte sıvılaşmayan zeminlerin CPT verileri ile ayrımı tüm kriterlere göre kesin olarak yapılabilmektedir. Araştırma sonuçları özet olarak Tablo 4.6'da gösterilmektedir.

**Tablo 4.6.** Sıvılaşmaz ince daneli zeminlerin CPT verileri ile yapılan değerlendirmeye göre ayrımı.

	Wang (1979)	Andrews ve Martin (2000)	Seed ve ark, (2003)	Bol ve ark, (2010)	Makine Öğrenimi
Zemin davranış İndeksi, $I_c$	>2.58	>3.03	>3.37	>2.94	>3.10
Normalize Edilmiş Uç Direnci, $Q_t$	<18.61	<9.00	<5.20	<11.0	<9.36
Normalize Edilmiş Sürtünme Direnci, $F$	>2.13	>3.20	>7.20	>2.95	>6.51

Tablo 4.6’da sadece sıvılaşmaz ince daneli zeminlerin sınırları gösterilmiştir. Tablodan izleneceği üzere Seed ve ark, (2003)’e göre yapılan değerlendirmede hem normal dağılım hem de sınıflama kartından da izlenebildiği gibi sıvılaşmayan ve test bölgesine düşen zeminlerin dağılımları büyük oranda üst üste binmektedir. Bu durum söz konusu sıvılaşma kriterinde test bölgesine düşen zeminlerin hem likit limit hem de plastisite indisi bakımından geniş bir aralığa sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu bakımdan sıvılaşmaz zeminlerin Seed ve ark, (2003)’e göre CPT ile ayrımının yapılabilmesini olanaksız hale getirmektedir. Bunun yanında Seed ve ark, (2003)’ün önerdiği sıvılaşma kriterine sıvılaşabilir zeminlerin çoğu (%95)  $I_c$ ’nin 2.47’den küçük olduğu da dikkate değer bulunmuştur. Wang (1979) değerlendirmesi de test bölgesi içermediğinden nihai değerlendirmede Andrews ve Martin (2000) ile Bol ve ark, (2010)’un sıvılaşma kriterleri göz önüne alınmıştır. Buna göre CPT verileri göz önüne alındığında bir zeminin sıvılaşmaz kabul edilebilmesi için zemin davranış indeksinin ( $I_c$ ) 2.98’den büyük olması gerekmektedir. Ayrıca normalize edilmiş uç direncinin 10’dan küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ise 3.08’den büyük olması gerekmektedir.

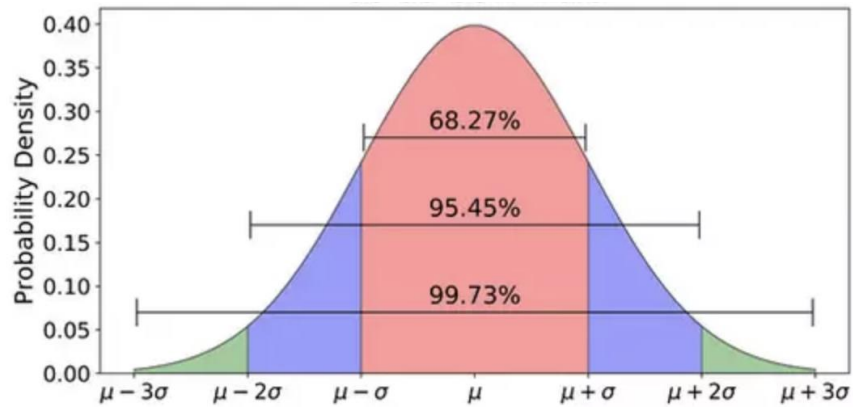
#### **4.6. Zemin Davranış Endeksi $I_c$ ’nin Optimizasyonu**

Zemin davranış endeksi  $I_c$  değerleriyle sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminlerin belirlenmesi için veri tabanındaki zeminlerin farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  değerleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu noktada öncelikle zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli belirlenirken literatürde fiziksel özelliklere dayalı olarak belirlenen sıvılaşma kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada göz önünde bulundurulan 11 sıvılaşma kriterinden en az 2 ve daha fazlasını sağlayan ve ML sınıfında olan zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilir zemin, sağlamayan zeminler potansiyel olarak sıvılaşmaz zeminler olarak kategorize edilmiştir. Buna göre 545 zemin sıvılaşma potansiyeli düşük 233 zemin sıvılaşma potansiyeli yüksek olarak belirlenmiştir.

Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminlerin zemin davranış tipi indeksi  $I_c$ , farklı araştırmacılar tarafından önerilen formüllere göre hesaplanmış bu formüllerden hangilerinin sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminleri daha net bir şekilde ayırt edebildiği irdelenmiştir. Buna ilaveten her bir formüldeki elemanların içerisinde çeşitli katsayılar kullanılmaktadır. Bu katsayıların belirli sınırlar içerisinde değişiminin sıvılaşır ve

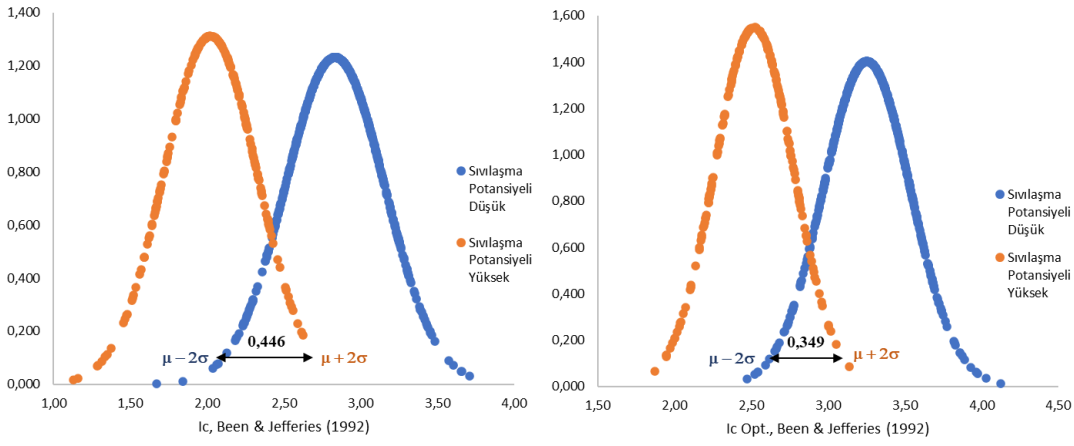


sıvılaşmaz bölgeyi daha iyi bir şekilde belirlemesinin mümkün olup olmadığı irdelenmiştir. Bunun belirlenmesi için sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminlerin  $I_c$  grafikleri ayrı ayrı çizilmiş her iki grafiğin altında kalanın küçülmesi yoluyla grafiklerin birbirinden ayrılması sağlanmıştır. Bu alan hesaplanırken alanın %95.45'ini kapsayan “ortalama  $\pm 2$  standart sapma” ( $\mu \pm 2\sigma$ ) formülü kullanılmıştır (Şekil 4.36). Bu formüle göre iki eğri arasındaki mesafenin orijinal katsayılarla azalması sağlanmış ve bir iyileştirme oranı belirlenmiştir. Optimizasyon problemi doğrusal programlama modeli kullanılarak çözülmüştür. Doğrusal programlama belirli kısıtlar altında tanımlanmış bir amaç fonksiyonunun maksimize veya minimize edilmesidir. Burada amaç fonksiyonu olarak iki normal dağılım eğrisi arasındaki mesafenin azaltılması belirlenmiştir. Buna göre birinci eğrinin Doğrusal programlama problemi çözümü için excel solver aracı kullanılmıştır.



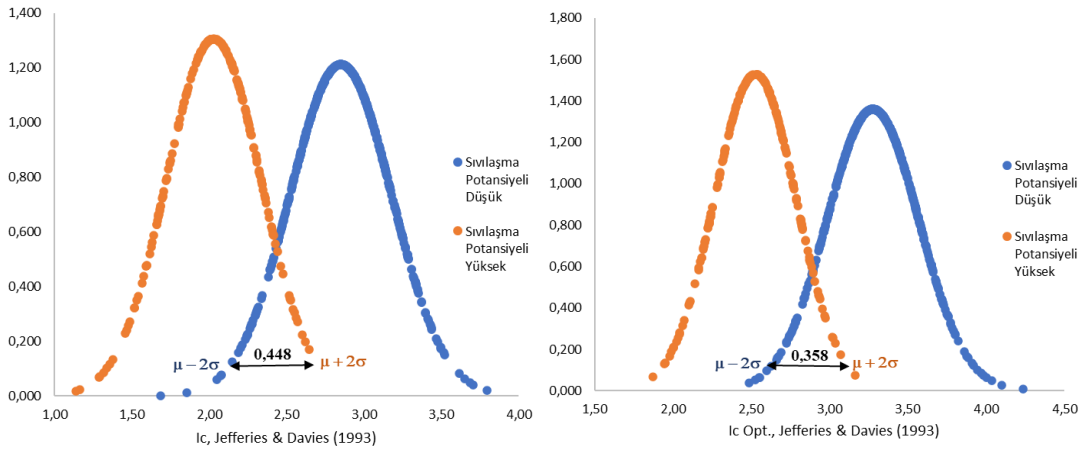
**Şekil 4.36.** Normal dağılım altında kalan alan hesabı.

Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin Been ve Jefferies (1992) tarafından önerilen orijinal ve optimize edilmiş katsayılarla hesaplanan  $I_c$  formülüne göre normal dağılımları Şekil 4.37’de verilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli düşük zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.832 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.324, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.022 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.304 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.37.** Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve Ic, Been ve Jefferies (1992)'ye göre normal dağılımı.

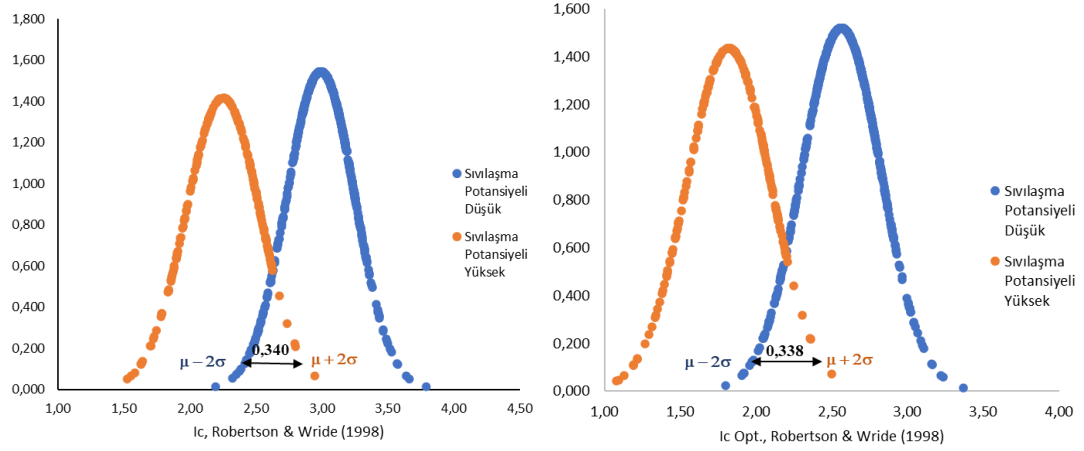
Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin Jefferies ve Davies (1993) tarafından önerilen orijinal ve optimize edilmiş katsayılarla hesaplanan  $I_c$  formülüne göre normal dağılımları Şekil 4.38'de verilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli düşük zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.703 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.283, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.475 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.500 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.38.** Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve Ic, Jefferies ve Davies (1993)'e göre normal dağılımı.

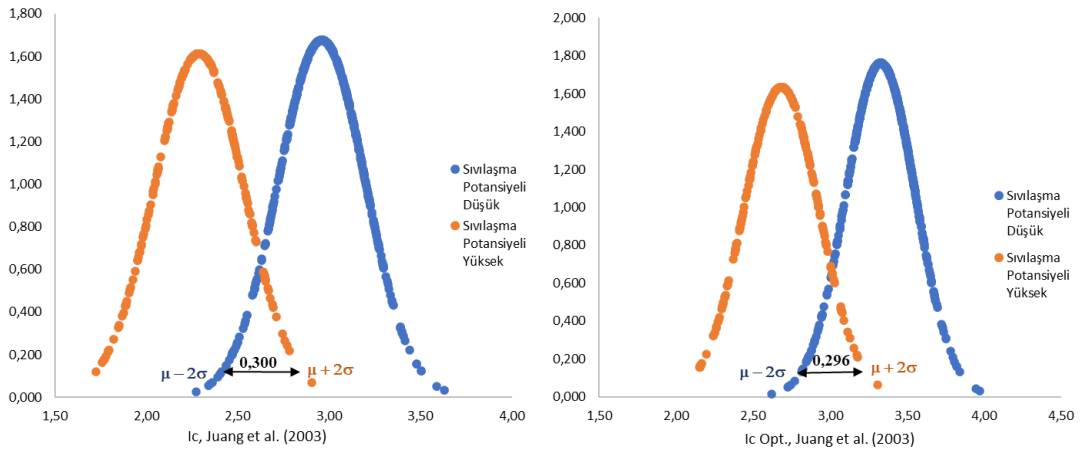
Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen orijinal ve optimize edilmiş katsayılarla hesaplanan  $I_c$  formülüne göre normal dağılımları Şekil 4.39'da verilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli düşük zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.993 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.258, sıvılaşma potansiyeli

yüksek zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.253 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.282 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.39.** Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve  $I_c$ , Robertson ve Wride (1998)'e göre normal dağılımı.

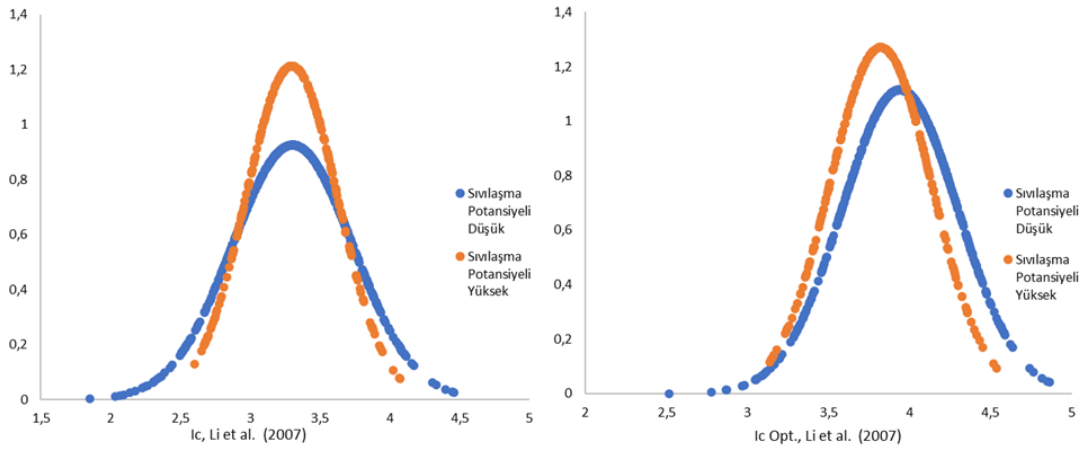
Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin Juang ve ark, (2003) tarafından önerilen orijinal ve optimize edilmiş katsayılarla hesaplanan  $I_c$  formülüne göre normal dağılımları Şekil 4.40'ta verilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli düşük zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.960 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.238, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.289 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.247 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.40.** Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve  $I_c$ , Juang ve ark, (2003)'e göre normal dağılımı.

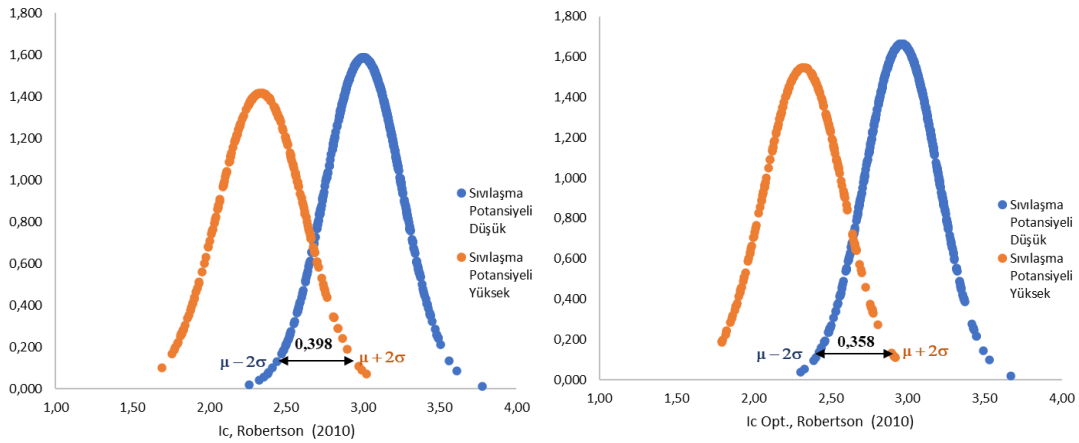
Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin Li ve ark, (2007) tarafından önerilen orijinal ve optimize edilmiş katsayılarla hesaplanan  $I_c$  formülüne göre normal dağılımları Şekil 4.41'de verilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli düşük zeminlerin

ortalaması ( $\sigma$ ) 3.303 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.431, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 3.297 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.329 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.41.** Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve  $I_c$ , Li ve ark, (2007)'ye göre normal dağılımı.

Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin Robertson (2010) tarafından önerilen orijinal ve optimize edilmiş katsayılarla hesaplanan  $I_c$  formülüne göre normal dağılımları Şekil 4.42'de verilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli düşük zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 3.003 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.251, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerin ortalaması ( $\sigma$ ) 2.336 ve standart sapması ( $\mu$ ) 0.281 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.42.** Zeminlerin sıvılaşma potansiyeline ve  $I_c$ , Robertson (2010)'a göre normal dağılımı.

Sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek zeminlerin farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  değerlerinin orijinal ve optimize edilmiş katsayılarıyla değerlendirilmiş ve sonuçları özet olarak Tablo 4.7'de verilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda; orijinal katsayılarıyla ve optimize edilmiş katsayılarla sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz

zeminleri en iyi ayırt eden formülün Juang (2003) formülü olduğu görülmektedir. Yapılan optimizasyon sonucunda orijinal formlere göre %21,6 mertebelerine varan iyileştirmeler olduğu görülmektedir. Li ve ark, (2007) tarafından önerilen  $I_c$  değerlerinin sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminleri iyi bir şekilde ayırt edemediği görülmektedir. Herhangi bir  $I_c$  formülünün sıvılaşma potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminleri net bir şekilde ayırt edemediği bazı zeminlerin her halükarda ortak alanda kaldığı görülmektedir.

**Tablo 4.7.**  $I_c$  formlerinde orijinal ve optimize edilmiş katsayılar ve iyileşme oranı.

Referans	Orijinal Katsayılar						Mesa fe	Optimize Edilmiş Katsayılar						Mesa fe	İyileş me Oranı %
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F		
Jef_93	3,00	1,0	1,50	1,3			0,448	4,0	1,00	1,00	1,3			0,358	19,97
Been_92	3,00	1,0	1,50	1,3			0,446	4,0	1,00	1,00	1,3			0,349	21,61
Rob_98	3,47	1,0	1,22	1,0			0,340	3,0	1,00	1,12	1,0			0,338	0,62
Juang_2003	3,47	1,0	1,22	1,0			0,300	4,0	1,00	1,08	1,0			0,296	1,23
Li_2007	3,25	1,0	1,50	1,0	1,0	2,25	1,515	3,0	1,00	1,38	2,0	1,0	2,0	1,226	19,07
Rob_2010	3,47	1,0	1,22				0,398	3,0	1,62	1,00				0,358	10,16

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez kapsamında ince daneli zeminlerin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Öncelikle sıvılaşma kavramının anlaşılabilmesi için mevcut tanımlar ve çalışmalar irdelenmiştir. Zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığının belirlenebilmesi için önerilen yöntemler irdelenmiş özellikle bu teze konu olan ince daneli zeminlerin ve siltlerin sıvılaşabilirliğinin belirlenmesi için hangi yöntemlerin kullanıldığı ortaya konulmuştur. Zeminlerin fiziksel özelliklerine dayalı olarak geliştirilen sıvılaşma kriterleri veri tabanındaki zeminlere uygulanmış birçok kriterin sıvılaşır ve sıvılaşmaz zeminleri ayırt etmede net bir sınır çizemediği ve genellikle bir test bölgesinin varlığı görülmüştür. Bu belirsiz bölgenin belirginleştirilmesi ve anlaşılabilmesi için ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemde iyi bilinen yedi makine öğrenimi yaklaşımını kullanarak zemin sıvılaşma potansiyeli için bir model sunmaktadır: DT, LOGREG, SVM, KNN, RF, ANN ve SGD. Adapazarı veri seti uzman görüşü ile değerlendirildikten ve ön işleme aşamalarından geçirildikten sonra eğitilmiştir. Eğitim sürecinde algoritmaların farklı parametrelerle elde ettiği sonuçlar kaydedilmiştir. Böylece en iyi parametrelere sahip algoritmaların daha iyi sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Kullanılan algoritmalar tüm veri setinin eğitim kalitesine göre sıralandığında karar ağaçlarının %90 doğruluk başarı oranı ile en yüksek sonuçları elde ettiği görülmüştür. RF sınıflandırıcısının elde ettiği sonuçlar ise en iyi ikinci algoritma olmuştur. Belirtilen DT modeli, rastgele seçilen eğitim setinde %91 ve test setinde %84 doğrulukla sonuçlanmıştır. DT modelinin F1 skoru %96'ya ulaşmıştır. Daha önce uzman görüşü ile sıvılaşma olup olmadığını belirten kurallar makine öğrenmesi yöntemleri ile geliştirilmiştir. Bu çalışmadaki DT modeli sıvılaşma tahmini için iyi bir alternatif sunmakta ve önceki çalışmalara göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Karar ağaçları ile üretilen karar kuralları sunulmuştur. Özetle, bu kurallar kullanılarak zemin sıvılaşma kararları verilebilmektedir. Ayrıca ele alınan veri setindeki özelliklerin önemi karar ağaçları ile belirlenmiştir. Buna göre özelliklerin önem sıralaması  $D_{50}$ , derinlik, FC, kil yüzdesi,  $w_n$ ,  $w_L$  olarak belirlenmiştir.

Tezin 4. Bölümünde koni penetrasyon deneyi (CPT) ile zeminlerin nasıl sınıflandırıldığı, sıvılaşma tayininin nasıl yapıldığı, mevcut önerilerin veri tabanındaki zeminlerde nasıl sonuçlar verdiği irdelenmiş ve mevcut yöntemlerin performanslarının arttırılması ile özellikle sıvılaşabilir siltli zeminlerin tanısı için analizler yapılmıştır. CPT ile zeminlerin sınıflandırılmasında zemin davranış tipi indeksi  $I_c$  yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen birçok  $I_c$  formülasyonu mevcuttur. Bu formülasyonlar veri tabanındaki fiziksel özellikleri belirlenmiş ve zemin sınıflaması TS1500/2000'e göre yapılmış olan zeminler için ayrı ayrı irdelenmiştir. Burada kil ve silt zeminler için belirli bir  $I_c$  değeriyle tam bir ayırım yapılamadığı görülmüştür, killer ve siltler bazı bölgelerde üst üste çakışmaktadır. Killeri ve siltleri ayıran bir  $I_c$  değeri belirlenmek istendiğinde bu değerde her iki zemin sınıfı da bulunmaktadır. Bu sebeple sil ve kil zeminlerin eğrilerini mümkün olduğunca az kesişim olacak şekilde ayırabilmek için her bir  $I_c$  formülasyonuna ait bir sınır değer belirlenmiştir. Kil ve siltleri ayırmada belirlenen sınır  $I_c$  değerinin altında kalan oranların farkına göre sonuçlar incelendiğinde Robertson ve Wride (1998) formülünün  $I_c = 2.65$  sınır değeriyle %74.5 fark oranı ile en iyi ayırımı yaptığını söylemek mümkündür.

İnce daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede kullanılan farklı yöntemler CPT verileri eşliğinde incelenmiştir. Bu çalışmaya göre sıvılaşmaz, sıvılaşabilir ve test bölgesine düşen zeminlerin zemin davranış indeksleri ile normalize edilmiş uç direnci ve sürtünme oranları göz önüne alınmıştır. Yapılan bu çalışmada sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz zeminler genellikle üst üste çakışmaktadır. Bununla birlikte sıvılaşmayan zeminlerin CPT verileri ile ayırımı tüm kriterlere göre kesin olarak yapılabilmektedir. Sıvılaşmaz ince daneli zeminlerin sınırları gösterilmiştir. Seed ve ark, (2003)'e göre yapılan değerlendirmede hem normal dağılım hem de sınıflama kartından da izlenebildiği gibi sıvılaşmayan ve test bölgesine düşen zeminlerin dağılımları büyük oranda üst üste binmektedir. Bu durum söz konusu sıvılaşma kriterinde test bölgesine düşen zeminlerin hem likit limit hem de plastisite indisi bakımından geniş bir aralığa sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu bakımdan sıvılaşmaz zeminlerin Seed ve ark, (2003)'e göre CPT ile ayırımının yapılabilmesini olanaksız hale getirmektedir. Bunun yanında Seed ve ark, (2003)'ün önerdiği sıvılaşma kriterine sıvılaşabilir zeminlerin çoğu (%95)  $I_c$ 'nin 2.47'den küçük olduğu da dikkate değer bulunmuştur. Wang (1979) değerlendirmesi de test bölgesi

içermediğinden nihai değerlendirmede Andrews ve Martin (2000) ile Bol ve ark, (2010)'un sınıflama kriterleri göz önüne alınmıştır. Buna göre CPT verileri göz önüne alındığında bir zeminin sınıflanmaz kabul edilebilmesi için zemin davranış indeksinin ( $I_c$ ) 2.98'den büyük olması gerekmektedir. Ayrıca normalize edilmiş uç direncinin 10'dan küçük ve normalize edilmiş sürtünme oranının ise 3.08'den büyük olması gerekmektedir.

Zemin davranış endeksi  $I_c$  değerleriyle sınıflanabilir ve sınıflanmaz zeminlerin belirlenmesi için veri tabanındaki zeminlerin farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  değerleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Veri tabanındaki zeminlerin sınıflama potansiyeli belirlenirken saha gözlemlerine ve literatürde fiziksel özelliklere dayalı olarak belirlenen sınıflama kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada göz önünde bulundurulan 11 kriterden en az 2 ve daha fazlasını sağlayan zeminler potansiyel olarak sınıflanabilir zemin, sağlamayan zeminler potansiyel olarak sınıflanmaz zeminler olarak kategorize edilmiştir. Sınıflama potansiyeli düşük ve yüksek olan zeminlerin zemin davranış tipi indeksi  $I_c$ , farklı araştırmacılar tarafından önerilen formüllere göre hesaplanmış formüllerin hangilerinin sınıflanabilir ve sınıflanmaz zeminleri daha net bir şekilde ayırt edebildiği irdelenmiştir. Buna ilaveten her bir formüldeki elemanların içerisinde çeşitli katsayılar kullanılmaktadır. Bu katsayıların belirli sınırlar içerisinde değişiminin sınıflanır sınıflanmaz bölgeyi daha iyi bir şekilde ayırt etmesi için mevcut katsayılar optimize edilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda orijinal formüllere göre %21,6 mertebelerine varan iyileştirmeler olduğu görülmüştür. Sınıflama potansiyeli düşük ve yüksek zeminler farklı araştırmacılar tarafından önerilen  $I_c$  değerlerinin orijinal ve optimize edilmiş katsayılarıyla değerlendirilmiş ve orijinal katsayılarıyla ve optimize edilmiş katsayılarla sınıflanabilir ve sınıflanmaz zeminleri en iyi ayırt eden formülün Juang (2003) formülü olduğu görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- Ahmad, M., Tang, X.-W., Qiu, J.-N., Ahmad, F., ve Gu, W.-J. (2021). Application of machine learning algorithms for the evaluation of seismic soil liquefaction potential. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0669-5>
- Alobaidi, M. H., Meguid, M. A., ve Chebana, F. (2019). Predicting seismic-induced liquefaction through ensemble learning frameworks. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48044-0>
- Altman, N. S. (1992). An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression. *The American Statistician*, 46(3), Article 3. <https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475879>
- Andrews, D. C., ve Martin, G. R. (2000). Criteria for liquefaction of silty soils. *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, 1-8.
- Andrus, R. D., ve Stokoe II, K. H. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(11), Article 11.
- Baligh, M. M., Azzouz, A. S., Wissa, A. Z., MARTIN, R. T., ve Morrison, M. J. (1981). The piezocone penetrometer.
- 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, ICSMFE, August, 16-27.*
- Bol, E. (2013). The influence of pore pressure gradients in soil classification during piezocone penetration test. *Engineering geology*, 157, 69-78.
- Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., ve Özocak, A. (2010). Liquefaction of silts: The Adapazari criteria. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(4), Article 4.
- Bol, E., Önalp, A., ve Özocak, A. (2008). The liquefiability of silts and the vulnerability map of Adapazari. *Proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12–17, 2008, Beijing, China.*
- Bolton Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L. F., ve Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of geotechnical engineering*, 111(12), Article 12.
- Bonaccorso, G. (2017). *Machine learning algorithms*. Packt Publishing Ltd.
- Boulanger, R. W., ve Idriss, I. M. (2004). Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays. *Citeseer*.
- Boulanger, R. W., ve Idriss, I. M. (2006). Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(11), Article 11.

- Bray, J. D., ve Sancio, R. B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(9), Article 9.
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T. L., Stewart, J. P., Seed, R. B., Cetin, O. K., Bol, E., ve Baturay, M. B. (2004). Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), Article 7.
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Youd, L. F., Christensen, C., Cetin, K. O., Onalp, A., Durgunoglu, T., Stewart, J. P. C., Seed, R. B., ve Baturay, M. B. (2001). Documenting incidents of ground failure resulting from the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake. *Pacific Earthquake Engineering Research Center website*: <http://peer.berkeley.edu/turkey/adapazari>.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., ve Olshen, R. A. (1984). *Classification and regression trees*. CRC press.
- Castro, G. (1969). *Liquefaction of sands*. Ph. D. Thesis, Harvard University, Mass.
- Charbuty, B., ve Abdulazeez, A. (2021). Classification based on decision tree algorithm for machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(01), Article 01.
- Dillon, J. V., Langmore, I., Tran, D., Brevdo, E., Vasudevan, S., Moore, D., Patton, B., Alemi, A., Hoffman, M., ve Saurous, R. A. (2017). *Tensorflow distributions*. arXiv preprint arXiv:1711.10604.
- Douglas, B. J. (1981). Soil classification using electric cone penetrometer. *Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geo-technical Engineering Division, ASCE, St. Louis, Oct.*
- El Naqa, I., ve Murphy, M. J. (2015). *What is machine learning? İçinde Machine learning in radiation oncology* (ss. 3-11). Springer.
- Feng, Y., Cui, N., Hao, W., Gao, L., ve Gong, D. (2019). Estimation of soil temperature from meteorological data using different machine learning models. *Geoderma*, 338, 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.044>
- Finn, W. D., Ledbetter, R. H., ve Wu, G. (1994). Liquefaction in silty soils: Design and analysis. *Ground failures under seismic conditions*, 51-76.
- García, S., Ovando-Shelley, E., Gutiérrez, J., ve García, J. (2012). Liquefaction Assessment through Machine Learning Approach. *15th World Conf. Earthq. Eng.*
- Goh, A. T. C., ve Goh, S. H. (2007). Support vector machines: Their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data. *Computers and Geotechnics*, 34(5), Article 5. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.06.001>
- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., ve Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (C. 398). John Wiley ve Sons.
- Hu, J. (2021). A new approach for constructing two Bayesian network models for predicting the liquefaction of gravelly soil. *Computers and Geotechnics*, 137, 104304. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104304>

- Jefferies, M., ve Been, K. (2006). *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*. CRC Press.
- Jefferies, M. G., ve Davies, M. P. (1991). Soil classification by the cone penetration test: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 173-176.
- Jennings, P. C. (1980). *Earthquake Engineering and Hazards Reduction in China: A Trip Report of the American Earthquake Engineering and Hazards Reduction Delegation*.
- Joachims, T. (1998). Making large-scale SVM learning practical. Technical report.
- Juang, C. H., Yuan, H., Lee, D.-H., ve Lin, P.-S. (2003). Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(1), 66-80.
- Ketkar, N., ve Moolayil, J. (2021). *Introduction to pytorch. İçinde Deep learning with python (ss. 27-91)*. Springer.
- Kingsford, C., ve Salzberg, S. L. (2008). What are decision trees? *Nature biotechnology*, 26(9), Article 9.
- Koester, J. P. (1994). The influence of fines type and content on cyclic strength. *Ground failures under seismic conditions*, 17-33.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Kramer, S. L., ve Seed, H. B. (1988). Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(4), 412-430.
- Kumar, D. (2021). A Novel Methodology to Classify Soil Liquefaction Using Deep Learning. *Geotech Geol Eng*, 10.
- Larsson, R. (1995). CPT test. Equipment, testing, evaluation. An in situ method for determination of stratigraphy and properties in soil profiles. Statens geotekniska institut.
- Li, D. K., Juang, C. H., Andrus, R. D., ve Camp, W. M. (2007). Index properties-based criteria for liquefaction susceptibility of clayey soils: A critical assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), 110-115.
- Makasis, N., Narsilio, G. A., ve Bidarmaghz, A. (2018). A machine learning approach to energy pile design. *Computers and Geotechnics*, 97, 189-203.
- Mavroforakis, M. E., ve Theodoridis, S. (2006). A geometric approach to support vector machine (SVM) classification. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17(3), Article 3. <https://doi.org/10.1109/TNN.2006.873281>
- Mayne, P. W., Kulhawy, F. H., ve Kay, J. N. (1990). Observations on the development of pore-water stresses during piezocone penetration in clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(4), 418-428.
- Mogami, T., ve Kubo, K. (1953). The behavior of soil during vibration. *Proc. 3rd Inter. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg*, 1, 152-155.
- Önalp, A., Arel, E., ve Bol, E. (2001). A general assesment of the Effects of 1999 Earthquake on the Soil-Structure Interaction in Adapazarı. *Jubilee Papers in Honour of Prof. Dr. Ergün Toğrol*, 76-89.

- Önalp, A., Arel, E., ve Özocak, A. (2007). Koni Penetrasyon Deneyiyle Yüzeysel Temel Taşıma Gücünün Belirlenmesi. 206-215.
- Önalp, A., Bol, E., ve Ural, N. (2006). Estimation of undrained shear strength from cone tip resistance in clayey soils. Proceedings of Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey, 1-12.
- Özaydin, K. (2007). Zeminlerde Sıvılaşma. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Park, S.-S., Ogunjinmi, P. D., Woo, S.-W., ve Lee, D.-E. (2020). A Simple and Sustainable Prediction Method of Liquefaction-Induced Settlement at Pohang Using an Artificial Neural Network. Sustainability, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su12104001>
- Pathak, S. R., ve Purandare, A. S. (2016). Liquefaction susceptibility criterion of fine grained soil. International Journal of Geotechnical Engineering, 10(5), Article 5.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., ve Dubourg, V. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. the Journal of machine Learning research, 12, 2825-2830.
- Polito, C. P. (1999). The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Polito, C. P., ve Martin II, J. R. (2001). Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 127(5), Article 5.
- Polyak, B. T. (1964). Some methods of speeding up the convergence of iteration methods. Ussr computational mathematics and mathematical physics, 4(5), Article 5.
- Quinlan, J. R. (2014). C4. 5: Programs for machine learning. Elsevier.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian geotechnical journal, 27(1), 151-158.
- Robertson, P. K. (2004). Evaluating soil liquefaction and post-earthquake deformations using the CPT. Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization ISC, 2, 233-249.
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: An update. 2nd International symposium on cone penetration testing, 2(56), 8.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., ve Greig, J. (1986). Use of piezometer cone data. Use of in situ tests in geotechnical engineering, 1263-1280.
- Robertson, P. K., ve Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian geotechnical journal, 35(3), 442-459.
- Rokach, L., ve Maimon, O. (2005). Decision trees. İçinde Data mining and knowledge discovery handbook (ss. 165-192). Springer.

- Samui, P., ve Sitharam, T. G. (2011). Machine learning modelling for predicting soil liquefaction susceptibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1-2011>
- Schmertmann, J. H. (1978). *Guidelines for cone penetration test: Performance and design*. United States. Federal Highway Administration.
- Schneider, J. A., Xu, X., ve Lehane, B. M. (2008). Database assessment of CPT-based design methods for axial capacity of driven piles in siliceous sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(9), 1227-1244.
- Seed, H. B., ve Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), Article 9.
- Seed, H. B., ve Idriss, I. M. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake engineering research insititue*.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., ve Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of geotechnical engineering*, 109(3), Article 3.
- Seed, H. B., ve Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(6), 105-134.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., ve Kayen, R. E. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework. *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*.
- Serdar, E. (2006). *Comparative Liquefaction Analyses on Adapazarı Soil [Doktora Tezi]*.
- Sert, S., Bol, E., ve Özocak, A. (2015). *Zemin Özelliklerini Belirlemede Koni Penetrasyon Deneyi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya*.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Hamzeshpour, N., Hassanzadeh, M., Heung, B., Ghebleh Goydaragh, M., Schmidt, K., ve Scholten, T. (2021). Enhancing the accuracy of machine learning models using the super learner technique in digital soil mapping. *Geoderma*, 399, 115108. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115108>
- TS 1500, *İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması*. (2000).
- Tumay, M. Y., Boggess, R. L., ve Acar, Y. (1981). Subsurface investigations with piezo-cone penetrometer. *Cone penetration testing and experience*, 325-342.
- Tung, A. T., Wang, Y. Y., ve Wong, F. S. (1993). Assessment of liquefaction potential using neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12(6), Article 6.
- Wang, W. (1979). *Some findings in soil liquefaction*. Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power.
- Youd, T. L. (1984). Recurrence of liquefaction at the same site. *Proc. 8th World Conf. Earthq. Engng*, 3, 231-238.

- Youd, T. L. (1991). Mapping of earthquake-induced liquefaction for seismic zonation.
- Youd, T. L., ve Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(4), Article 4.
- Zhang, X.-D. (2020). Machine Learning. A Matrix Algebra Approach to Artificial Intelligence, 223-440. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2770-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2770-8_6)

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Mustafa ÖZSAĞIR

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2012, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek lisans** :2015, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2012 – Devam ediyor: Sakarya Üniversitesi

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Ozsagir, M., Erden, C., Bol, E., Sert, S., ve Özocak, A. (2022). Machine Learning Approaches for Prediction of Fine-Grained Soils Liquefaction. *Computers and Geotechnics*, 152, 105014.

### DİĞER ESERLER:

- Kocaman, K., Ozocak, A., Edil, T. B., Bol, E., Sert, S., Onturk, K., ve Ozsagir, M. (2022). Evaluation of Soil-Water Characteristic Curve and Pore-Size Distribution of Fine-Grained Soils. *Water*, 14(21), 3445.
- Silahtar, A., Karaaslan, H., Özocak, A., Bol, E., Sert, S., Kocaman, K., ve Özsağır, M. (2023). Assessment of the liquefaction potential of the Arifiye (Sakarya) region with multidisciplinary geoscience approaches in the GIS environment. *Journal of Applied Geophysics*, 212, 104983.
- Öntürk, K., Kocaman, K., ve Özsağır, M. (2017). Evaluation Of The Use Of Fly Ash in Roadsubbase. Presented at the International Conference on Technology, Engineering and Science, Antalya.

- Öntürk, K., Özsağır, M. ve Kocaman, K. (2017). Effect of Saline Water on Silty Soils. Presented at the International Conference on Technology, Engineering and Science, Antalya.
- Öntürk, K., Bol, E., Özocak, A. ve Özsağır, M. (2015). Doygun Olmayan İnce Taneli Zeminlerin Kayma Direnci. Presented at the 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Valencia.
- Özsağır, M., Bol, E., SERT, S., ve Öntürk, K. (2015). Dynamic Properties of Fine Grained Soils. Presented at the 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Valencia.
- Bol, E., Öntürk, K., ve Özsağır, M. (2014). Katı Atıkların Kontrolü ve Çevresel Etkileri. Presented at the 2nd International Symposium On Environment And Morality, Adıyaman
- Bol, E., Özsağır, M., Özocak, A., ve Sert, S. (2015). Siltli Zeminlerin Dinamik Özellikleri. Presented at the 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana.