

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA VE DÜŞEY GERİLME
ARTIŞI ETKİSİNDE SIVILAŞMA ANALİZİ**

TANSU EMİROĞLU

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA VE DÜŞEY GERİLME ARTIŞI
ETKİSİNDE SIVILAŞMA ANALİZİ

TANSU EMİROĞLU

Prof.Dr. Sami ARSOY
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Aydın KAVAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Ersin AREL
Jüri Üyesi, Kültür Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 27.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Sismik zemin sıvılaşmasının yapı etkisi altında ve serbest arazi koşullarında analiz edilmesini içeren bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı tarafından sunulan destek ve imkânlar ile hazırlanmıştır.

Kocaeli Üniversitesi çatısı altında hazırlanan bu çalışmada, bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Sami ARSOY'a teşekkür ediyorum.

Tüm hayatım boyunca attığım her adımda arkamda olan, hayatlarını evlatlarına adayan annem ve babama, sevgili kardeşime, destek ve anlayışı ile bana her zaman yardımcı olan nişanlıma ve mesai arkadaşlarıma sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2018

Tansu EMİROĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLOLAR DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ.....	1
1. ZEMİN SIVILAŞMASI	2
1.1.Zemin Sıvılaşmasını Etkileyen Parametreler	2
1.1.1.Zemin parametreleri.....	2
1.1.2.Sismik parametreler	4
1.2.Zemin Sıvılaşmasının Oluşum Aşamaları.....	5
1.2.1.Akma sıvılaşması.....	5
1.2.2.Çevrimsel hareketlilik	5
1.3.Zeminde Sıvılaşma Sonrası Hasarlar	6
2.SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA ZEMİN SIVILAŞMASI ANALİZLERİ	11
2.1.Sıvılaşma Analizi Yaklaşımları.....	11
2.1.1.Çevrimsel birim deformasyon yaklaşımı.....	11
2.1.2.Sönümlenmiş enerji yaklaşımı	14
2.1.3.Efektif gerilme tabanlı tepki analizi yaklaşımı	15
2.1.4.İstatistiksel sıvılaşma analizi	15
2.1.5.Çevrimsel gerilme oranı yaklaşımı	16
2.2.İri Daneli Zeminlerde Sıvılaşma Analizi	21
2.2.1.Standart penetrasyon deneyi tabanlı çevrimsel gerilme oranı analizi	22
2.2.1.1.Seed vd. 1971.....	23
2.2.1.2.Robertson ve Wride 1998	27
2.2.1.3.Toprak vd. 1999.....	28
2.2.1.4.Youd vd. 2000.....	30
2.2.1.5.Liao vd. 1988	31
2.2.2.Konik penetrasyon deneyi tabanlı çevrimsel gerilme oranı analizi	32
2.2.3.Kayma dalgası hızı tabanlı çevrimsel gerilme oranı analizi	40
2.3.İnce Daneli Zeminlerde Sıvılaşma Analizi.....	46
2.3.1.Çin kriteri	46
2.3.2.Modifiye Çin kriteri	47
2.3.3.Andrews ve Martin yöntemi.....	48
2.3.4.Tezcan ve Özdemir yöntemi	49
2.3.5.Polito yöntemi	50
2.3.6.Bray vd. Yöntemi	51
2.3.7.Adapazarı kriteri.....	52
2.3.8.Japon kriteri	54
2.3.9.Seed vd. yöntemi	55
3.SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA SPT VE CPT TABANLI SIVILAŞMA ANALİZİ.....	58
3.1.Saha ve Zemin Özellikleri.....	58

3.2.Kum ve Silt İçeren Zeminlerde Serbest Arazi Koşullarında SPT Tabanlı Sıvılaşma Analizi.....	63
3.3.Kum ve Silt İçeren Zeminlerde Serbest Arazi Koşullarında CPT Tabanlı Sıvılaşma Analizi.....	68
4.SIVILAŞMA ANALİZİNDE ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ	78
4.1.Başlangıç Statik Kayma Gerilmesi Etkisi	78
4.2.Çevre Basıncındaki Değişimin Etkisi	83
4.3.Aşırı Konsolidasyon Oranı Etkisi	86
4.4.Bina Tepkisinin Etkisi	87
4.5.Düşey Efektif Gerilme Artışı	88
4.5.1.Düşey efektif gerilme artışının CSR üzerindeki etkisinin basitleştirilmiş yaklaşımla incelenmesi	90
4.5.2.Düşey efektif gerilme artışının gerilme azalım faktörü (r_d) üzerindeki etkisinin basitleştirilmiş yaklaşımla incelenmesi	92
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	96
KAYNAKLAR	98
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	102
ÖZGEÇMİŞ	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Sıvılaşma öncesinde (a), sıvılaşma anında (b) ve sıvılaşma sonrasında zemin daneleri arası etkileşim	2
Şekil 1.2.	Hesap derinliğine göre zemin düşey ve yatay gerilmelerindeki değişim	3
Şekil 1.3.	Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde tabaka koşullarının etkisinin gösterimi	4
Şekil 1.4.	Zeminde çevrimsel hareketlilik ile oluşan yanıl yayılma	6
Şekil 1.5.	1999 Kocaeli depremi sonrasında zeminde taşıma gücü kaybı ile yenilen bir bina	6
Şekil 1.6.	Çin’de taşıma gücü kaybı nedeniyle devrilen 13 katlı binalar	7
Şekil 1.7.	Avusturya’da bir istinat duvarı yenilmesi	7
Şekil 1.8.	2000 Tottori depreminde gömülü yapı yükselmesi	8
Şekil 1.9.	Kum kaynamasının oluşumu	9
Şekil 1.10.	Akma göçmesinin oluşumu	9
Şekil 1.11.	Yanal yayılmanın oluşumu	10
Şekil 2.1.	2 farklı zemin numunesi ele alınarak hazırlanan boşluk suyu basıncı ile çevrimsel birim deformasyon (%) arasındaki ilişki	12
Şekil 2.2.	Sıvılaşma mekanizmasının tetiklenmesine neden olan çevrim sayısı (Neq)- çevrimsel birim deformasyon ile Kc arasındaki ilişki	13
Şekil 2.3.	Çevrimsel gerilme oranı yaklaşımının şematik gösterimi	16
Şekil 2.4.	Farklı zemin türlerine göre gerilme azalım faktörünün derinlikle değişimindeki bant aralığı	17
Şekil 2.5.	Çevrim sayısı ve CSR ile deprem moment büyüklüğüne göre MSF katsayısı	18
Şekil 2.6.	Deprem büyüklüğü düzeltme faktörü için yapılan çalışmaların toplu gösterimi	20
Şekil 2.7.	Düzeltilmiş darbe sayısı ve CSR ilişkisi	24
Şekil 2.8.	Farklı ince dane içeriğine sahip zeminler için N1,60 –CSR ilişkisi	25
Şekil 2.9.	Sıvılaşma durumunda zeminde gözlenen birim deformasyon değerlerine göre CSR-N1,60 ilişkisi	26
Şekil 2.10.	Robertson ve Wride tarafından önerilen N1,60-CSR7.5 eğrileri	27
Şekil 2.11.	1989 Loma Prieta depremi (a) ve ABD genelinden seçilen depremlere (b) göre olasılıksal N1,60-CSR eğrileri	29
Şekil 2.12.	Dünya genelinden seçilen depremlere göre olasılıksal N1,60-CSR eğrileri (a) olasılıksal eğrilerin karşılaştırılması (b)	29
Şekil 2.13.	Youd vd. tarafından önerilen N1,60-CSR eğrileri	31
Şekil 2.14.	Olasılıksal yaklaşımla elde edilen N1,60-CSR eğrileri	32
Şekil 2.15.	Temiz kum (İDO<5%) için önerilen qc,1N-CSR ilişkisi	34
Şekil 2.16.	F-Q ilişkisine göre zemin grupları ve Ic katsayısının değişimi	35
Şekil 2.17.	İnce dane oranı ve zemin türüne göre IC katsayısı	36
Şekil 2.18.	Zemin türüne göre IC-KC ilişkisi	37
Şekil 2.19.	CPT ile elde edilen sürtünme oranı (Rf)-normalleştirilmiş uç direnç (qc,1) ilişkisi	38
Şekil 2.20.	Rf ve Ic katsayılarına göre normalleştirilmiş uç direnç (qc,1)-CSR ilişkisini gösteren eğrilerin karşılaştırılması	39
Şekil 2.21.	CPT ile sıvılaşma analizi için önerilen eğrilerin toplu gösterim	40

Şekil 2.22. Farklı çevrim sayılarına göre maksimum yer ivmesi (a_{max})-zemin kayma dalgası hızı arasındaki ilişki.....	42
Şekil 2.23. Farklı çevrim sayılarına göre birim deformasyonun %5 olduğu durumdaki $V_s,1$ -CSR ilişkisi.....	43
Şekil 2.24. $\dot{I}DO \leq 5\%$ olan zeminlerde $M_w=7$ ve $M_w=7.5$ için sıvılaşma sınır eğrisi.....	44
Şekil 2.25. Farklı ince dane oranına sahip zeminler için $V_s,1$ ile CSR ilişkisi.....	45
Şekil 2.26. Çin kriterine göre sıvılaşma koşulları	47
Şekil 2.27. Modifiye Çin kriterine göre sıvılaşma koşulları.....	48
Şekil 2.28. Andrews ve Martin tarafından önerilen sıvılaşma koşulları	49
Şekil 2.29. Tezcan ve Özdemir tarafından önerilen sıvılaşma koşulları	50
Şekil 2.30. Sıvılaşma gözlenen (a), sıvılaşma ihtimali olan (b) ve çevrimsel hareketliliğe karşı duyarlı olan zeminler (c)	51
Şekil 2.31. Bray vd. tarafından önerilen sıvılaşma koşulları	52
Şekil 2.32. Adapazarı kriterinin plastisite kartı üzerinde gösterimi	53
Şekil 2.33. Adapazarı kriterinin USDA sınıflandırma üçgeni üzerinde gösterimi	53
Şekil 2.34. Adapazarı kriterinin grafiksel gösterimi	54
Şekil 2.35. Kötü derecelenmiş zeminler (a) ve iyi derecelenmiş zemin için (b) geliştirilen Japon kriteri	55
Şekil 2.36. Seed vd. tarafından önerilen sıvılaşma kriterleri	56
Şekil 3.1. Çark suyu	58
Şekil 3.2. Çark caddesi planı.....	59
Şekil 3.3. Çark suyu kesiti	59
Şekil 3.4. Değirmendere burnunda gözlenen zemin yenilmesi	60
Şekil 3.5. Değirmendere burnu mevkiinde yapılan arazi deneyleri ile ilgili bilgiler	60
Şekil 3.6. 1999 Kocaeli depreminde zemin yenilmesi sonucu yıkılan Sapanca Vakıf Oteli	61
Şekil 3.7. Sapanca Vakıf Oteli çevresinde deprem sonrasında zeminde gözlenen deformasyonlar	61
Şekil 3.8. Sapanca Vakıf Oteli'ni arazi planı.....	62
Şekil 3.9. Yakın Caddesinde yol üzerinde depremden sonra meydana gelen hasarlar	62
Şekil 3.10. Yakın caddesi üzerindeki hasarlar ve arazi deneyleri bölgeleri.....	63
Şekil 3.11. Çark caddesi çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	64
Şekil 3.12. Değirmendere burnu (SPT-I) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	64
Şekil 3.13. Değirmendere burnu (SPT-II) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	65
Şekil 3.14. Sapanca Oteli (SPT-I) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	65
Şekil 3.15. Sapanca Oteli (SPT-II) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	66
Şekil 3.16. Sapanca Oteli (SPT-III) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	66
Şekil 3.17. Sapanca Oteli (SPT-IV) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	67

Şekil 3.18. Yakın Caddesi çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	67
Şekil 3.19. Çark Caddesi (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	68
Şekil 3.20. Çark Caddesi (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	69
Şekil 3.21. Değirmendere burnu (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	69
Şekil 3.22. Değirmendere burnu (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	70
Şekil 3.23. Değirmendere burnu (CPT-III) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	70
Şekil 3.24. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	71
Şekil 3.25. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	71
Şekil 3.26. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-III) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	72
Şekil 3.27. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-IV) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	72
Şekil 3.28. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-V) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	73
Şekil 3.29. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-VI) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	73
Şekil 3.30. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-VII) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	74
Şekil 3.31. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-VIII) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	74
Şekil 3.32. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-IX) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi	75
Şekil 3.33. Yakın Caddesi (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	75
Şekil 3.34. Yakın Caddesi (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	76
Şekil 3.35. Yakın Caddesi (CPT-III) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	76
Şekil 3.36. Yakın Caddesi (CPT-IV) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi.....	77
Şekil 4.1. 10 çevrim için sıkı kum numuneleri için ($DR > \%40$) α -CSR ilişkisi.....	79
Şekil 4.2. 10 çevrim için gevşek kum numuneleri için ($DR < \%40$) α -CSR ilişkisi.....	80
Şekil 4.3. Farklı rölatif sıklıktaki zeminler için $K\alpha$ - α ilişkisi.....	81
Şekil 4.4. ϕ_{peak} - ϕ_{cs} tahmininde rölatif sıklığa bağlı olarak IRD'nin kullanılması	82
Şekil 4.5. ξR ile bağıntılı olarak geliştirilen $K\sigma - (\sigma'/Pa)$ ilişkisi	85
Şekil 4.6. $K\sigma - (\sigma'/Pa)$ ilişkisinde çalışmaların karşılaştırılması	86
Şekil 4.7. Aşırı konsolidasyon oranı ile KOOCR arasındaki ilişki.....	87
Şekil 4.8. Tipik deprem spektrumları ile $S_a/amaks=2,4$ sivilaşma sınır hattının gösterimi.....	88

Şekil 4.9.	Yüklenmiş olan dikdörtgen alan için Newmark çözümü	89
Şekil 4.10.	2x2 m2 boyutundaki temelde taban gerilmesinin 50 kPa (a), 100 kPa (b) ve 200 kPa (c) olduğu durumda F _{Syapı/arazi} 'nin derinlikle değişimi	91
Şekil 4.11.	10x10 m2 boyutundaki temelde taban gerilmesinin 50 kPa (a), 100 kPa (b) ve 200 kPa (c) olduğu durumda F _{Syapı/arazi} 'nin derinlikle değişimi	91
Şekil 4.12.	25x25 m2 boyutundaki temelde taban gerilmesinin 50 kPa (a), 100 kPa (b) ve 200 kPa (c) olduğu durumda F _{Syapı/arazi} 'nin derinlikle değişimi	92
Şekil 4.13.	Referans derinlik için serbest arazi koşullarında ve yapı etkisi altında rd katsayısının şematik gösterimi	93
Şekil 4.14.	M _w = 6.0 için temel köşesi (a), kenar orta noktası (b) ve temel orta noktası (c) altındaki zeminde q=70 kPa ve q=140 kPa olması durumunda derinlik-rd ilişkisi	94
Şekil 4.15.	M _w = 7.5 için temel köşesi (a), kenar orta noktası (b) ve temel orta noktası (c) altındaki zeminde q=70 kPa ve q=140 kPa olması durumunda derinlik-rd ilişkisi	94
Şekil 4.16.	M _w = 8.5 için temel köşesi (a), kenar orta noktası (b) ve temel orta noktası (c) altındaki zeminde q=70 kPa ve q=140 kPa olması durumunda derinlik-rd ilişkisi	95

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. α ve β katsayılarının değer aralığı.....	13
Tablo 2.2. Olasılıksal sıvılaşma analizinde kullanılan regresyon katsayıları	15
Tablo 2.3. Olasılıksal yaklaşımla belirlenen MSF katsayısı.....	20
Tablo 2.4. Deprem moment büyüklüğüne göre önerilen MSF katsayıları.....	21
Tablo 2.5. SPT deneyinde enerji düzeltmesi katsayısı (CE)	22
Tablo 2.6. SPT deneyinde kuyu çapı düzeltmesi (CB).....	23
Tablo 2.7. SPT deneyinde tij uzunluğu düzeltmesi (CR).....	23
Tablo 2.8. SPT deneyinde numune alıcı düzeltmesi (Cs)	23
Tablo 2.9. Düzeltilmiş SPT darbe sayısına göre yapılarda beklenen hasar durumları	26
Tablo 2.10. N1,60 için ince dane oranı düzeltmesi yapılmasında önerilen katsayılar	28
Tablo 2.11. (N1,60)cs'ye göre zemin sıvılaşma olasılığı.....	30
Tablo 2.12. SPT darbe sayısı için ince dane oranına göre düzeltme katsayıları	30
Tablo 2.13. CPT deney verileri ile elde edilebilen parametreler	33
Tablo 2.14. İnce dane oranına göre zemin kritik kayma dalgası hızları	45
Tablo 2.15. SPT, CPT ve Vs metotlarının sıvılaşma analizinde kullanımının karşılaştırılması	46
Tablo 2.16. Polito tarafından önerilen sıvılaşma koşulları.....	50
Tablo 2.17. Bray vd. tarafından önerilen sıvılaşma koşulları.....	51
Tablo 2.18. İnce daneli zeminler için önerilen analiz yöntemlerinde kullanılan parametreler	57
Tablo 4.1. Dane türüne göre Q katsayısının aldığı değerler.....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$(N_{1,60})_{CS}$: İnce dane düzeltmesi yapılmış SPT darbe sayısı
a_{maks}	: Maksimum yer ivmesi
c	: Kohezyon
C_B	: Kuyu çapı düzeltme faktörü
C_E	: Enerji düzeltme faktörü
C_N	: Jeolojik yük düzeltme faktörü
C_q	: Konik uç direnci normalleştirme katsayısı
C_R	: Tij uzunluğu düzeltme faktörü
C_S	: Numune alıcı düzeltme faktörü
C_U	: Üniformluk katsayısı
C_V	: Kayma dalgası hızı efektif yük düzeltmesi katsayısı
D	: Odak derinliği
D_R	: Rölatif sıklık
E	: Elastisite modülü
f_s	: Sürtünme oranı
g	: Yer çekimi ivmesi
G	: Zemin kayma modülü
I_C	: Zemin davranış türü katsayısı
I_q	: Etki faktörü
I_{RD}	: Rölatif genişleme indeksi
K_0	: Toprak basıncı katsayısı
K_C	: Sıvılaşma faktörü
K_{OCR}	: Aşırı konsolidasyon oranı düzeltme faktörü
K_S	: Plastik zemin düzeltme faktörü
K_α	: Statik kayma gerilmesi düzeltme faktörü
K_σ	: Çevre gerilmesi faktörü
M_W	: Deprem moment büyüklüğü
$N_{1,60}$: Düzeltilmiş SPT darbe sayısı
N_1	: Efektif yük düzeltmesi yapılmış SPT darbe sayısı
N_{arazi}	: Ham SPT darbe sayısı
$N_{\text{çev}}$: Deprem çevrim sayısı
N_{eq}	: Sıvılaşmanın tetiklendiği çevrim sayısı
P_a	: Atmosfer basıncı
P_L	: Sıvılaşma olasılığı
$q_{C,1}$: Düzeltilmiş konik uç direnç
q_C	: Konik uç direnci
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
R	: Sismik kaynağa olan mesafe
r_d	: Gerilme azalım faktörü
$r_{u,t}$: Aşırı boşluk suyu basıncı oranı
S_a	: Spektral ivme
τ_1	: Zeminin deprem öncesinde sahip olduğu kayma dayanımı
τ_2	: Zeminin deprem sonrasında sahip olduğu ikincil kayma dayanımı
τ_f	: Kayma dayanımı
$\tau_{maks,d}$: Deforme olabilen zeminde maksimum kayma gerilmesi
$\tau_{maks,r}$: Rijit kabul edilen zeminde maksimum kayma gerilmesi

τ_s	: Zeminin statik koşullarda bulunması için gerekli olan kayma dayanımı
u	: Boşluk suyu basıncı
v	: Poisson oranı
$V_{s,1}$: Düzeltilmiş kayma dalgası hızı
$V_{s,1c}$: Kritik kayma dalgası hızı
V_s	: Kayma dalgası hızı
W	: Yapının ağırlığı
W_N	: Aşırı boşluk suyu basıncı
w_n	: Doğal su muhtevası
z_f	: Zeminde hesap derinliği
α	: Sıvılaşma faktörü katsayısı
β	: Sıvılaşma faktörü katsayısı
γ	: Doğal zemin birim hacim ağırlığı
γ_n	: Eşik çevrimsel birim deformasyon
γ_{tv}	: Eşik kayma birim deformasyon
Δu	: Aşırı boşluk suyu basıncı
Δz	: Derinlik farkı
$\Delta \sigma$: İlave düşey gerilme
η	: Kum etki katsayısı
ξ	: Durum parametresi
ξ_R	: Rölatif durum parametresi
σ_m'	: Ortalama efektif gerilme
σ_{v0}	: Başlangıç anındaki toplam düşey zemin gerilmesi
σ_{v0}'	: Başlangıç anındaki efektif düşey zemin gerilmesi

Kısaltmalar

CPT	: Cone Penetration Test (Konik Penetrasyon Deneyi)
CRR	: Cyclic Resistance Ratio (Çevrimsel Dayanım Oranı)
CSR	: Cyclic Stress Ratio (Çevrimsel Gerilme Oranı)
FC	: Fine Content (İnce Dane İçeriği)
FS	: (Factor of Safety) Güvenlik sayısı
İDO	: İnce Dane Oranı
LI	: Likidite İndisi
LL	: Likit Limit
MSF	: Magnitude Scaling Factor (Büüklük Düzeltme Faktörü)
OCR	: Over Consolidation Ratio (Aşırı Konsolidasyon Oranı)
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
SPT	: Standard Penetration Test(Standart Penetrasyon Deneyi)

SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA VE DÜŞEY GERİLME ARTIŞI ETKİSİNDE SIVILAŞMA ANALİZİ

ÖZET

Sismik yük etkisiyle, permeabilitesi düşük ve plastik olmayan zeminlerde boşluk suyu basıncında meydana gelen artış sonucunda zemin dayanımında geçici süreliğine bir kayıp yaşanması sismik zemin sıvılaşması olarak tanımlanmıştır. 1964 yılında meydana gelen ve büyük hasarlara neden olan Alaska ve Niigata depremleri sonrasında sıvılaşma olayı büyük ilgi görmüş ve etkin bir biçimde çalışılmaya başlanmıştır. Tez kapsamında sıvılaşmanın tetiklenmesi tanımlamak amacıyla geliştirilen metotlardan en çok kullanılanı olan CSR yaklaşımı irdelenmiştir. Sakarya ili çevresinde 1999 Kocaeli depremi sonrasında zemin hasarları gözlenmiş olan 4 sahanın SPT ve CPT verileri ele alınmıştır. Öncelikle serbest arazi koşullarında SPT tabanlı sıvılaşma analizi adı altında, Seed vd. (1971), Toprak vd. (1999), Youd vd. (2000) ve Liao vd. (1988) tarafından önerilen eğriler ile elde edilen CRR sonuçları kıyaslanmıştır. Bu inceleme ile en emniyetli sonuçlara Youd vd.(2000) tarafından önerilen eğri ile ulaşılmıştır. Ardından aynı arazi koşulları için; Robertson (1998), Juang (2003), Toprak vd. (1999) ve Shibata vd.(1995) tarafından önerilen eğriler kullanılarak CPT değerleri ile elde edilen CRR değerleri karşılaştırılmıştır. Arazide yapı varlığı, sıvılaşma potansiyeli üzerinde olumlu ve olumsuz olarak etkilemektedir. 5 temel etkiden biri düşey gerilme artışı, referans derinlik için çevrimsel gerilme oranını etkilemektedir. Yapı kaynaklı düşey gerilme artışının CSR ve r_d faktörü üzerindeki etkileri senaryo koşullar için ele alınmış ve birbirinden bağımsız olarak incelenmiştir. Zeminde ilave düşey gerilmelerin CSR ve r_d katsayısını azaltarak sıvılaşma dayanımını olumlu olarak etkilediği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CSR, Düşey Gerilme Artışı, Gerilme Azalım Faktörü, Zemin Sıvılaşması

LIQUEFICATION ANALYSIS WITH FREE FIELD CONDITIONS AND INDUCED STRESSES

ABSTRACT

Soil liquefaction is defined as a temporary decrement of soil strength as a result of pore water pressure which is increased by seismic load on low permeability and non-plastic soils. The scope of this study is to examine CSR approach which is commonly used from the methods developed to describe the triggering of liquefaction. The SPT and CPT reports of the 4 field where soil damages were observed after the 1999 Kocaeli earthquake around Sakarya province were discussed. SPT based analysis were made with the curves proposed by Seed et. al.(1971), Toprak et. al. (1999), Youd et. al. (2000) and Liao et. al. (1988). The curves suggested by Robertson (1998), Juang (2003), Toprak et al. (1999) and Shibata et al. (1995) were used to compare the CRR values obtained with the CPT results. Structure induced stresses can effect liquefaction potential as positively and negatively. Vertical effective stresses effect cyclic stress ratio for reference depth of soil. The effects of the structure-induced vertical stress on CSR and r_d factor were considered for the scenario conditions and investigated independently of each other. It is found that structure induced stresses cause reduced value of r_d and CSR for the reference depth with respect to the free field conditions.

Keywords: CSR, Vertical Induced Stress, Stress Reduction Factor, Soil Liquefaction

GİRİŞ

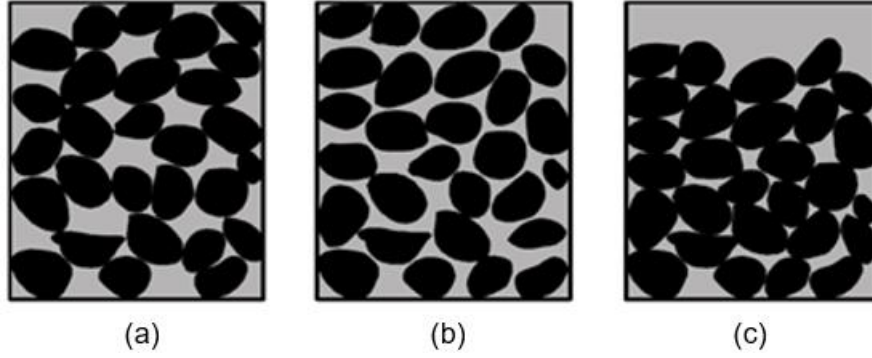
Tarih boyunca gerçekleşen depremlerin verdiği hasarlar, yapılaşmayla beraber artmış ve kayda geçmeye başlamıştır. Bu hasarların nedeni olan sismik tehlikeler; yapısal tehlikeler, sıvılaşma, toprak kaymaları ve tsunami gibi sıralanabilir. Zemin sıvılaşması, deprem sebebiyle yapılarda büyük hasarlara yol açan geoteknik bir olaydır ve sonuçları arasında şev yenilmeleri, yapı temellerinde yenilmeler, yapılarda büyük oturmalar, gömülü yapıların yüzeye çıkmaları bulunmaktadır. Bu sebeple sıvılaşma potansiyelinin önceden belirlenmesi olası can ve mal kaybının önüne geçmek açısından oldukça önemlidir.

Deprem anında zeminin taşıyıcılığında büyük değişimlere neden olan bu olay ilk kez 1925 yılında Terzaghi tarafından tanımlanmıştır. Terzaghi danelerin ağırlıklarının onları çevreleyen suya aktarılması sonucu, zeminin taşıyıcılığını kaybettiğini ifade etmiştir (Castro, 1969). Ancak bu olayın önemi, 1964 yılında 7.6 büyüklüğündeki Niigata-Japonya ve 9.2 büyüklüğündeki Alaska-ABD depremlerinin gerçekleşmesiyle anlaşılmıştır. Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan şartlar, sıvılaşma ölçütleri, oluşum mekanizması ve hesap yöntemleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ülkemizde ise 1999 Kocaeli depremine kadar gerekli ilgiyi görmemiştir. Sakarya nehrinin zaman içinde yatak değiştirmesi ile Adapazarı çevresinde oluşan çökellerin, ince kum ve siltten oluşan kısımlarında sıvılaşma sonucu yıkıcı hasarlar meydana gelmiştir. Bu olayların ardından ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi üzerine çalışılmış ve Adapazarı kriteri oluşturulmuştur (Önalp ve Arel, 2002).

Zeminde yapı olması durumunda derinlik boyunca efektif gerilmelerde ve zemin kayma gerilmesi düzeyinde farklılıklar oluşmaktadır. Serbest arazi koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilen sıvılaşma analizleri, yapı etkisi altındaki zeminin sismik yük altındaki davranışını birebir temsil edememektedir. Gerilme durumlarının gerçeğe en yakın şekilde dikkate alınması, zemin sıvılaşma potansiyeli hakkında daha doğru bir netice elde edilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada zemin sıvılaşmasında kullanılan çeşitli analiz yöntemleri ve yapı yükü ile zeminde oluşacak olan düşey efektif gerilme artışının sıvılaşma potansiyeli üzerine etkisi incelenmiştir.

1. ZEMİN SIVILAŞMASI

Yeraltı suyu seviyesinin altında bulunan düşük permeabiliteli, kohezyonsuz ve plastik limiti düşük olan doymun zeminler deprem gibi tekrarlı yüklemelere maruz kaldığında, suyun boşlukları ivedi bir şekilde terk edememesi nedeniyle, zemindeki boşluk suyu basıncı giderek artar. Boşluk suyu basıncı maksimum değerine ulaştığında zemindeki efektif gerilme sıfır olur. Daneler arasında temas olmaması anlamına gelen bu durumda zemin sıvı malzeme özellikleri gösterir. Suyun boşlukları terk etmesi sonucunda zemin dayanımı azalarak eski özelliklerine geri döner (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Sıvılaşma öncesinde (a), sıvılaşma anında (b) ve sıvılaşma sonrasında zemin daneleri arası etkileşim

1.1.Zemin Sıvılaşmasını Etkileyen Parametreler

Sıvılaşma durumunda boşluk suyu basıncının artışı ve efektif gerilme değerini etkileyecek olan her parametre sıvılaşma direncini etkilemektedir. Zemin sıvılaşma potansiyelini belirleyen faktörler 2 başlık altında toplanmaktadır; zemin parametreleri ve deprem parametreleri.

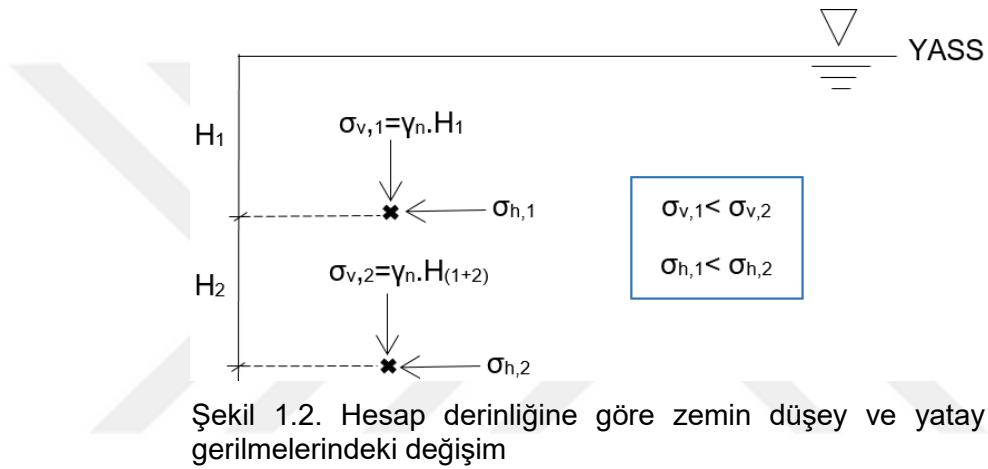
1.1.1.Zemin parametreleri

Zeminin göçmeye maruz kalmadan karşılayabileceği en büyük kayma gerilmesi kayma dayanımıdır. Zemin dayanımının (τ_f) artmasını sağlayacak olan tüm sıvılaşma riskini azaltmaktadır,

$$\tau_f = c + \sigma_1 \cdot \tan\phi$$

Zemin kayma gerilmesi düzeyinin artması ile zemin dayanımı azalmaktadır. Deprem etkisiyle zeminde oluşacak olan maksimum kayma gerilmesinin etkisiyle zemin statik denge koşullarını sağlamakta zorlanmaktadır. Bu nedenle zemin kayma gerilmesi düzeyi arttıkça sıvılaşma dayanımı azalmaktadır.

Hesap derinliği boyunca zeminde farklı gerilme durumları gözlenir. Jeolojik yük nedeniyle derinlik arttıkça zemindeki düşey ve yatay gerilme artmaktadır. Daha büyük çevre basıncı değerleri daneler arası yük aktarımının artması ile ilişkilidir. Bu nedenle daha derin zemin noktalarında zemin dayanımı artar ve sıvılaşma riski azalır. Şekil 1.2'de farklı derinlikler için zemin dayanımının derinlikle değişimi gösterilmiştir.



Zeminin dayanım özellikleri birim hacim ağırlık ile doğrudan ilişkilidir. Zemin birim hacim ağırlığı (γ_n) zemin türü boşluk oranı ve su içeriğine bağlı olarak farklılık göstermektedir. γ_n arttıkça zemin dayanımı artmakta ve sıvılaşma ihtimali azalmaktadır.

Sıvılaşma analizleri zemin tabaka koşulları ile doğrudan ilişkilidir. Sismik yükün etkimesi sonucunda suyun boşlukları terk edebilmesi için drenaj koşullarının sağlanması gerekmektedir. Tabaka koşullarından bağımsız olarak incelendiğinde sıvılaşması beklenmeyen bir zemin (örneğin; iri kum), geçirimsiz tabakalarla sınırlandırılması durumunda suyun boşlukları terk edememesi ile sıvılaşacaktır (Şekil 1.3). Bu nedenle sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde sınır koşulları dikkate alınmalıdır.



Şekil 1.3. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde tabaka koşullarının etkisinin gösterimi

Zemin sıvılaşması gevşek durumdaki zeminlerde gözlenmektedir. Rölatif sıklığı (D_r) %35'ten küçük olan zeminler gevşek, %15'ten küçük olan zeminler ise çok gevşek olarak sınıflandırılmaktadır. Zeminin gevşek durumda ve üniform dane dağılımında oluşmasına neden olacak olan jeolojik süreç sıvılaşma potansiyelini etkilemektedir. Farklı etkenlerle oluşmuş olan gevşek, genç ve üniform çökeller sıvılaşmaya en uygun zeminlerdir.

Sıvılaşma anında daneler arasındaki etkileşim dane şekline göre farklılık göstermektedir. Yuvarlak danelere sahip zeminler köşeli danelilere kıyasla sıkılaşmaya daha yatkındır. Yuvarlak daneli zeminler sıvılaşmanın diğer koşullarının sağlanması durumunda sismik zemin sıvılaşmasına imkân sağlamaktadır.

Küçük depremler gevşek zeminlerin sıkılaşmasına katkıda bulunmaktadır. Gerilme geçmişi incelendiğinde, öncesinde sıkılaşmaya neden olacak yüklere maruz kalan zeminlerin sıvılaşma direnci daha fazla olacaktır.

Yeraltı su seviyesinin yüzeye yakınlığı, zaman içinde yükselip alçalması ve tabakalar arasındaki akışı hidrojeolojik etkenlerdir. Yeraltı suyunun yüzeye yakın olduğu zeminler sıvılaşmaya karşı daha duyarlıdır.

1.1.2.Sismik parametreler

Sıvılaşmanın tetikleyicisi olan tekrarlı yükler deprem ile oluşur. Bu sebeple gerçekleşen depremin özellikleri sıvılaşma potansiyelini doğrudan etkilemektedir. Depremin büyüklüğü (M_w), odak derinliği (R), maksimum yer ivmesi (a_{max}), süresi ve çevrim sayısı (N_{cev}) zeminde oluşacak olan yükün özelliklerini belirler. Sıvılaşmaya

karşı duyarlılık depremin büyüklüğü ve süresi ile orantılı olarak artar. Odak derinliğinin artması ise zeminin sıvılaşma riskini azaltmaktadır.

Ön değerlendirme yapılacak olan arazinin deprem merkezüssüne olan mesafesi önemlidir. R mesafesi azaldıkça arazide gözlenecek olan a_{max} artmakta ve sıvılaşma dayanımı azalmaktadır. Merkezüssüne aynı mesafede bulunan iki farklı arazide farklı a_{max} ölçülebilir. Yumuşak ve tabakalı zeminlerde taban kayadakininden daha büyük yatay ivmelere ulaşılır. Zemin büyütmesi olarak adlandırılan bu durum sıvılaşma potansiyeli belirlenirken dikkate alınmalıdır.

1.2.Zemin Sıvılaşmasının Oluşum Aşamaları

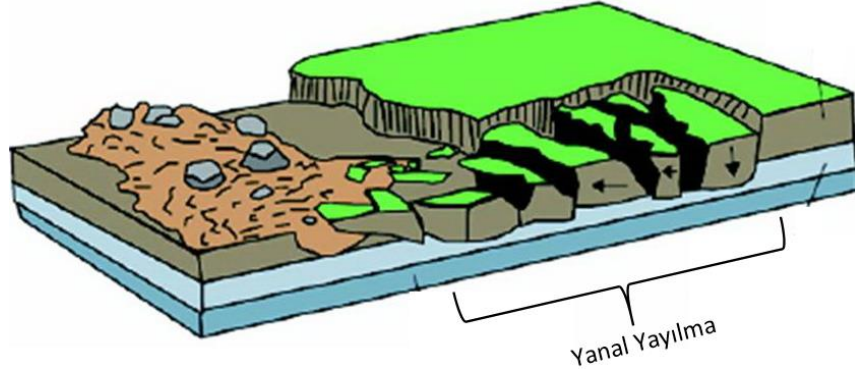
Drenajın gerekli oranda sağlanamadığı durumlarda doymuş zeminlerde gerçekleşen zemin sıvılaşmasının iki çeşidi vardır. Bunlar akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketliliktir. Akma sıvılaşması daha seyrek olarak gözlenmesine rağmen daha büyük hasarlara neden olmaktadır.

1.2.1.Akma sıvılaşması

Deprem öncesinde zemin statik durumda iken bir kayma direncine sahiptir (τ_1). Bu direnç zeminin statik durumda kalabilmesi için gerekli olan kayma dayanımdan (τ_s) büyük veya ona eşittir ($\tau_s \leq \tau_1$). Depremle zeminde sismik yükler nedeniyle oluşan sıvılaşma anında zemin bu dayanımını yitirir. Boşluk suyunun normale dönmesiyle beraber zemin tekrar bir kayma dayanımına sahip olur (τ_2). Bu ikincil dayanım genelde ilk dayanımdan düşüktür ($\tau_2 < \tau_1$). İkincil dayanımın statik kayma gerilmesinden de küçük olması durumunda akma sıvılaşması olur ($\tau_2 < \tau_s \leq \tau_1$). Bu tür sıvılaşma ile zemin büyük çaplı yer değiştirmeler yapar. Zemin içindeki gerilmeler azalır kayma dayanımı statik dayanıma eşit olduğunda akma sıvılaşması sonlanır (Kramer, 2003).

1.2.2.Çevrimsel hareketlilik

Deprem ile oluşan çevrimsel hareketlilik büyük ve kalıcı zemin deformasyonlarının, yıkıcı hasarların gözleendiği kritik bir zemin durumudur (Şekil 1.4). Statik kayma gerilmesinin (τ_s), sıvılaşma sonrasında zeminin ulaştığı kayma dayanımından (τ_2) küçük olduğu durumda gözlenmektedir ($\tau_s < \tau_2$). Az eğimli ve düz bölgelerde rastlanan bu zemin hasarı kademeli olarak gerçekleşmektedir (Mollamahmutoğlu vd., 2006).



Şekil 1.4. Zeminde çevrimsel hareketlilik ile oluşan yanal yayılma

1.3.Zeminde Sıvılaşma Sonrası Hasarlar

Sismik zemin sıvılaşması sonrasında kritik yapı ve zemin hasarlarının gerçekleşmesi mümkündür. Sıvılaşma ile bina, köprü, baraj, istinat duvarı, iletim hatları gibi inşaat yapılarının tümünde hasar gözlenebilir. Başlıca yapısal hasarlar; taşıma gücü kaybı, istinat yapılarında yenilme, gömülü yapıların yüzeye çıkmasıdır.

Bina temelleri altındaki zeminde efektif gerilmenin sifıra yaklaşmasıyla taşıma gücünde dayanım kaybı olur. Bu durumda deprem sonrasında yapı rijitliğinde bir değişim olmasa da zeminde gerçekleşen taşıma gücü kaybı nedeniyle yapının batması veya devrilmesi mümkündür. Şekil 1.5 ve 1.6'da taşıma gücü kaybı ile gözlenen hasarlara örnekler sunulmuştur.



Şekil 1.5. 1999 Kocaeli depremi sonrasında zeminde taşıma gücü kaybı ile yenilen bir bina



Şekil 1.6. Çin'de taşıma gücü kaybı nedeniyle devrilen 13 katlı binalar

İstinat yapılarında yenilmeler düşey zemin gerilmelerinden ziyade yatay gerilmelerdeki değişimlerle alakalıdır. Boşluk suyu basıncının artmasıyla istinat yapısına etkiyen yanal toprak yükü artmakta ve bazı durumlarda duvar dayanımını aşmaktadır. Aynı zamanda temel zeminindeki güç kaybı da duvar dayanımını olumsuz etkilemektedir. Şekil 1.7'de istinat yapısı yenilmesine örnek verilmiştir.



Şekil 1.7. Avusturya'da bir istinat duvarı yenilmesi

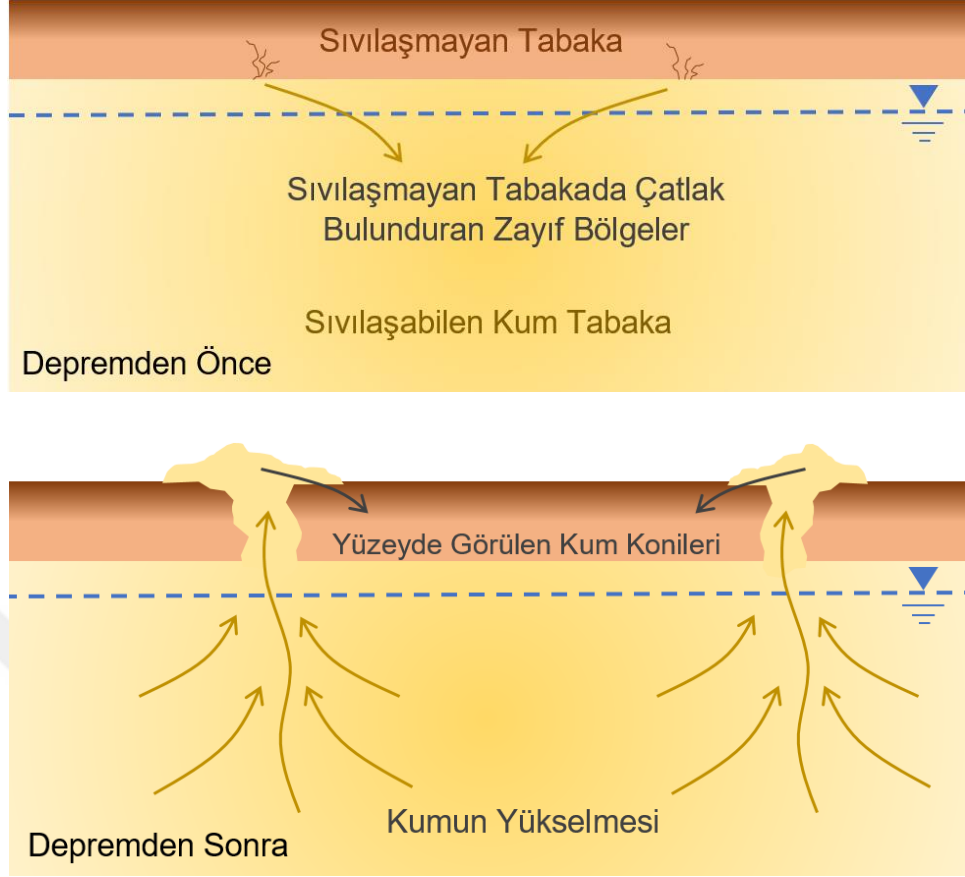
Sıvılaşma anında doymun zeminde, boşluk suyu basıncında meydana gelen artış ile zeminde gömülü şekilde bulunan inşaat yapılarının taban kısmında kaldırma kuvvetinde artış gözlenir. Temele etkiyen tüm kuvvetler dikkate alındığında denge koşullarının aşılmasıyla gömülü yapılar yüzeye yaklaşır ve görünür hale gelir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. 2000 Tottori depreminde gömülü yapı yükselmesi

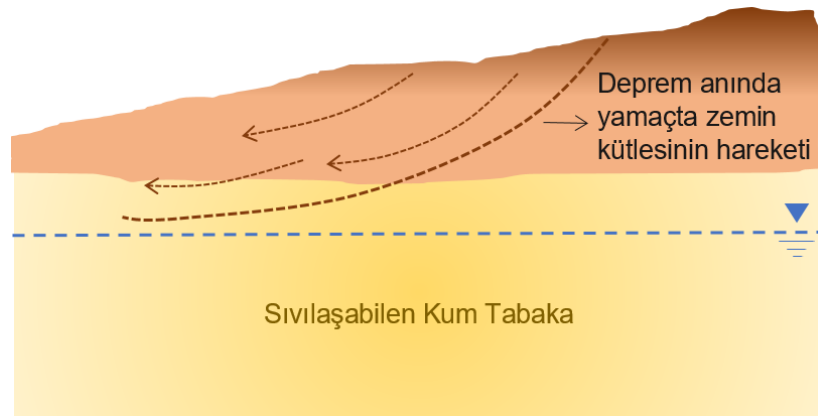
Sıvılaşma gözlenen arazide her zaman yapı bulunmayabilir. Böyle bir durumda maddi bir kayıp olmaz ancak zeminde büyük deformasyonlar ve yenilmeler gözlenir. Kum kaynaması, akma göçmesi ve yanıl yayılma temel zemin hasarlarıdır.

Sismik sıvılaşma çoğunlukla kum zeminlerde gözlenmektedir. Sıvılaşma gerçekleşen kum tabakasının üzerinde sıvılaşmayan eğimsiz bir tabakası olması durumunda yanıl deformasyon gözlenemez. Kum tabakasında gerçekleşen hareketlilik sonucunda sıvılaşmayan tabakanın zayıf bir noktasından çatlaklar oluşur ve kum yüzeye doğru hareket etmeye başlar. Bu zemin durumu kum kaynaması olarak tanımlanmıştır (Mollamahmutoğlu vd., 2006). Kum kaynaması mekanizması Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



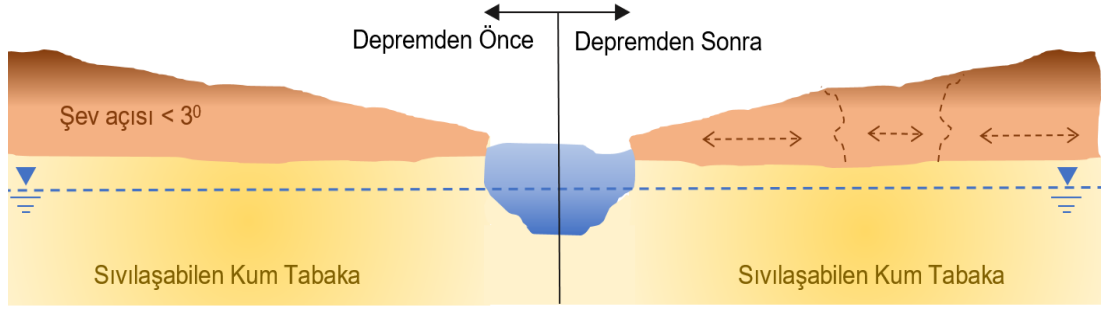
Şekil 1.9. Kum kaynamasının oluşumu

Sıvılaşmaya yatkın zemin tabakası üzerinde, 30° 'den daha büyük eğime sahip yamaçlarda bir zemin kütesinin düşey ve yatay hareketi akma göçmesi olarak tanımlanır. Deprem anında hızlı bir şekilde gelişmekte ve büyük deformasyonlarla sonuçlanmaktadır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Akma göçmesinin oluşumu

Deprem anında, sıvılaşılabilen bir kum tabakasının üzerinde sıvılaşmayan ve eğimi 3° 'den az olan yamaçlarda veya su kenarında bulunan arazilerde yanıl yayılma adı verilen zemin hareketi gözlenebilmektedir. Yanıl yayılma sonucunda birkaç metrelik deformasyon gözlenmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Yanıl yayılmanın oluşumu

2.SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA ZEMİN SIVILAŞMASI ANALİZLERİ

Sismik sıvılaşma deprem nedeniyle can ve mal kaybına neden olabilen bir zemin olayıdır. Deprem bölgelerinde olası hasarları önlemek amacıyla yapı proje aşamasında iken inşa edileceği sahanın zemin özellikleri bir etüt yardımıyla belirlenmektedir. Zemin dane boyutuna göre farklı sıvılaşma analiz yöntemleri belirlenmiştir.

2.1.Sıvılaşma Analizi Yaklaşımları

Zemin sıvılaşma sürecinin işleyişini ve başlangıç anını tahmin etmekte kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Sıvılaşma mekanizmasını kontrol etmek için zemindeki gerilme koşulları, deformasyon durumu, boşluk suyu basıncındaki artış ve efektif gerilmelerde gözlenen değişim kullanılabilir. En yaygın kullanılan analiz metodu çevrimsel gerilme oranı yaklaşımıdır. Ayrıca çevrimsel birim deformasyon yaklaşımı, sönümlenen enerji yaklaşımı, efektif gerilmelere dayalı tepki analizi yaklaşımı ve olasılıksal yaklaşımlar da sıvılaşma analizinde kullanılan çeşitli metotlardır.

2.1.1.Çevrimsel birim deformasyon yaklaşımı

Deprem ile oluşan yükleme koşullarının tanımlanmasında zeminin çevrimsel deformasyon kavramının kullanılması fikri Dobry vd. tarafından 1980'li yıllarda öne sürülmüştür. Sismik yük ile zeminde oluşacak olan sıkılaşmayı deformasyon kavramı ile kontrol etmeyi esas alan metotta, eşik çevrimsel birim deformasyon (γ_t) tanımlanmaktadır. γ_t zeminde yenilmenin gözlenip tüm profilde kaymanın başlangıcına karşılık gelen deformasyon koşuludur (Kramer, 2003). Deneysel veriler sonucunda plastisite indisi arttıkça γ_t 'nin arttığı gözlenmiştir. Eşik çevrimsel birim deformasyon (γ_t) eşik kayma birim deformasyondan (γ_{tv}) yaklaşık 30 kez küçük olduğu yapılan deneyler ile belirlenmiştir,

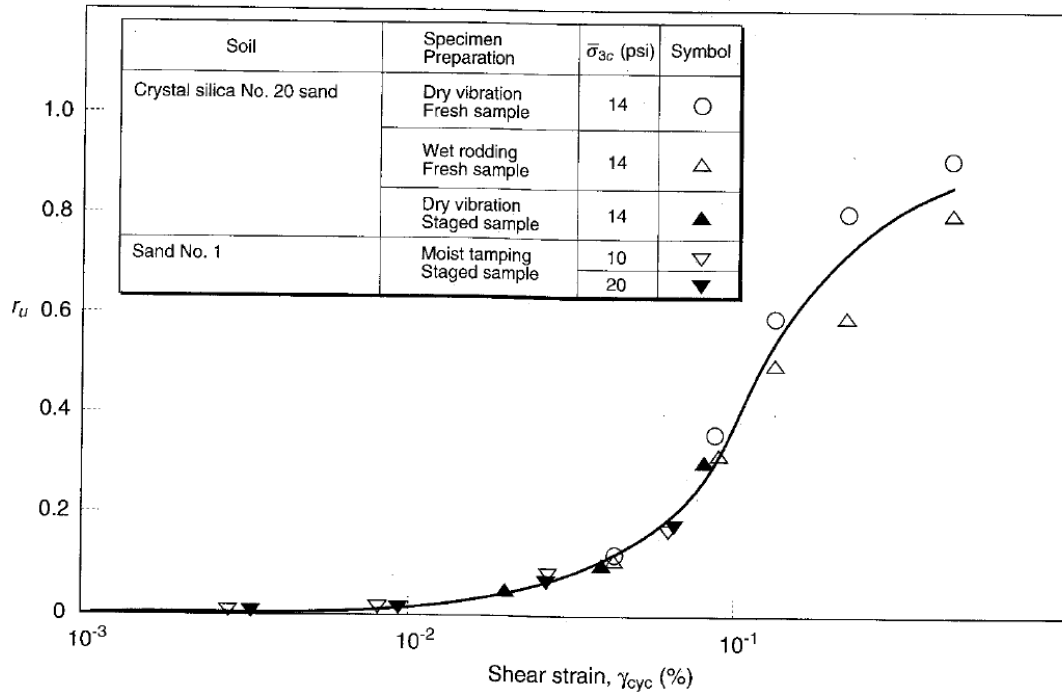
$$\gamma_{tv} = 2,08 \frac{(2-\nu)(1+\nu)}{(1-\nu^2)^{0,5}} E^{\frac{2}{3}} \sigma^{\frac{2}{3}}$$

Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen çevrimsel gerilme genliği kullanılarak çevrimsel birim deformasyonu hesaplamak için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir,

$$Y_{\text{çev}} = 0,65 \frac{a_{\text{max}} \sigma_v r_d}{g G(Y_{\text{çev}})}$$

Burada; $G(Y_{\text{çev}})$ zemindeki birim deformasyonun deprem anındaki çevrimsel birim deformasyona eşit olduğu durumdaki kayma modülüdür.

Deprem ile zeminde oluşacak olan çevrimsel birim deformasyonun, eşik hacimsel birim deformasyondan büyük olduğu koşulda ($Y_{\text{çev}} < \gamma_t$) sıvılaşma gerçekleşir. Deneysel veriler sonucunda $Y_{\text{çev}}$ (%) ile $r_{u,t}$ arasındaki ilişki Şekil 2.1'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. 2 farklı zemin numunesi ele alınarak hazırlanan boşluk suyu basıncı ile çevrimsel birim deformasyon (%) arasındaki ilişki (Kramer, 2003)

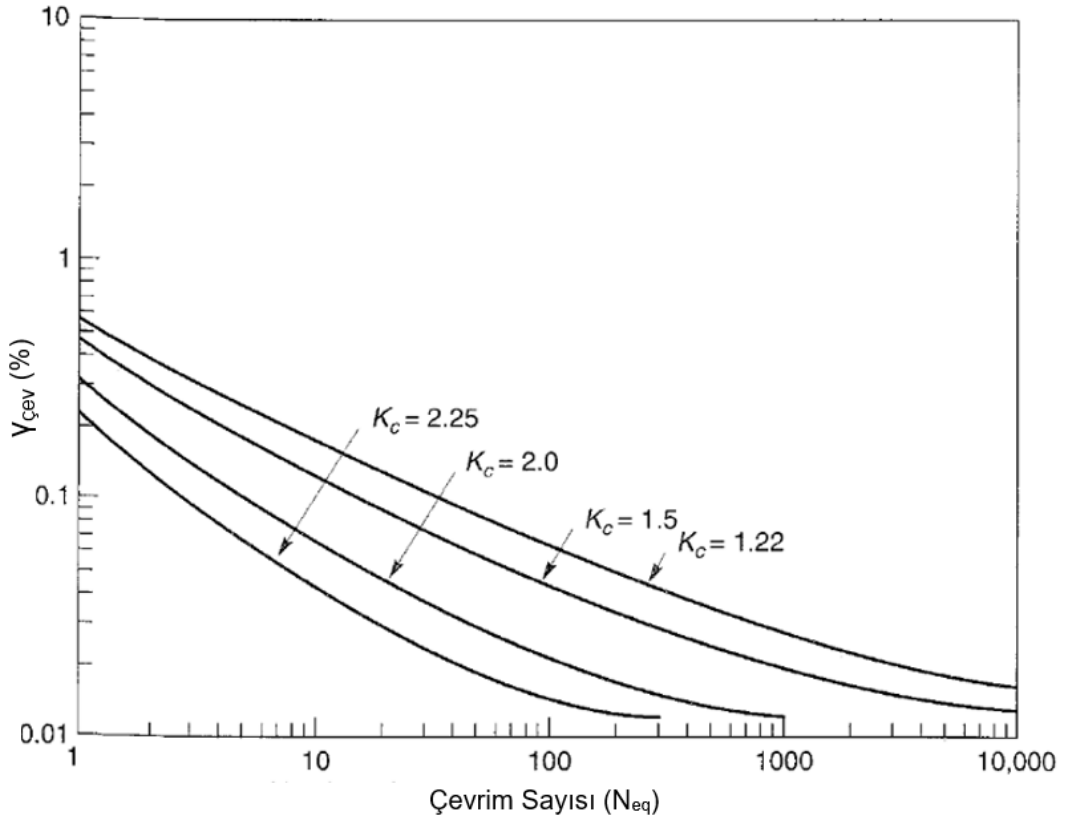
$Y_{\text{çev}}$ (%) ile $r_{u,t}$ arasındaki ilişki aşağıda verilen bağıntı ile belirlenmektedir,

$$Y_{\text{çev}} = 0,01 + \left(\frac{r_{u,t}}{\alpha N_{\text{eq}} (2 - r_{u,t})} \right)^{1/\beta}$$

N_{eq} : Sıvılaşmanın tetiklendiği çevrim sayısı

$r_{u,t}$: Aşırı boşluk suyu basıncı oranı

Sıvılaşma mekanizmasının tanımlanmasında kullanılan K_c faktörünün fonksiyonu olan α ve β , çevrim sayıları ile değişmektedir. Daha önceden sıvılaşma gözlenmiş olan kum zemin numunesinde yapılan deneyler sonucunda K_c - γ_{cev} (%) ilişkisi Şekil 2.2'de gösterilmiş ve α ve β değerleri Tablo 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Sıvılaşma mekanizmasının tetiklenmesine neden olan çevrim sayısı (N_{eq})- çevrimsel birim deformasyon ile K_c arasındaki ilişki (Kramer, 2003)

Tablo 2.1. α ve β katsayılarının değer aralığı

Katsayı	Değer Aralığı
α	$4,78K_c \sim 1,9K_c$
β	$2,96K_c \sim 0,78K_c$

2.1.2.Sönümlenmiş enerji yaklaşımı

Deprem etkisiyle açığa çıkan enerjinin etkisiyle sıvılaşma mekanizmasının tetiklenmektedir. Boşluk suyu basıncının artması ve daneler arası etkileşimin azalması sonrasında su boşlukları terk etmekte ve daneler tekrar denge koşullarını sağlayacak şekilde dizilmektedir. Tüm bu süreçte depremin sebep olduğu sismik enerji kullanılmaktadır. Bu durumda sismik enerjinin sönüm miktarı ile sıvılaşma mekanizması tanımlanmıştır. Sönümlenen enerji çevrimsel gerilme ve çevrimsel deformasyon ile ilişkilidir ve deprem özelliklerine göre değişim göstermektedir.

Yer altı suyunun bulunmadığı zeminlerde, deprem gibi tekrarlı yükleme durumlarında minimum boşluk oranına ulaşarak sıkılaşma eğilimi gözlenmektedir. Doymun zeminlerde tekrarlı yüklemeler boşluk suyu basıncının artmasına sebep olmaktadır. Bu iki durum birlikte dikkate alınarak, drenajlı durumdaki zemin sıkılaşması ve drenajsız durumdaki boşluk suyu basıncı artışı esnasındaki sismik enerjinin sönüm koşulları çalışılmıştır (Nemat-Nasser ve Shokoh, 1979). Aşırı boşluk suyu basıncı ile sönümlenen enerji deneysel verilerle ilişkilendirilmiştir. Burada W_N boyutsuz bir enerji terimidir (Law vd.,1990),

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{v0}} = \alpha W_N^\beta$$

Sönümlenen enerji yaklaşımının kullanılarak sıvılaşma tahmininin yapılmasında deprem özelliklerinin etkisinin dikkate alınmasıyla, deprem anında oluşacak olan aşırı boşluk suyu basıncı aşağıdaki gibi belirlenebilir (Davis ve Berrill, 1982),

$$\Delta u = \frac{450}{R \cdot N_1^2 \cdot (\sigma_{v0}')^{0.5}} 10^{1.5M}$$

R sismik kaynağa olan mesafe (m cinsinden), N_1 efektif yük düzeltmesi yapılmış olan SPT darbe sayısı ve M depremin büyüklüğüdür. Verilen bu bağıntı dikkate alınarak sıvılaşmanın gerçekleşme koşulu (Law, 1990),

$$\frac{10^{1.5M}}{2,28 \cdot 10^{-10} N_1^{11.5} R^{4.3}} \geq 1$$

2.1.3.Efektif gerilme tabanlı tepki analizi yaklaşımı

Sıvılaşma mekanizması sismik yükün etkisiyle zemin efektif gerilmesinin sıfıra yaklaşması ve süre içinde boşluk suyu basıncının normale dönmesi ile efektif gerilmenin tekrar artması esasına dayanır. Zeminin deprem anındaki davranışı gerilme-birim deformasyon şeklinde modellenmesi karmaşık bir durumdur. Bu durum çevrimsel nonlinear gerilme-birim deformasyon modeli ile tanımlanabilmektedir.

Zemin tepki programları kullanılarak, deprem gibi tekrarlı yükler altında zeminde beklenecek olan efektif gerilme ve boşluk suyu basıncının değişimleri araştırılabilmektedir.

2.1.4.İstatistiksel sıvılaşma analizi

Deneysel çalışmalarda aşırı boşluk suyu basıncı oluşum mekanizmasının incelenmesinde kullanılan değişkenlerin olasılıksal karakterizasyonu ile bu analizler yapılmaktadır. Bu deneyler arazi ve laboratuvar koşullarında yapılabilmektedir. Sıvılaşma olasılığının belirlenmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Liao vd., 1988),

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp\left[-\left(\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(\text{CSR}) + \beta_2 (N_1)_{60}\right)\right]}$$

Tablo 2.2'de yukarıdaki eşitlikte kullanılan parametreler sunulmuştur.

Tablo 2.2. Olasılıksal sıvılaşma analizinde kullanılan regresyon katsayıları

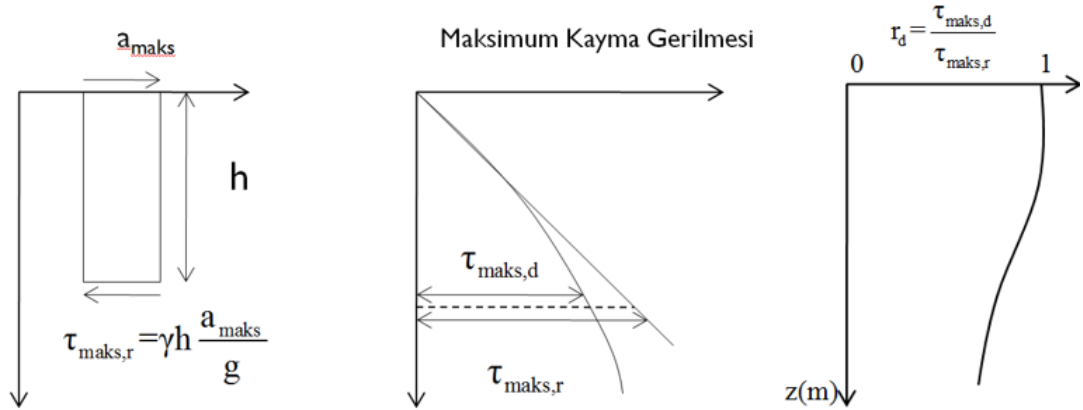
Zemin Türü	β_0	β_1	β_2
Tüm zeminler	10,167	4,1933	-0,24375
Temiz kumlar	16,447	6,4603	-0,39760
Siltli kumlar	6,4831	2,6854	-0,18190

2.1.5.Çevrimsel gerilme oranı yaklaşımı

H.B. Seed tarafından 1960 yıllarında sıvılaşma mekanizmasının başlangıcını tanımlamak için yükleme şartlarının etkisi incelenmeye başlanmıştır. Sıvılaşma potansiyeli sismik yük ile oluşacak olan zemin kayma gerilmesi ile ilişkilendirilmiştir. Deprem etkisiyle meydana gelen çevrimsel kayma gerilmesi, zemin direncini ifade eden çevrimsel kayma gerilmesi ile kıyaslanarak sıvılaşma potansiyeli tahmin edilmektedir.

CSR yöntemi, deprem anında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının çevrimsel kayma gerilmesi ile ilişkilendirilmesini esas almaktadır. Deprem anında yer ivmesinin etkisiyle, rijit kabul edilen bir zemin kolonunda oluşacak olan maksimum kayma gerilmesinin ($\tau_{maks,r}$) tarif edilmesinde kullanılır (Mollamahmutoğlu vd., 2006). Ancak zemin deformasyona uğrayabilen daneli bir malzeme olduğundan, zeminde oluşan gerçek maksimum kayma gerilmesi ($\tau_{maks,d}$) hesaplanandan daha küçük olacaktır. $\tau_{maks,r}$ ile $\tau_{maks,d}$ arasındaki ilişki gerilme azalım faktörü (r_d) ile tanımlanmıştır (Şekil 2.3). Zeminde sismik etkiyle oluşan çevrimsel gerilme oranı (Seed ve Idriss, 1971),

$$CSR=0,65r_d \frac{\sigma_{v0} a_{maks}}{\sigma_{v0}' g}$$



Şekil 2.3. Çevrimsel gerilme oranı yaklaşımının şematik gösterimi

Gerilme azalım faktörünün belirlenmesinde birçok bağıntı önerilmiştir. Eşitliklerin tamamında r_d katsayısının zemin yüzeyinde 1 olduğu ve derinlikler beraber azaldığı görülmektedir.

Liao ve Whitman (1988) tarafından r_d katsayısının belirlenmesi için önerilen eşitlikler,

$$r_d = 1 - 0,00765 \cdot z \quad (z \leq 9,15 \text{ m})$$

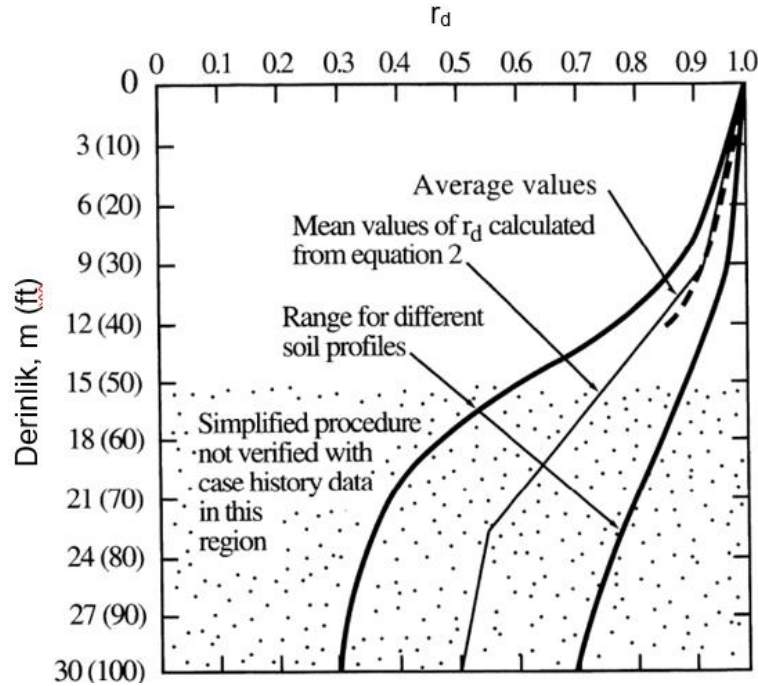
$$r_d = 1,174 - 0,0267 \cdot z \quad (9,15 < z \leq 23 \text{ m})$$

Robertson ve Wride sıvılaşmanın 30 m derinliğe kadar önemli bir zemin olayı olduğunu düşünerek 23 m'den daha büyük derinliklerde r_d katsayısının belirlenebilmesi için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir,

$$r_d = 0,744 - 0,008 \cdot z \quad (23 < z \leq 30 \text{ m})$$

Belli bir derinlikten sonra gerilme azalım faktörünün sabit bir değere ulaştığı varsayılarak William F. Marcuson 30 m'den daha büyük derinliklerde r_d katsayısının 0,5 alınması tavsiye etmiştir. Gerilme azalım faktörünün belirlenmesi için Thomas F. Blake tarafından bir başka bağıntı önerilmiştir. Bu eşitlik Şekil 2.4'te grafik olarak da sunulmuştur,

$$r_d = \frac{1 - 0,4113 \cdot z^{0,5} + 0,04052 \cdot z + 0,001753 \cdot z^{1,5}}{1 - 0,4177 \cdot z^{0,5} + 0,05729 \cdot z - 0,006205 \cdot z^{1,5} + 0,001210 \cdot z^2}$$



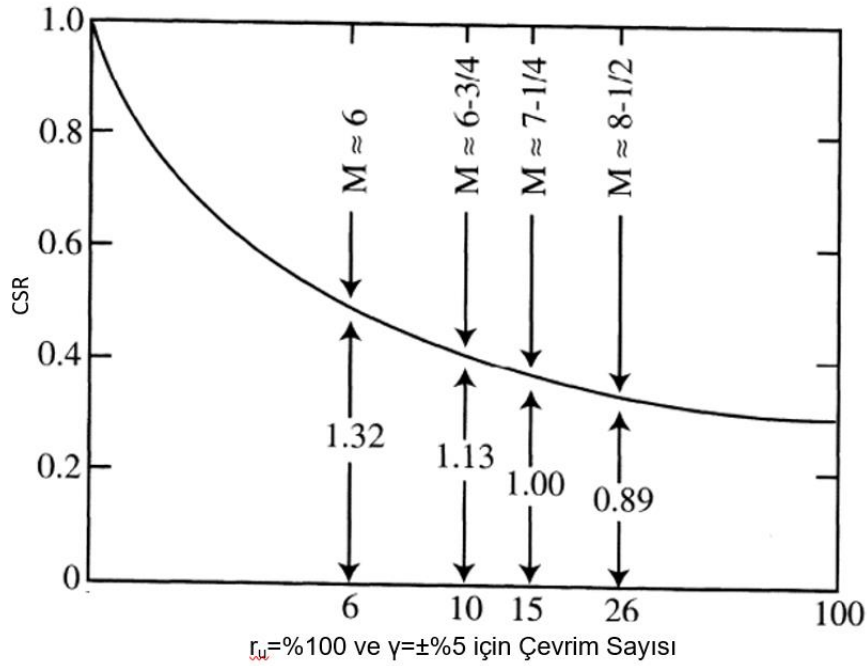
Şekil 2.4. Farklı zemin türlerine göre gerilme azalım faktörünün derinlikle değişimindeki bant aralığı (Youd vd., 1997)

Çevrimsel gerilme oranı yaklaşımında hazırlanan abakların 7.5 moment büyüklüğüne sahip olması, farklı büyüklükte deprem beklenmesi durumunda analiz yapmayı engellemektedir. Bu nedenle hesaplanan çevrimsel gerilme oranını bir katsayı ile düzelterek, büyüklüğü 7.5 olan depremdaki eşdeğeri elde edilmektedir. Büyüklük düzeltme faktörü (MSF) aşağıdaki gibi kullanılmaktadır,

$$FS = \left(\frac{CSR_{7.5}}{CSR} \right) MSF$$

Büyüklük düzeltme faktörü için önerilen bağıntılar ve grafikler aşağıdaki maddelerde sunulmuştur;

- Seed ve Idriss 1982 yılında sınırlı sayıdaki sıvılaşma verilerini kullanarak deprem moment büyüklüğü düzeltme katsayısını çevrim sayısı ile ilişkilendirmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Çevrim sayısı ve CSR ile deprem moment büyüklüğüne göre MSF katsayısı (Youd vd.,1997)

- Idriss, 1982 yılında yapılan çalışma üzerinde yeni incelemeler yaparak düzeltme faktörünün aşağıdaki gibi belirlenmesini önermiştir,

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

Ambraseys (1988) 1980'lerin ortalarına kadar yapılan sıvılaşma analiz verilerini derlemiş ve sıvılaşan ve sıvılaşmayan sahalar için hesaplanan CSR değerleri ile $N_{1,60}$ arasındaki ilişkiyi gösteren yeni eğriler elde etmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen ampirik düzeltme faktörleri Tablo 2.5'te sunulmuştur.

- Arango (1996) büyüklük düzeltme faktörlerini iki set analiz halinde sunmuştur. İlk set, arazinin enerji kaynağına olan mesafesi ve sıvılaşmaya sebep olan enerjinin sönümlenmesi dikkate alınarak hazırlanmıştır. İkinci set için ise sismik enerji kavramı ve Seed ve Idriss tarafından 1982'de önerilen çevrim sayısı-deprem büyüklüğü ilişkisi esas alınarak oluşturulmuştur. Arango tarafından önerilen deprem büyüklüğü düzeltme katsayıları Tablo 2.5'te sunulmuştur.
- Andrus ve Stokoe (1997), kayma dalgası hızına bağlı olarak sıvılaşma potansiyelini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada deprem büyüklüğünün 7.5 olduğu durum için eğriler sunmuştur. Arazide moment büyüklüğü 6, 6.5, 7 ve 7.5 olan depremler için sıvılaşmanın gözlemlendiği ve gözlemlenmediği durumların dikkate alınması ve kayma dalgası hızı-CSR eşitliklerinin kullanılmasıyla farklı deprem senaryoları için grafikler çizilmiştir. Moment büyüklüğü 6'dan küçük ve 7.5'ten büyük olan depremler için MSF aşağıdaki bağıntı ile tahmin edilmektedir,

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7,5} \right)^{-3,3}$$

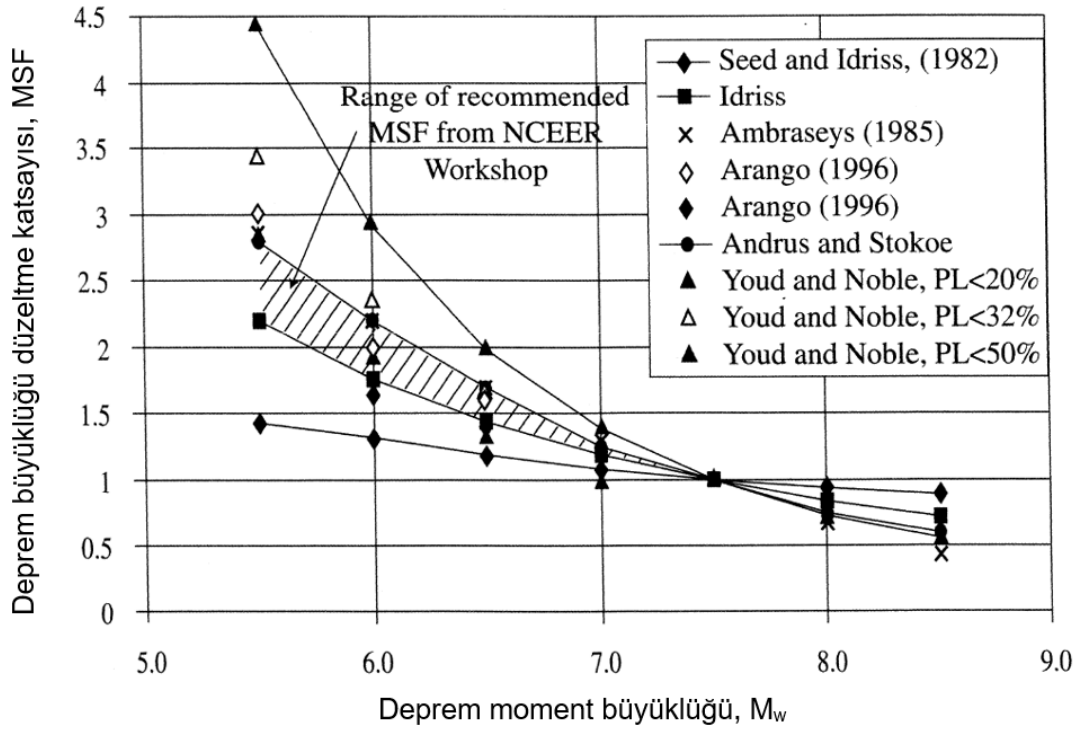
- Youd ve Noble geçmiş depremler sonucunda sıvılaşma gözlenen veya gözlenmeyen arazilerden elde edilen tarihsel verileri kullanarak nümerik bir çalışma yapmışlardır. PL beklenen depremin gerçekleşme olasılığı, 1- PL ise gerçekleşmeme olasılığıdır. $(N_1)_{60,cs}$ düzeltilmiş SPT değeridir. Çalışma sonucunda önerilen bağıntı,

$$\text{logit}(P_L) = \ln \left(\frac{P_L}{(1-P_L)} \right) = -7,633 + 2,256 \cdot M_w - 0,258 \cdot (N_1)_{60,cs} + 3,095 \cdot \ln CRR$$

Youd ve Noble tarafından olasılıksal yöntemle elde edilen MSF değerleri Tablo 2.4'te sunulmuştur. Şekil 2.6'da deprem büyüklüğü düzeltme faktörü için yapılan çalışmaların toplu gösterimi sunulmuştur.

Tablo 2.3. Olasılıksal yaklaşımla belirlenen MSF katsayısı

Gerçekleşme Olasılığı	Bağıntı	Koşul
$P_L < \%20$	$MSF = \frac{10^{3,81}}{M^{4,53}}$	$M_w < 7$
$P_L < \%32$	$MSF = \frac{10^{3,74}}{M^{4,33}}$	$M_w < 7$
$P_L < \%50$	$MSF = \frac{10^{4,21}}{M^{4,81}}$	$M_w < 7.75$



Şekil 2.6. Deprem büyüklüğü düzeltme faktörü için yapılan çalışmaların toplu gösterimi (Youd vd., 1997)

Tablo 2.4. Deprem moment büyüklüğüne göre önerilen MSF katsayıları

M _w	MSF								
	Seed ve Idriss (1982)	Idriss	Ambraseys (1988)	Arango		Andrus ve Stokoe	Youd ve Noble		
				1.Set	2.Set		P _L <%20	P _L <%32	P _L <%50
5.5	1,43	2,20	2,86	3,00	2,20	2,80	2,86	3,42	4,44
6	1,32	1,76	2,20	2,00	1,65	2,10	1,93	2,35	2,92
6.5	1,19	1,44	1,69	1,60	1,40	1,60	1,34	1,66	1,99
7	1,08	1,19	1,30	1,25	1,10	1,25	1,00	1,20	1,39
7.5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			1,00
8	0,94	0,84	0,67	0,75	0,85	0,80			0,73
8.5	0,89	0,72	0,44			0,65			0,56

2.2.İri Daneli Zeminlerde Sıvılaşma Analizi

Elek analizi deney verileri yardımıyla kullanılan TS1500'e göre yapılan zemin sınıflandırılması sisteminde, deney numunesinin %50'den fazlasının 200 no'lu elek (0,075 mm) üzerinde kalması durumunda zemin iri daneli olarak adlandırılır (Holtz vd., 2015). Sıvılaşmaya en yatkın zeminler doygun gevşek ince temiz kumlardır. Bu zeminlerin dayanımlarını belirlemek için arazide yaygın olarak SPT, CPT ve kayma dalgası hızı deneyleri yapılmaktadır. Bu deney verilerine göre zemin sıvılaşma analizleri yapılabilmektedir.

2.2.1. Standart penetrasyon deneyi tabanlı çevrimsel gerilme oranı analizi

Zeminlerin dayanımlarının belirlenmesinde arazi deneyleri sıkça kullanılmaktadır. Bunlardan standart penetrasyon deneyi, ekonomik ve kolay sonuç veren bir deney olduğundan ülkemizde en yaygın olarak kullanılanıdır. Kumlu ve ince daneli zeminlerin dinamik kesme deneyine tabi tutulması ile zemin dayanımının belirlenmesi esas alınır. Deney sonucunda elde edilen N_{arazi} değerinin gerekli olan efektif yük ve enerji düzeltmesi yapıldıktan sonraki hali olan $N_{1,60}$ esas alınarak zemin sınıflaşması analizi yapılmaktadır. $N_{1,60}$ 'ın belirlenmesinde kullanılan katsayılar Tablo 2.6-9'daki gibidir.

$$N_{1,60} = N_{arazi} \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S$$

$$C_N = (P_a / \sigma_{v0}')^{0,5}$$

Tablo 2.5. SPT deneyinde enerji düzeltmesi katsayısı (C_E)

	Tokmak Tipi	ER (%)	C_E
Seed vd. (1984)	Otomatik	78	1,30
	Güvenli	60	1,00
	Halka	45	0,75
Seed vd. (1985)	Halka	45	0,75
	Güvenli	60	1,00
	Trip	100	1,67
Youd ve Idriss (1997)	Halka	30-60	0,50-1,00
	Güvenli	42-72	0,70-1,20
	Otomatik-Trip-Halka	48-78	0,80-1,30
Durgunoğlu vd. (2000)	Güvenli	52-60	0,87-1,00

Tablo 2.6. SPT deneyinde kuyu çapı düzeltmesi (C_B)

Kuyu Çapı (mm)	C_B
65-115	1,00
150	1,05
200	1,15

Tablo 2.7. SPT deneyinde tij uzunluğu düzeltmesi (C_R)

Tij Uzunluğu (m)	C_R		
	Seed vd. (1985)	Skempton (1986)	Youd ve Idriss (1997)
<3	0,75	-	-
3-4	1,00	0,75	0,75
4-6	1,00	0,85	0,85
6-9	1,00	0,95	0,95
>9	1,00	1,00	-
9-30	-	-	1,00
>30	-	-	<1,00

Tablo 2.8. SPT deneyinde numune alıcı düzeltmesi (C_s)

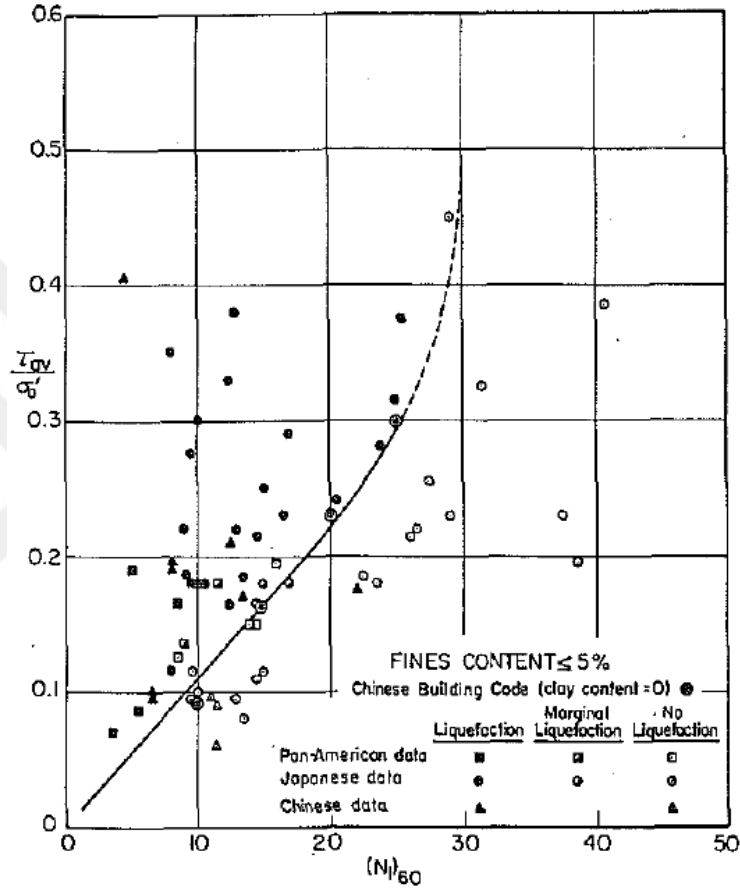
Numune Alıcı	C_s	
	Youd ve Idriss (1997)	Skempton (1986)
Kılıflı	1,00	1,00
Kılıfsız	1,10-1,30	1,20

2.2.1.1. Seed vd. 1971

Deprem nedeniyle oluşacak olan çevrimsel kayma gerilmesini (CSR) belirlemek için kullanılan bağıntı,

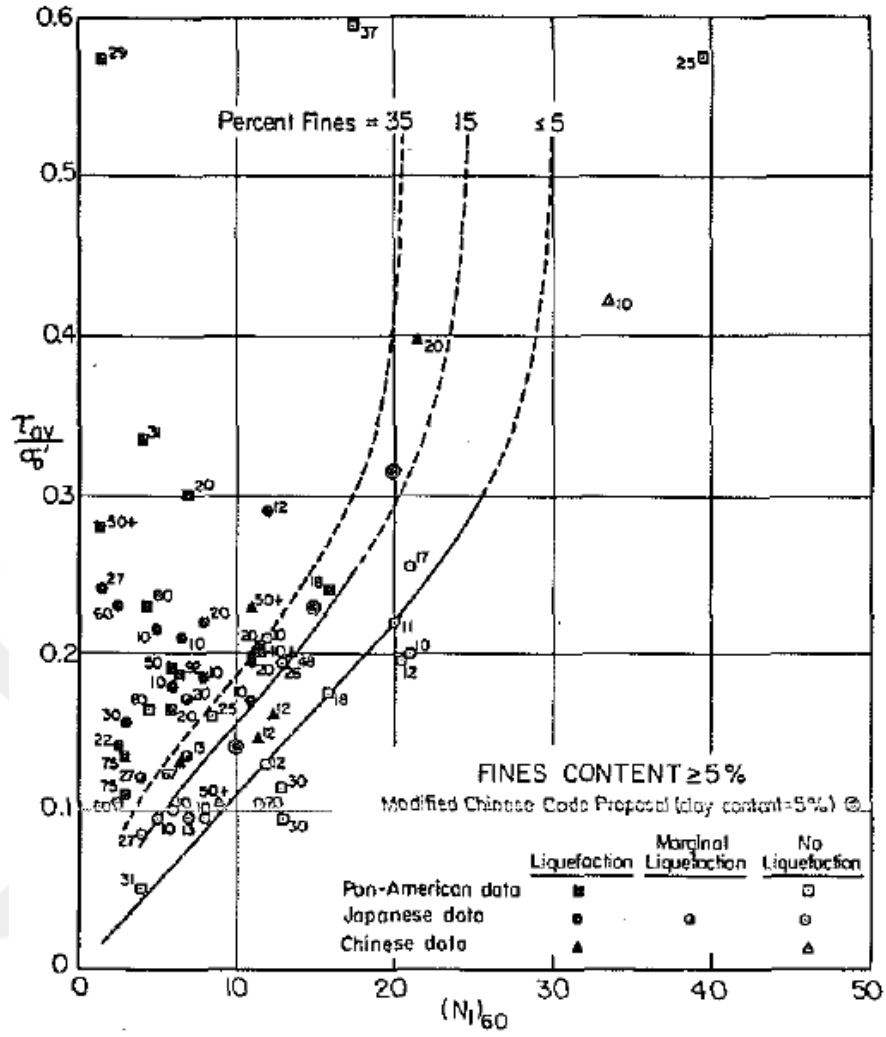
$$\tau_{av}/\sigma'_0 = 0,65 \cdot (a_{max}/g) \cdot (\sigma_0/\sigma'_0) \cdot r_d$$

Eşitlikte r_d derinlik gerilme düzeltme faktörüdür. Bu katsayı yüzeyde 1 iken derinlikle beraber azalır ve 35 m'de 0,9'a ulaşır. Çevrimsel kayma dayanımının belirlenmesinde ince dane içeriği %5'ten az olan zeminler için Şekil 2.7 'deki grafiğin kullanılması önerilmiştir.



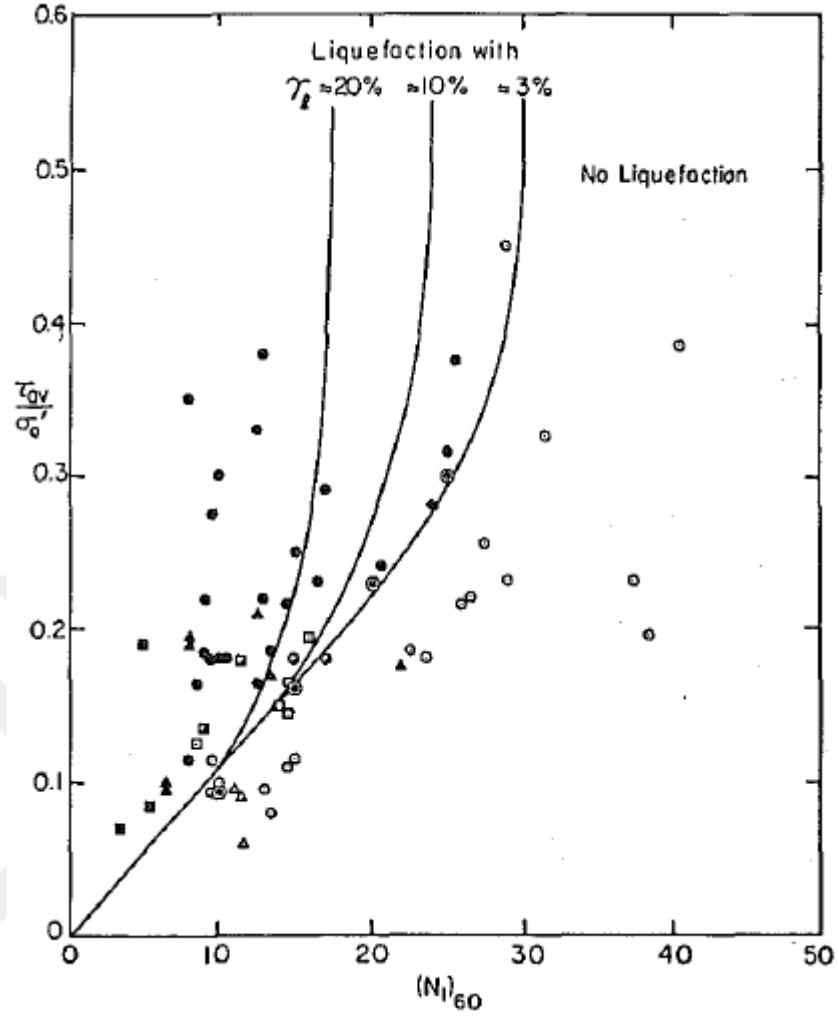
Şekil 2.7. Düzeltilmiş darbe sayısı ve CSR ilişkisi (Seed vd., 1971)

Farklı ince dane içeriğine sahip zeminler için Şekil 2.8'deki grafik geliştirilmiştir.



Şekil 2.8. Farklı ince dane içeriğine sahip zeminler için $N_{1,60}$ – CSR ilişkisi (Seed vd., 1971)

CRR'nin belirlenmesinde kullanılacak olan her iki grafik de 7.5 büyüklüğündeki depremler için tasarlanmıştır. Farklı büyüklükteki depremler için deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı kullanılarak önerilen eğriler kullanılmalıdır. Sıvılaşmanın gözlemlendiği zemin değerleri Şekil 2.9'daki gibi belirlenmiştir.



Şekil 2.9. Sıvılaşma durumunda zeminde gözlenen birim deformasyon değerlerine göre CSR- $N_{1,60}$ ilişkisi (Seed vd., 1971)

Seed ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, $N_{1,60}$ değerlerine göre yapıda beklenen hasarın derecesinin Tablo 2.10'daki gibi olduğu sonucuna varılmıştır.

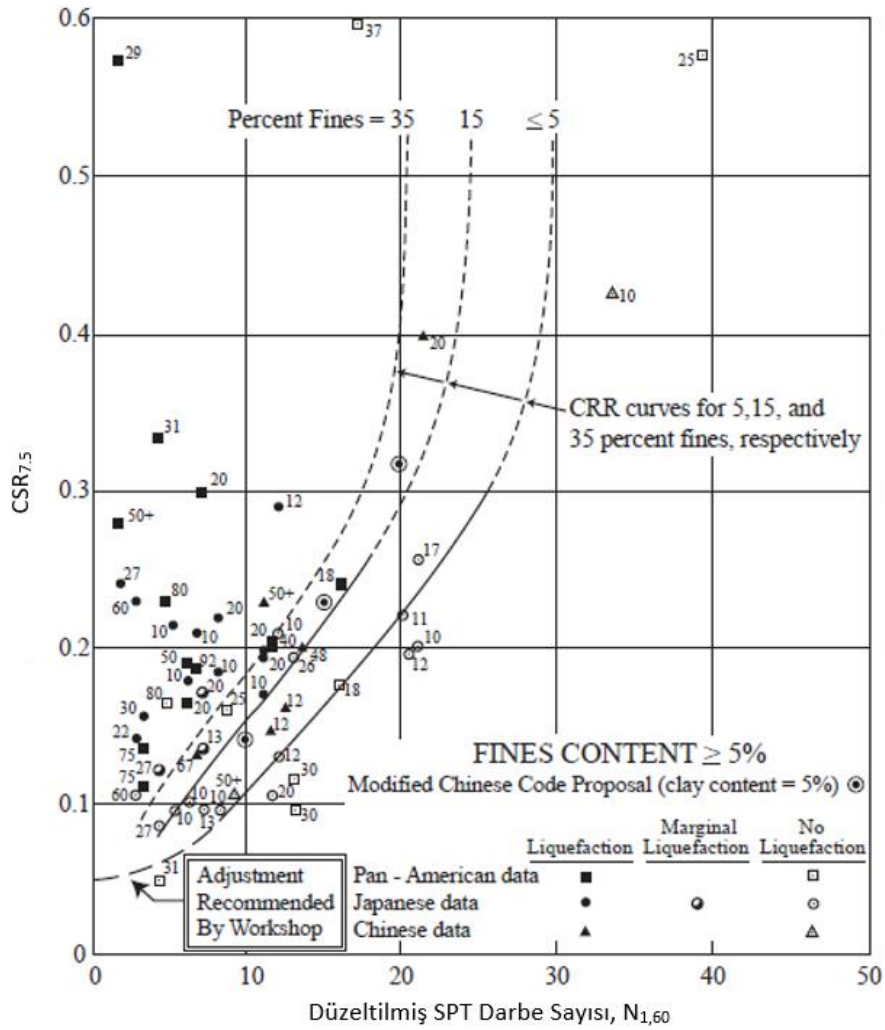
Tablo 2.9. Düzeltilmiş SPT darbe sayısına göre yapılarda beklenen hasar durumları

$N_{1,60}$	Yapıda Beklenen Hasarın Şiddeti
0-20	Yüksek
20-30	Orta seviyede
>30	Çok düşük

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı çevrimsel kayma dayanımının, deprem nedeniyle oluşacak olan çevrimsel kayma gerilmesine oranıdır.

2.2.1.2. Robertson ve Wride 1998

Robertson ve Wride, Seed ve diğerlerinin geliştirdiği $N_{1,60}$ -CSR eğrileri üzerinde çalışılmış ve %5 ince dane içeren zeminler için olan eğrinin üzerinde düzenlemeler yapılmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Robertson ve Wride tarafından önerilen $N_{1,60}$ -CSR_{7.5} eğrileri (Robertson ve Wride, 1998)

Robertson ve Wride (1998) yaptıkları çalışmada elde edilen $N_{1,60}$ 'ın ince dane içeriğine göre düzeltilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Idriss ve Seed tarafından önerilen bağıntı için düzeltme katsayıları Tablo 2.11'deki gibidir,

$$(N_{1,60})_{cs} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

Tablo 2.10. $N_{1,60}$ için ince dane oranı düzeltmesi yapılmasında önerilen katsayılar

İnce Dane İçeriği	α	β
$FC \leq 5$	0	1,00
$5 < FC < 35$	$\exp[1,76 - (190/FC^2)]$	$[0,99 + (FC^{1.5}/1000)]$
$FC \geq 35$	5,00	1,20

Robertson ve Wride (1998) bu çalışmada $(N_{1,60})_{cs}$ için başka bir düzeltme katsayısı önermişlerdir. Bu düzeltme katsayısı plastik olmayan zeminler için kullanıma uygundur. Plastik zeminler için kullanılacak olan K_s daha büyük değerlere ulaşacaktır,

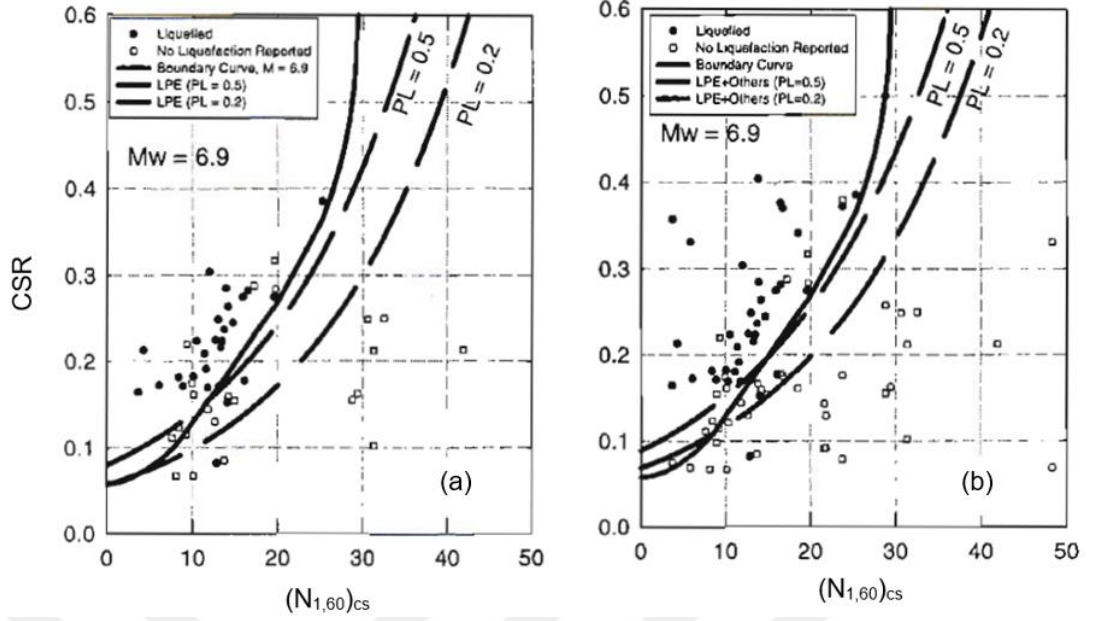
$$(N_{1,60})_{cs} = K_s \cdot N_{1,60}$$

$$K_s = 1 + [(0,75/30)(FC - 5)]$$

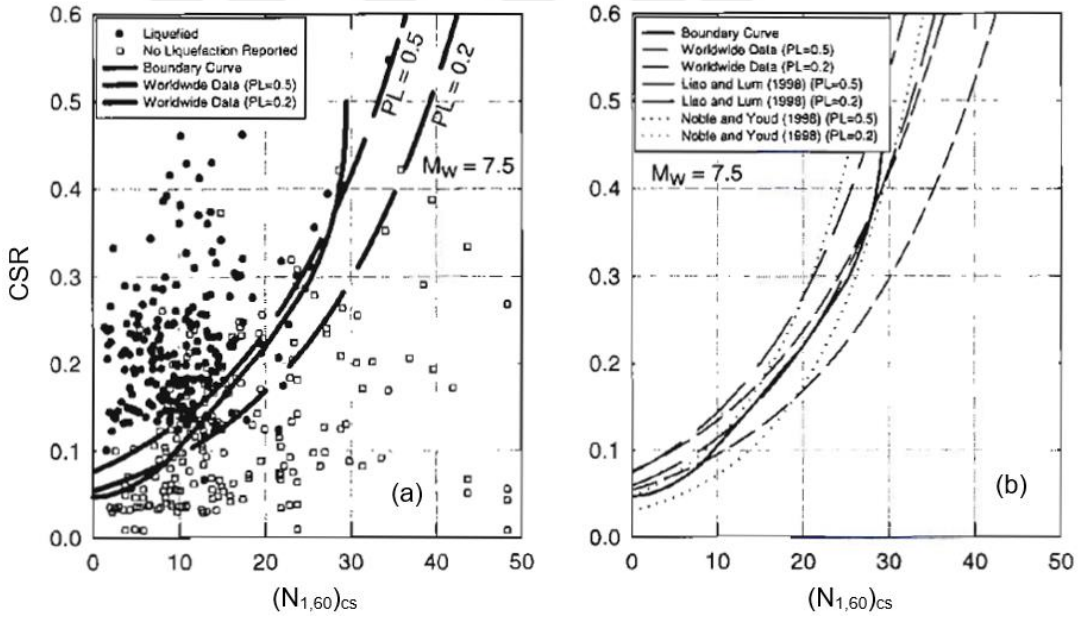
2.2.1.3. Toprak vd. 1999

Toprak ve diğerleri sıvılaşma potansiyeline sahip kumlarda depremle oluşacak olan çevrimsel kayma gerilmesi oranının belirlenmesi için Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen eşitliğin kullanılması tavsiye etmektedir.

1989 Loma Prieta depreminden, Amerika genelindeki ve dünya genelindeki depremlerden elde edilen veriler ile çalışılarak elde edilen $N_{1,60}$ - CSR grafikleri Şekil 2.11'deki gibidir.



Şekil 2.11. 1989 Loma Prieta depremi (a) ve ABD genelinden seçilen depremlere (b) göre olasılıksal $N_{1,60}$ -CSR eğrileri (Toprak vd., 1999)



Şekil 2.12. Dünya genelinden seçilen depremlere göre olasılıksal $N_{1,60}$ -CSR eğrileri (a) olasılıksal eğrilerin karşılaştırılması (b) (Toprak vd., 1999)

Toprak ve diğerleri yaptıkları bu çalışmada probablistik SPT düzeltmesi yapmayı tavsiye etmişlerdir. Şekil 2.12'de 0,5 ve 0,2 olarak belirtilen P_L sıvılaşma olasılığını göstermektedir. $P_L=0,5$ ve $P_L=0,2$ sıvılaşma olasılığının sırasıyla %50 ve %20 olduğu durumları ifade eder. Dünya genelindeki depremler esas alınarak çizilmiş olan olasılıksal sıvılaşma eğrisinde kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir,

$$\text{Logit}(P_L) = \ln [P_L/(1- P_L)] = 10,4459 - 0,2295.(N_{1,60})_{cs} + 4,0573.\ln(\text{CSR}/\text{MSF})$$

Bu eşitlik 7.5 büyüklüğündeki depremler için kullanıma uygundur. Farklı büyüklükteki depremler için de kullanılması Idriss tarafından önerilen MSF düzeltme faktörü ile mümkündür. Dünya genelindeki veriler dikkate alınarak sıvılaşma olasılığı ile $N_{1,60}$ arasında Tablo 2.12'deki gibi bir ilişki kurulmuştur.

Tablo 2.11. $(N_{1,60})_{cs}$ 'ye göre zemin sıvılaşma olasılığı

Sıvılaşma Olasılığı, P_L	$(N_{1,60})_{cs}$
%20	<10
%30	10-15
%40	>15

2.2.1.4. Youd vd. 2000

Sıvılaşma mekanizmasının başlangıcının belirlenmesinde SPT deneyini esas alan bir diğer yaklaşım olan Youd vd. metodu, Seed vd. tarafından 1975 yılında önerilen eğri üzerinde yapılan yenilikleri içermektedir. Zeminde ince dane içeriğine göre sıvılaşma direnci farklılık göstermektedir. Dane içeriği ve özellikleri ile ilgili bir başka zemin parametresi olan plastisite sıvılaşma direncini etkilemektedir. Seed ve Idriss (1996) tarafından önerilen bağıntı, SPT deneyinde ince dane içeriği ile ilgili düzeltmelerin yapılarak temiz kuma eşdeğer darbe sayısının elde edilmesinde kullanılmaktadır,

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

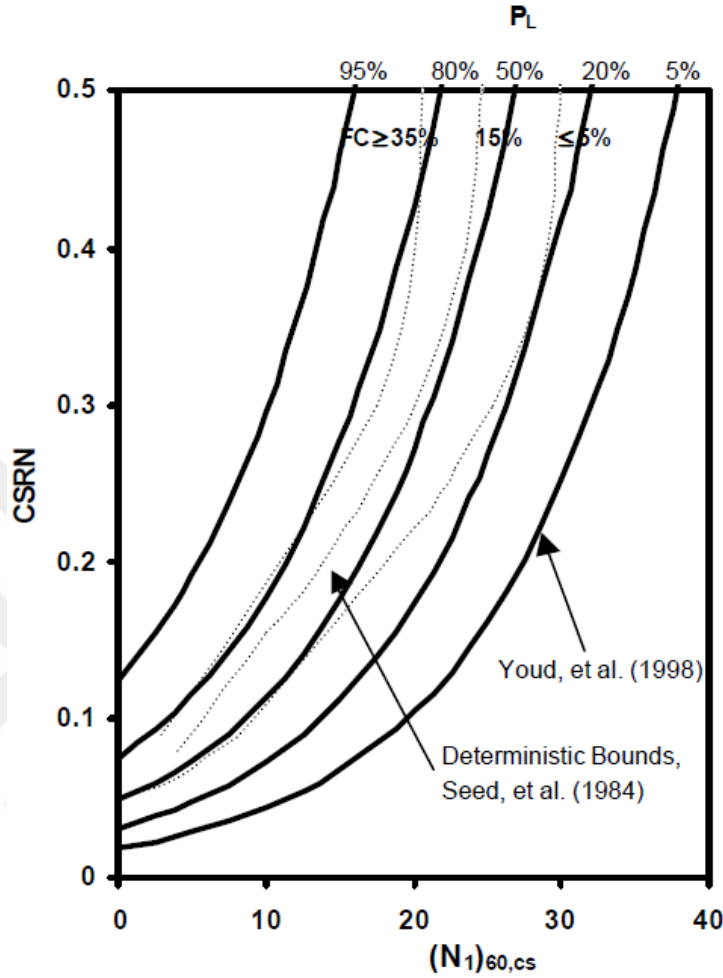
Tablo 2.13 gösterilen α ve β aşağıda belirtilen bağıntılar ile elde edilmektedir.

Tablo 2.12. SPT darbe sayısı için ince dane oranına göre düzeltme katsayıları

	$FC \leq \%5$	$\%5 < FC < \%35$	$FC \geq \%35$
α	0	$\alpha = \exp[1,76 - (190/FC^2)]$	5,0
β	1,0	$\beta = [0,99 + (FC^{1,5}/1000)]$	1,2

Standart penetrasyon deney sonuçlarında yapılan düzenlemeler ile elde edilen temiz kuma eşdeğer darbe sayıları, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde

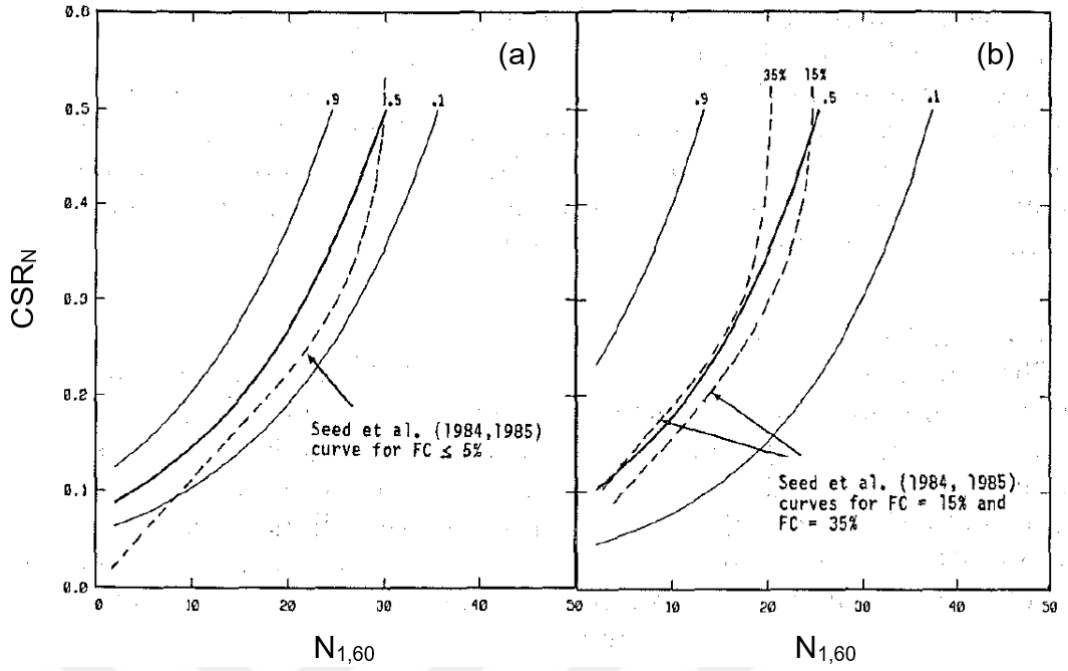
kullanılmaktadır. Youd vd. tarafından olasılıksal yaklaşım dikkate alınarak hazırlanan darbe sayısı-çevrimsel gerilme oranı grafiği Şekil 2.13'teki gibidir.



Şekil 2.13. Youd vd. tarafından önerilen $N_{1,60}$ -CSR eğrileri (Youd vd., 2000)

2.2.1.5. Liao vd. 1988

Zemin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde deterministik ve olasılıksal yaklaşımlar, saha incelemesine dayalı analizler ve istatistiksel metotlar kullanılmaktadır. Liao vd. 1988 yılında, sıvılaşma riskini tanımlayıcı zemin özelliklerini kullanarak istatistiksel regresyon yaklaşımı geliştirmiştir. Yöntemin avantajları, verilerden elde edilen bilgilerin daha nesnel bir şekilde değerlendirilmesi ve elde edilen verilere uygun zemin sıvılaşma potansiyelinin doğrudan belirlenmesi olarak gösterilmiştir. Yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda Şekil 2.14'te sunulan grafikler elde edilmiştir.



Şekil 2.14. Olasılıksal yaklaşımla elde edilen $N_{1,60}$ - CSR_N eğrileri (Liao vd., 1988)

2.2.2. Konik penetrasyon deneyi tabanlı çevrimsel gerilme oranı analizi

CPT zemin özelliklerinin sahada belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan arazi deneylerinden biridir. En yaygın kullanım alanı yumuşak ince daneli zeminler ve gevşek kumlardır. Deney, zemin özelliklerinin numune alınmadan sahada yapılan ölçümler sonucunda belirlenmesini esas almaktadır. Uç açısı 60° olan konik başlıklı silindirik sondanın, 20 mm/sn hızla zemine itilmesi ile konik uçta ve yanal ölçüm hücrelerinde ölçülen kuvvetler ve boşluk suyu basıncı (u) kaydedilmektedir. Deney süresince konik uçta ölçülen kuvvetin kesit alanına oranlanması ile uç direnç (q_c), silindirik sondada yanal yüzeylerdeki ölçüm hücrelerinde elde edilen kuvvetin yanal yüzey alanına oranlanması ile sürtünme direnci (f_s) elde edilmektedir (Youd ve Idriss, 1997). Deneyde elde edilen veriler Tablo 2.14 bağıntılar kullanılarak zemin özelliklerini belirlemede kullanılan parametreler elde edilmektedir.

Tablo 2.13. CPT deney verileri ile elde edilebilen parametreler

	Bağıntı
Konik uç alan faktörü	$a = A_N/A_T = (A_T - A_L)/A_T$
Sonda yüzey alan faktörü	$b = (A_L - A_U)/A_S$
Konik uç direnci	$q_c = F_d/A_T$
Konik uç direnci (düzeltilmiş)	$q_T = q_c + u(1-a)$
Normalleştirilmiş konik uç direnci	$Q_T = (q_T - \sigma_{v0}) / \sigma_{v0}'$
Normalleştirilmiş sürtünme oranı	$F_T = f_s / (q_T - \sigma_{v0})$
Sonda çevre sürtünmesi	$f_s = F_S/A_S$
Sonda çevre sürtünmesi (düzeltilmiş)	$f_T = f_s - [u_2 \cdot b + 0,3 \cdot \Delta u \cdot ((1-a)/15-b)]$
Sürtünme oranı (%)	$R_T = (f_T/q_T) \cdot 100$
Boşluk suyu basıncı oranı	$DPPR = \Delta u/q_T$
Zemin davranış tipi katsayısı	$I_C = [(3,47 - \log Q_T)^2 + (\log F_T + 1,22)^2]^{0,5}$

CPT deneyi ile elde edilen veriler, sıvılaşma analiz metotlarından biri olan çevrimsel gerilme oranı yaklaşımına uyarlanarak zemin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde CPT ölçütlerinin kullanılması, %90'dan daha büyük bir oranda doğru sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır. Youd tarafından 50 farklı saha koşullarından elde edilen CPT ve SPT verileri ile sıvılaşma analizleri yapılmış ve sonuçları kıyaslanmış ve sıvılaşma analizlerinde CPT verilerinin sunduğu sonuçların makul ve tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Konik penetrasyon deneyi diğer arazi penetrasyon deneylerine kıyasla daha tutarlı ve tekrarlanabilir verilere ulaşma imkânı sunmaktadır. Verilerin sıvılaşma analizlerinde kullanılabilmesi için CPT tabanlı analiz düzeltmeleri yapılmalıdır (Seed vd., 2003). Deney sonucunda elde edilen uç direnci (q_c) üzerinde jeolojik yük düzeltmesi aşağıdaki gibi yapılmaktadır,

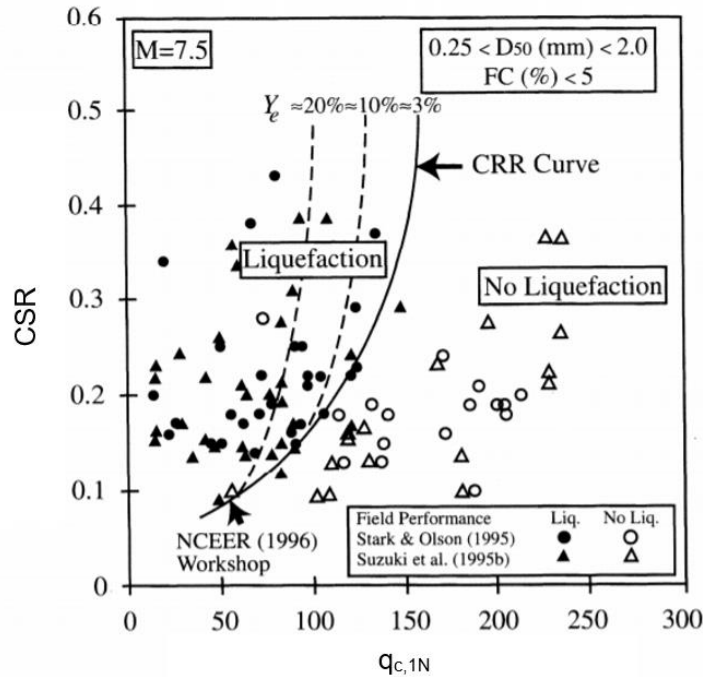
$$q_{c,1} = q_c \frac{1,8}{0,8 + \sigma_{v0}'}$$

$$q_{c,1,N} = C_q \frac{q_c}{P_a}$$

$$C_q = \left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}'} \right)^n$$

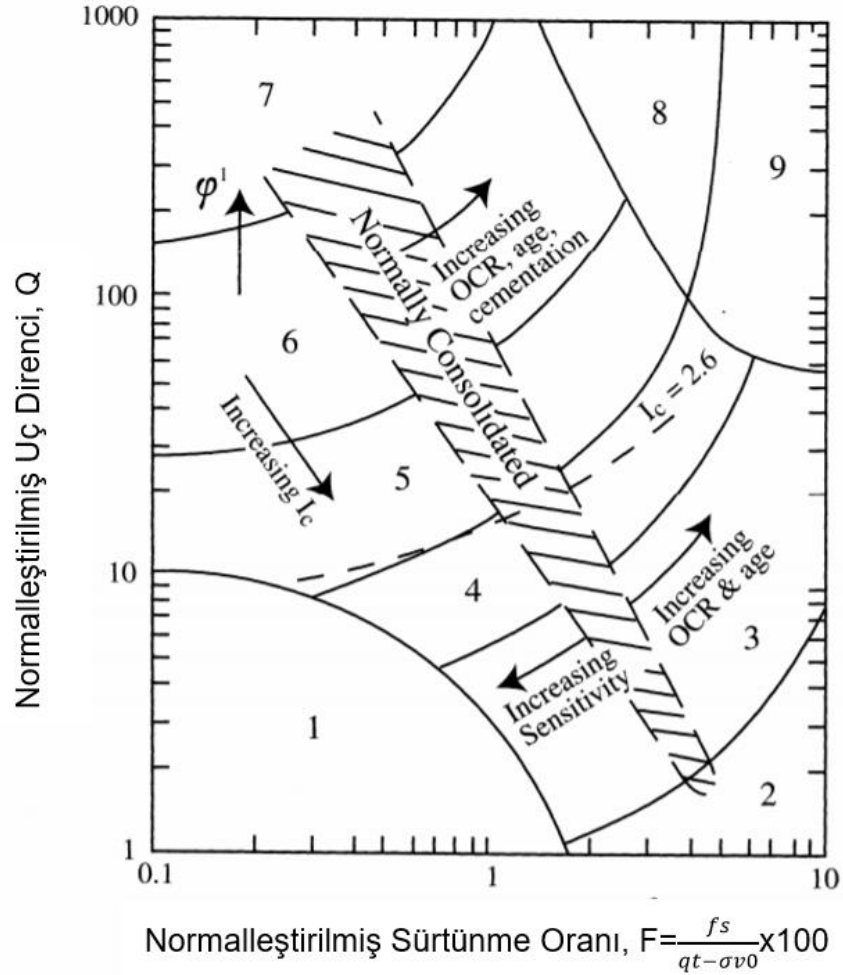
Burada C_q penetrasyon direnci için normalleştirme katsayısı, P_a efektif gerilme birimi cinsinden atmosfer basıncı (100 kPa) ve q_c ise sahada elde edilen penetrasyon uç direncidir. C_q katsayısının en büyük değeri yüzeye yakın yerlerde 2,0 olarak kullanılmıştır. Eşitlikte n olarak gösterilen üs ise zemin dane özelliklerine bağlı olan, temiz kumlar için 0,5 killer için 1,0 olacak şekilde değer alabilen bir değişkendir.

Uç direnç ve sürtünme oranı kullanılarak zeminin sismik yük altındaki dayanımını temsil eden çevrimsel dayanım oranına ulaşılmaktadır. Moment büyüklüğü 7.5 olan depremler için temiz kumda (ince dane oranı %5'ten daha küçük) elde edilen verilerin kullanılması ile sonuçlar Şekil 2.15'te görsel olarak sunulmuştur (Robertson ve Wride, 1998).



Şekil 2.15. Temiz kum ($İDO < \%5$) için önerilen $q_{c,1N}$ -CSR ilişkisi (Robertson ve Wride, 1998)

CPT deneyleri ile elde edilen sürtünme oranı (f_s) zeminin ince dane oranı ve plastisite ile bağıntılı olarak genellikle artmaktadır (Stark ve Olson, 1995). Bu nedenle ince dane içeriği ile ilgili düzeltmenin yapılması temiz kum için hazırlanan grafiğin doğru kullanımını sağlamaktadır. Bu ilişki Şekil 2.16'da sunulmuştur.



Şekil 2.16. F-Q ilişkisine göre zemin grupları ve I_c katsayısının değişimi (Stark ve Olson, 1995)

Şekil 2.16'da verilen bölgeler aşağıda belirtildiği gibi tanımlanmaktadır,

- 1 numaralı bölge hassas ince daneli zemin,
- 2 numaralı bölge organik zemin ve bataklık,
- 3 numaralı bölge siltli kil ve kil arasındaki zeminler,
- 4 numaralı bölge killi silt ve siltli kil arasındaki zeminler,
- 5 numaralı bölge siltli kum ve kumlu silt arasındaki zeminler,
- 6 numaralı bölge temiz kum ve siltli kum arasındaki zeminler,
- 7 numaralı bölge çakıllı kum ve sıkı kum arasındaki zeminler,
- 8 numaralı bölge çok sıkı kum ve killi kum arasındaki zeminler,

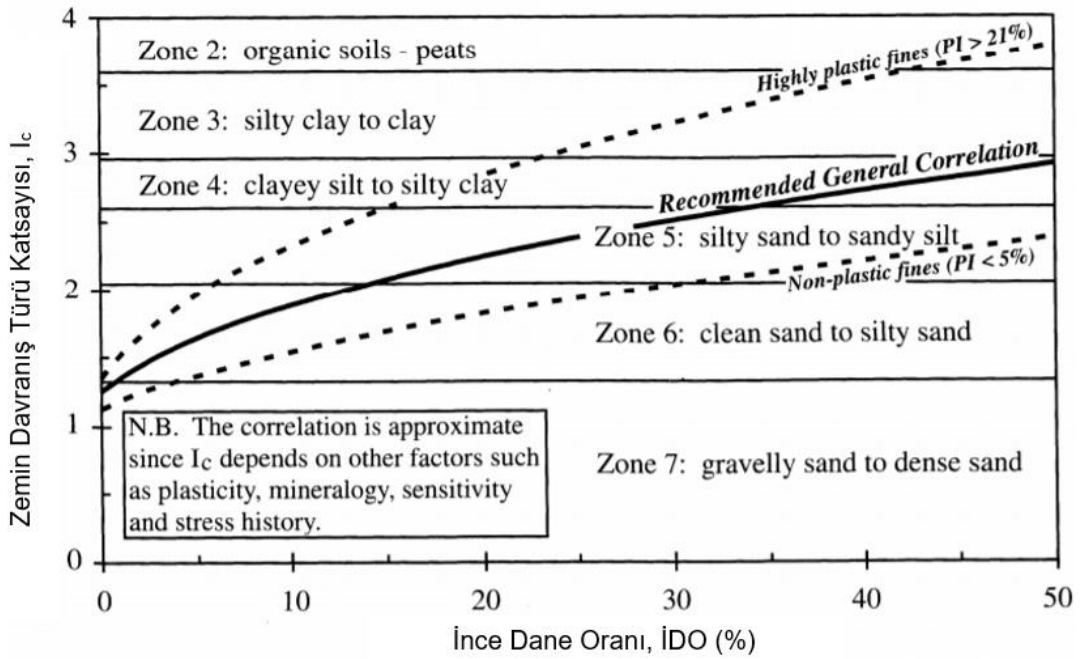
- 9 numaralı bölge çok sert ince daneli zeminler.

Zemin davranış türü katsayısı (I_c) aşağıda verilen bağıntılar kullanılarak belirlenmektedir (Şekil 2.17).

$$I_c = \left[(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2 \right]^{0,5}$$

$$Q = \frac{(q_c - \sigma_{v0})}{P_a} \left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}'} \right)^n$$

$$F = \frac{f_s}{(q_c - \sigma_{v0})} \cdot 100(\%)$$



Şekil 2.17. İnce dane oranı ve zemin türüne göre I_c katsayısı (Seed vd., 2003)

Normalleştirilmiş CPT uç direnci ($q_{c,1,N}$), aşağıdaki eşitlik kullanılarak ince dane düzeltilmesi yapılmakta ve zeminde elde edilen uç direnç temiz kum eşdeğerine dönüştürülmektedir,

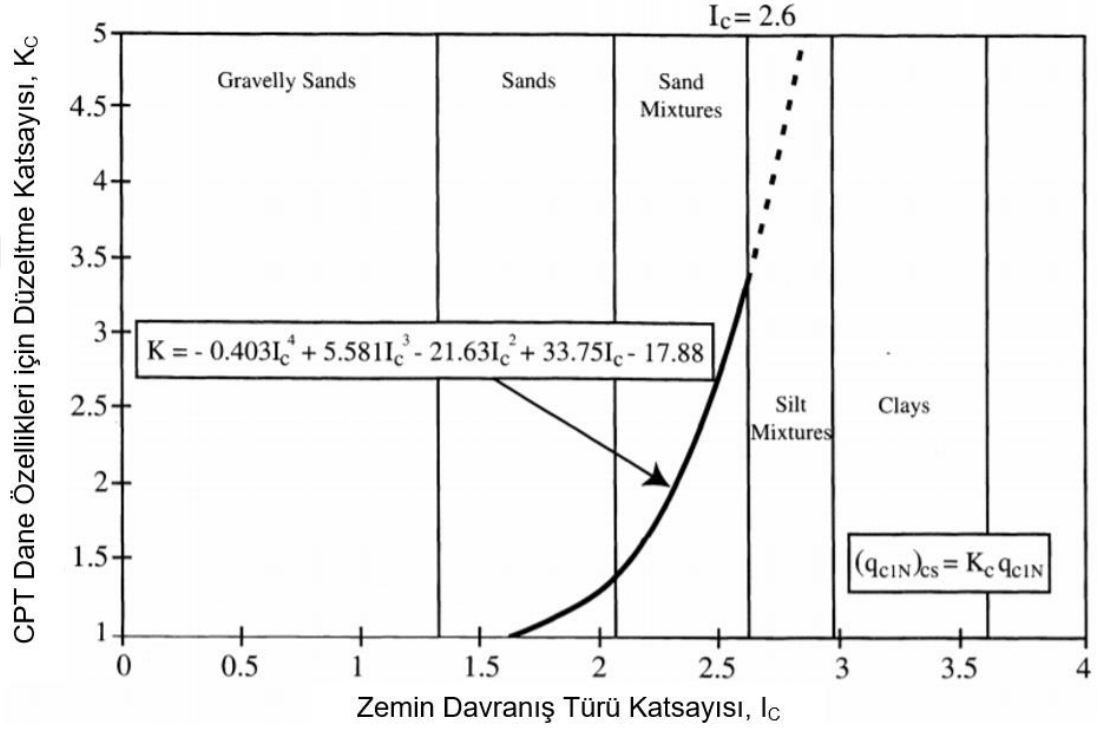
$$q_{(c,1,N)CS} = K_c \cdot q_{c,1,N}$$

Zemin dane özellikleri için düzeltme katsayısı olarak kullanılan K_c (Robertson ve Wride, 1998),

$$I_c \leq 1,64 \quad K_c = 1,0$$

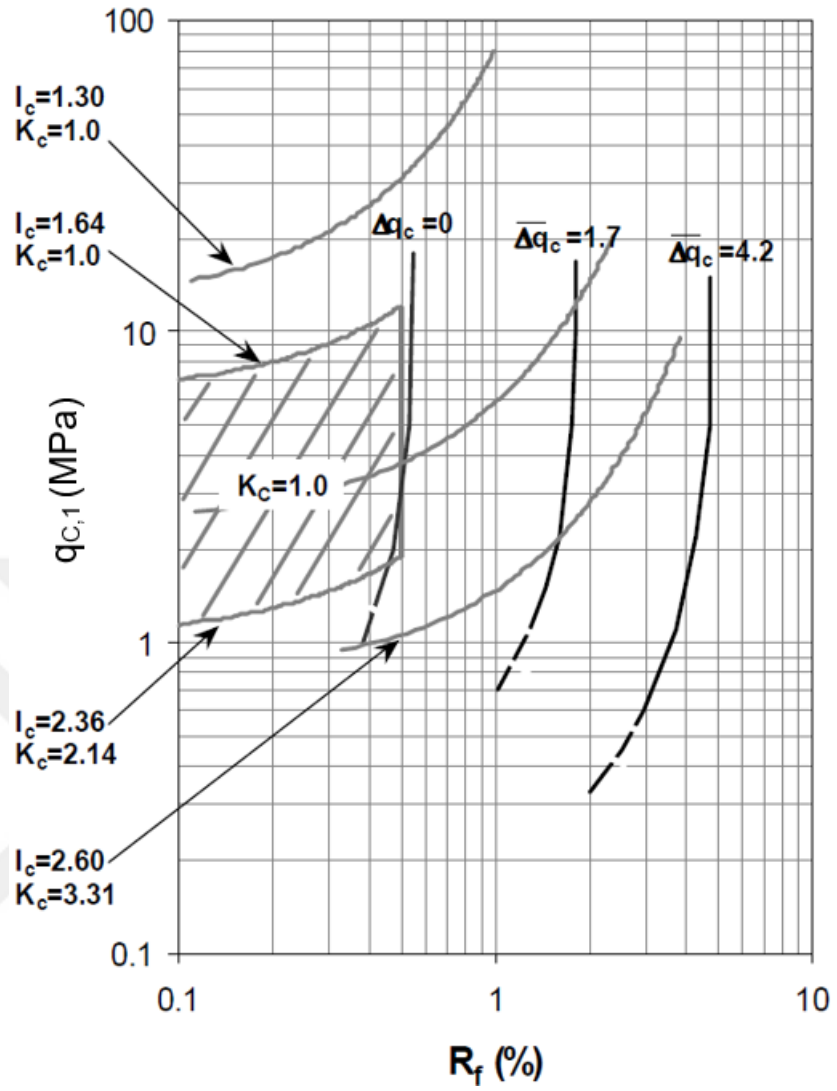
$$I_c > 1,64 \quad K_c = -0,403.I_c^4 + 5,581.I_c^3 - 21,63.I_c^2 + 33,75.I_c - 17,88$$

Zemin dane özellikleri düzeltme katsayısı ve zemin davranış türü katsayısı arasındaki ilişki Şekil 2.18'da görsel olarak sunulmuştur (Youd ve Idriss, 1996).

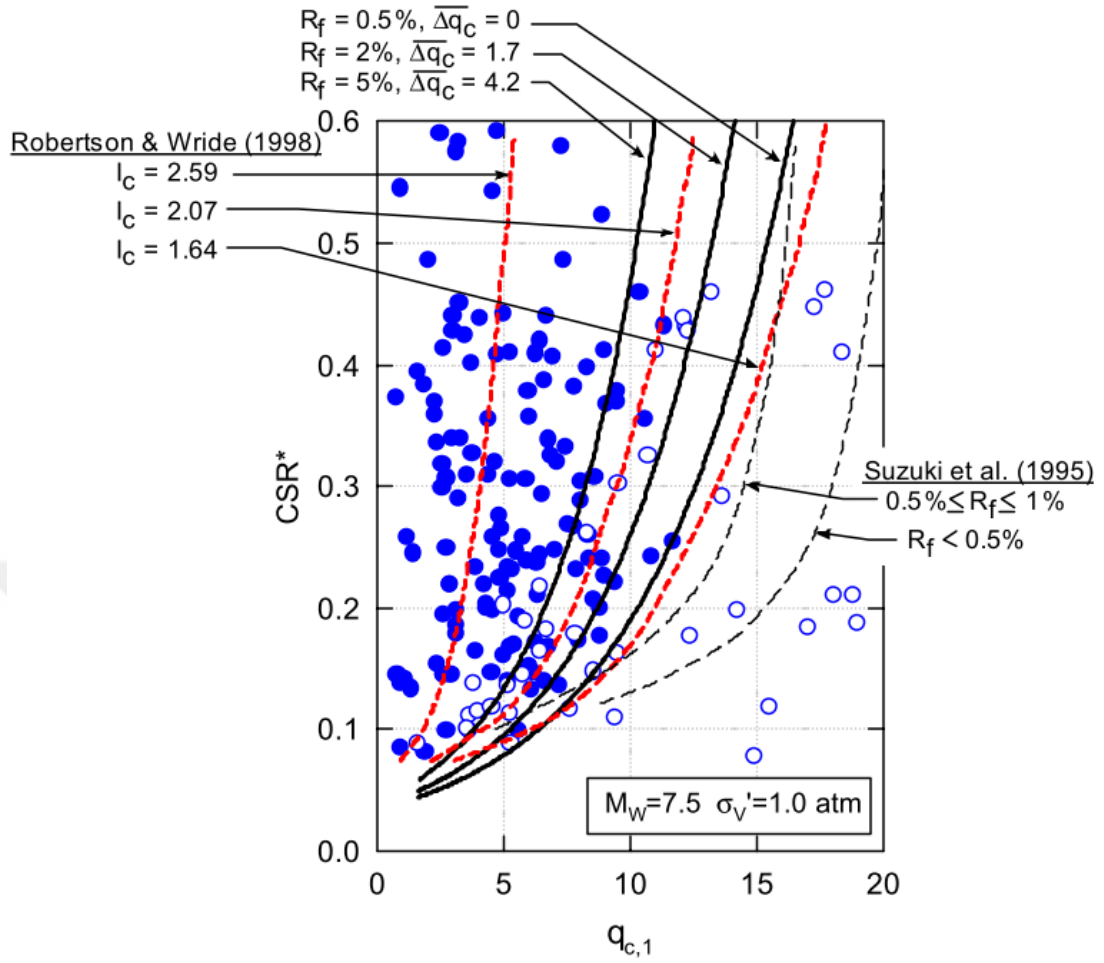


Şekil 2.18. Zemin türüne göre I_c - K_c ilişkisi (Youd ve Idriss, 1996).

Düzeltilmiş uç direnci ($q_{c,1}$) ile sürtünme oranı (R_f) arasındaki ilişki Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Bu grafik sayesinde K_c ve I_c ile ilgili bilgi edinilebilmektedir (Seed vd., 2003). Konik penetrasyon deneyi kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde birtakım ölçütler kullanılmaktadır. Şekil 2.19'da sürtünme oranı (R_f) ve zemin davranış türü katsayısı (I_c) ile ilgili sınırlandırmalar yapılmış ve 7.5 büyüklüğündeki depremde elde edilecek olan CSR değerlerine ulaşma imkânı sunulmuştur.



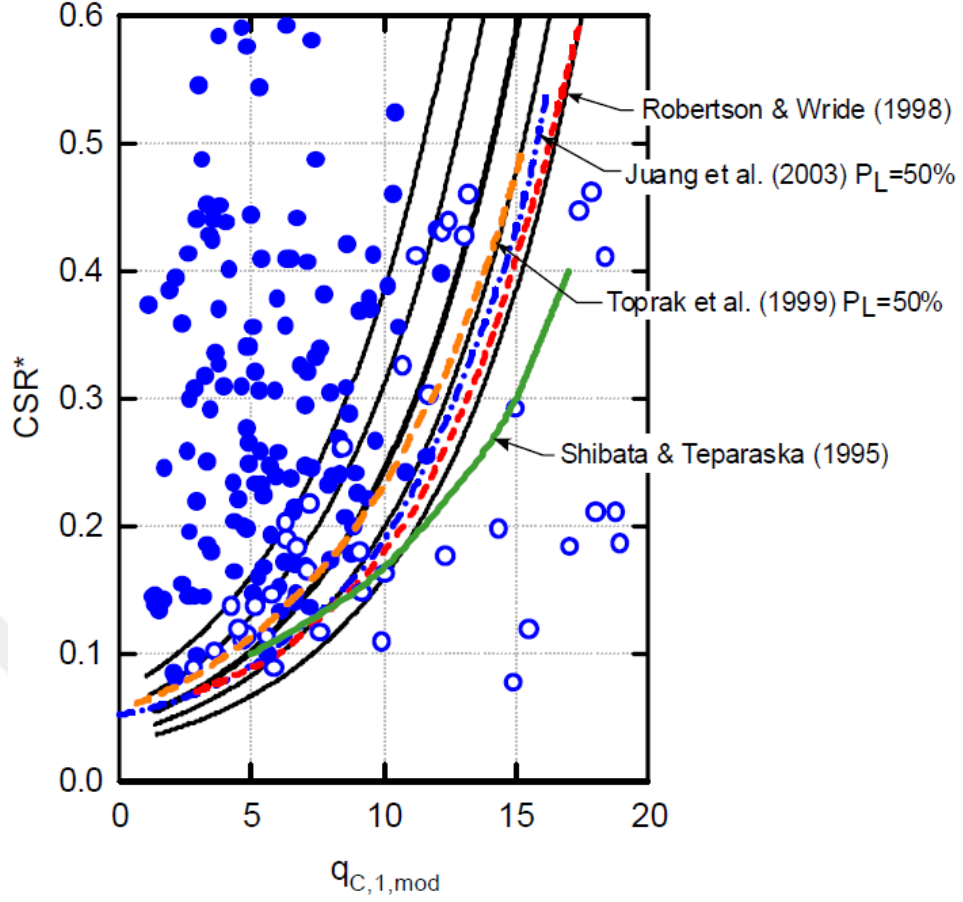
Şekil 2.19. CPT ile elde edilen sürtünme oranı (R_f)-normalleştirilmiş uç direnç ($q_{c,1}$) ilişkisi (R.B.Seed vd., 2003)



Şekil 2.20. R_f ve I_c katsayılarına göre normalize edilmiş uç direnç ($q_{c,1}$)-CSR ilişkisini gösteren eğrilerin karşılaştırılması (R.B.Seed vd., 2003)

CPT verileri ile elde edilen sonuçların zemin ile ilgili düzeltmeleri yapıldıktan sonra q_c için temiz kum eşdeğeri elde edilmiş olur. Düzeltilmiş uç direnci deprem moment büyüklüğünün 7.5 olması durumunda kullanılabilir. Farklı büyüklükteki depremler için MSF katsayısı kullanılmaktadır.

CPT ile sınılaşma hesabı için birçok araştırmacı tarafından eğriler önerilmiştir. Şekil 2.21'de 4 farklı çalışmanın sonucu birlikte sunulmuştur. Grafik incelendiğinde Shibata ve Teparaska (1995) tarafından önerilen eğrinin en küçük CSR değerinin elde edilmesini sağladığı ve en emniyetli sonuçları sunduğu görülmektedir. Ülkemizden bir çalışma olan Toprak vd. tarafından 1999 yılında önerilen eğri ise en büyük çevrimsel dayanım oranını vermektedir. Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen ve CPT ile yapılan sınılaşma analizlerinde en yaygın kullanılan eğri ortalama değerler vererek optimum sonuca en yakın sonuçları vermektedir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. CPT ile sıvılaşma analizi için önerilen eğrilerin toplu gösterimi (R.B.Seed vd., 2003)

2.2.3. Kayma dalgası hızı tabanlı çevrimsel gerilme oranı analizi

Jeofizik yöntemlerle belirlenen kayma dalgası hızı zemin özellikleri hakkında önemli ölçüde bilgi vermektedir. Dayanım hakkında da bilgi veren bu zemin parametresi sıvılaşma direnci hakkında fikir edinmek için 1997 yılında Andrus ve Stokoe çalışmalar yapmıştır. Kayma dalgası hızı (V_s) ile sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Avantajları,

- V_s yerinde yapılan arazi deneyleri ile doğru bir şekilde belirlenebilmektedir.
- SPT ve CPT deneylerinin yapılmasının veya örselenmemiş zemin numunesinin alınmasının zor olduğu durumlarda V_s 'nin belirlenmesi mümkündür.
- Arazi deneyleri ile belirlenen ölçümler ile laboratuvar verilerini karşılaştırma imkanı sunulmaktadır.
- V_s zemin dinamik davranışının belirlenmesinde kullanılan küçük birim deformasyonlar ile doğrudan ilişkilidir.

Dezavantajları,

-Sıvılaşma durumunda çok büyük deformasyonlar gözlenmesine rağmen V_s küçük deformasyon durumlarında belirlenmektedir.

- V_s 'nin belirlenmesinde kullanılan jeofizik yöntemler, diğer zemin parametrelerinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi için gerekli olan zemin numunesini sağlayamamaktadır.

Arazide kuyu yukarı, kuyu aşağı, sismik konik penetrometresi ve süspansiyon loglaması gibi metotlar ile kayma dalgası hızı (V_s) belirlenmektedir. Zeminde derinlik boyunca kayma dalgası hızı değişmektedir. Analiz yapılacak olan nokta için belirlenen V_s üzerinde efektif örtü yükü düzeltmesi yapılması gerekmektedir,

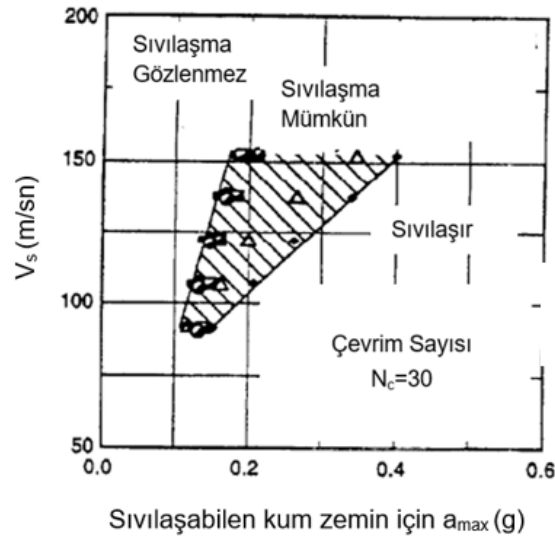
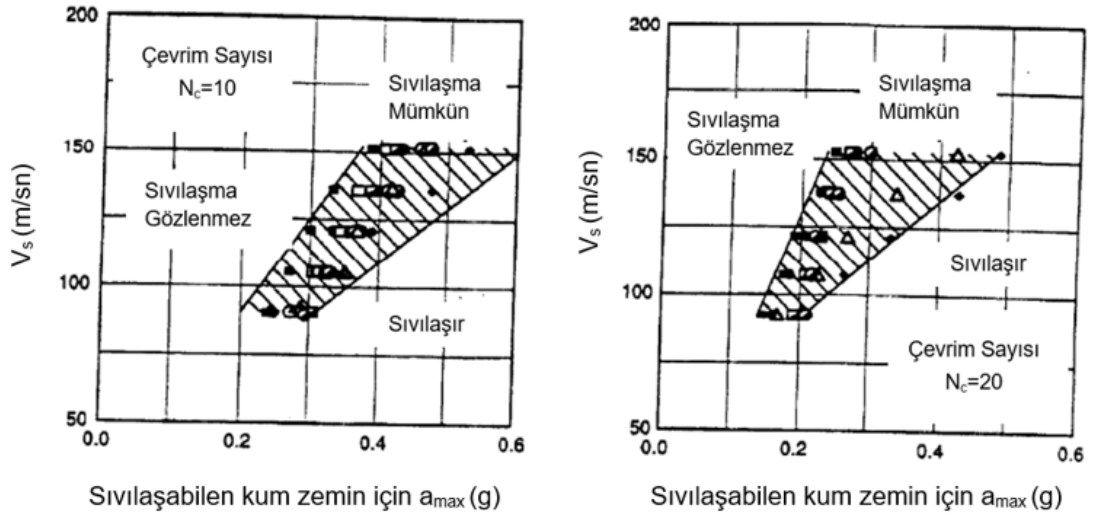
$$V_{s,1} = V_s \cdot (\sigma_{v0}')^{-1/n}$$

Burada σ_{v0}' (ton/ft²) düşey efektif gerilmedir. n Finn ve Kayen tarafından 4 olarak önerilen bir katsayıdır. Sykora (1987) ve Robertson (1992) efektif yük düzeltmesi için önerilen eşitlik,

$$V_{s,1} = V_s \cdot C_v$$

$$C_v = \left(\frac{100}{\sigma_{v0}'(\text{kPa})} \right)^{0,25}$$

Stokoe vd. tarafından 1988 yılında farklı çevrim sayıları için V_s ve a_{max} arasındaki ilişki gösterilmiştir (Şekil 2.22).



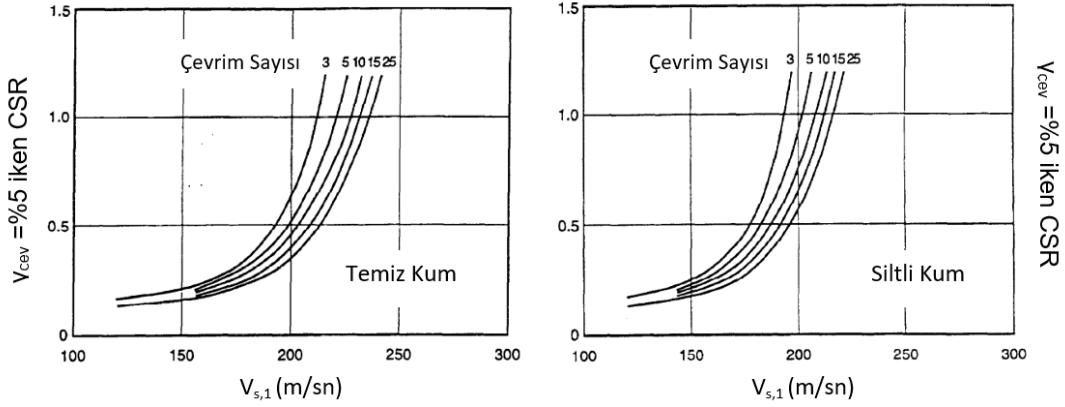
Şekil 2.22. Farklı çevrim sayılarına göre maksimum yer ivmesi (a_{max})-zemin kayma dalgası hızı arasındaki ilişki (Stokoe vd., 1988)

Efektif yük düzeltmesi için bir başka alternatif de Tokimatsu (1990) tarafından önerilmiştir. Burada σ_m' kgf/cm² cinsinden ortalama efektif gerilmedir (1 kgf=98,07 kPa),

$$V_{s,1} = V_s \cdot \left(\frac{1}{\sigma_m'} \right)^{0,33}$$

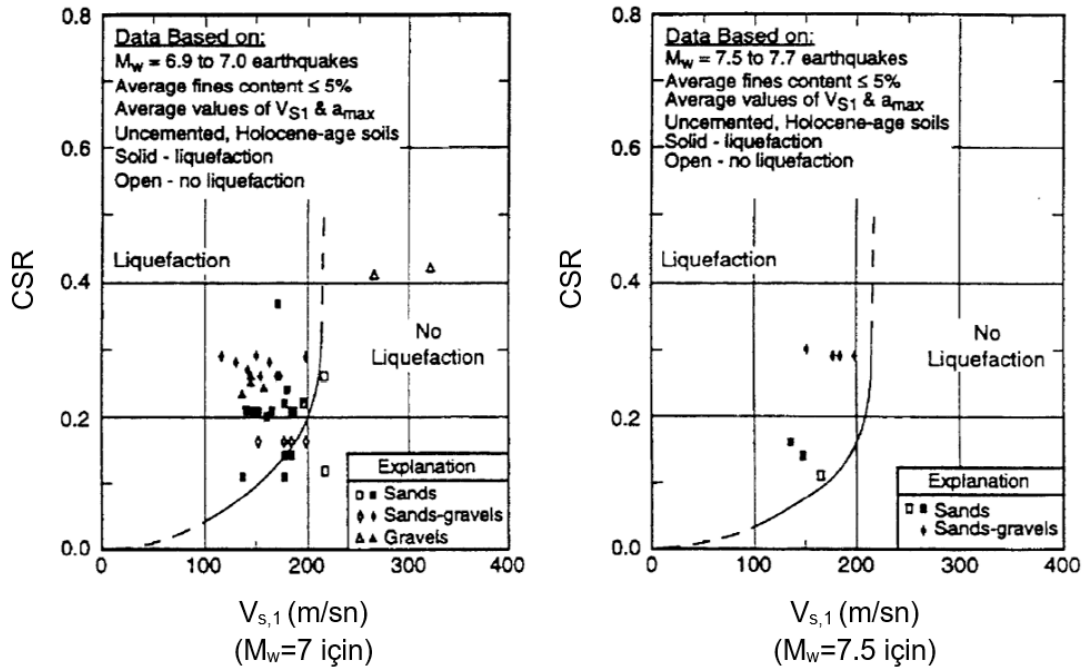
Çevrimsel dayanım oranı için aşağıda verilen bağıntının kullanılması tavsiye edilmiştir. Burada K_0 toprak basıncı katsayısıdır ve 0,5 ile 1,0 arasında değer alır. r_c çok yönlü sarsılma katsayısı olup 0,9 ile 1,0 arasındadır (Tokimatsu vd., 1991). Bu bağıntıda $K_0=0,6$ ve $r_c=0,95$ alınarak Şekil 2.23 elde edilmiştir,

$$CRR = \frac{1}{3} \cdot (1 + 2K_0) \cdot r_c \cdot CRR_{tx}$$



Şekil 2.23. Farklı çevrim sayılarına göre birim deformasyonun %5 olduğu durumdaki $V_{s,1}$ -CSR ilişkisi (Tokimatsu vd., 1991)

Andrus ve Stokoe (2000), yapılan saha çalışmalarını geliştirerek yeni eğriler önermişlerdir. Şekil 2.22'de ince dane içeriğinin %5'e eşit veya küçük olduğu zeminlerde farklı moment büyüklüklerine sahip deprem senaryoları incelenmiştir. Grafik üzerinde sıvılaşma gözlenen ve gözlenmeyen vakalar gösterilmiş ve bir eğri yardımı ile CSR ile $V_{s,1}$ arasındaki ilişki gösterilmiştir. Moment büyüklüğü 6.9 ile 7.0 arasında olan depremlerden elde edilen sonuçlarla sunulan eğri, beklenen depremin 7.0 büyüklüğünde olması durumunda kullanılmaktadır. İkinci grafikte ise büyüklüğü 7.5 ile 7.7 arasında olan depremlerdeki sıvılaşma olayları incelenmiştir. Sunulan eğri ise $M_w=7.5$ olması durumunda kullanılmaktadır. Her iki eğri de $\dot{I}DO \leq 5\%$ olması durumunda kullanılmaktadır.



Şekil 2.24. İDO≤%5 olan zeminlerde $M_w=7$ ve $M_w=7.5$ için sıvılaşma sınır eğrisi (Andrus ve Stokoe, 2000)

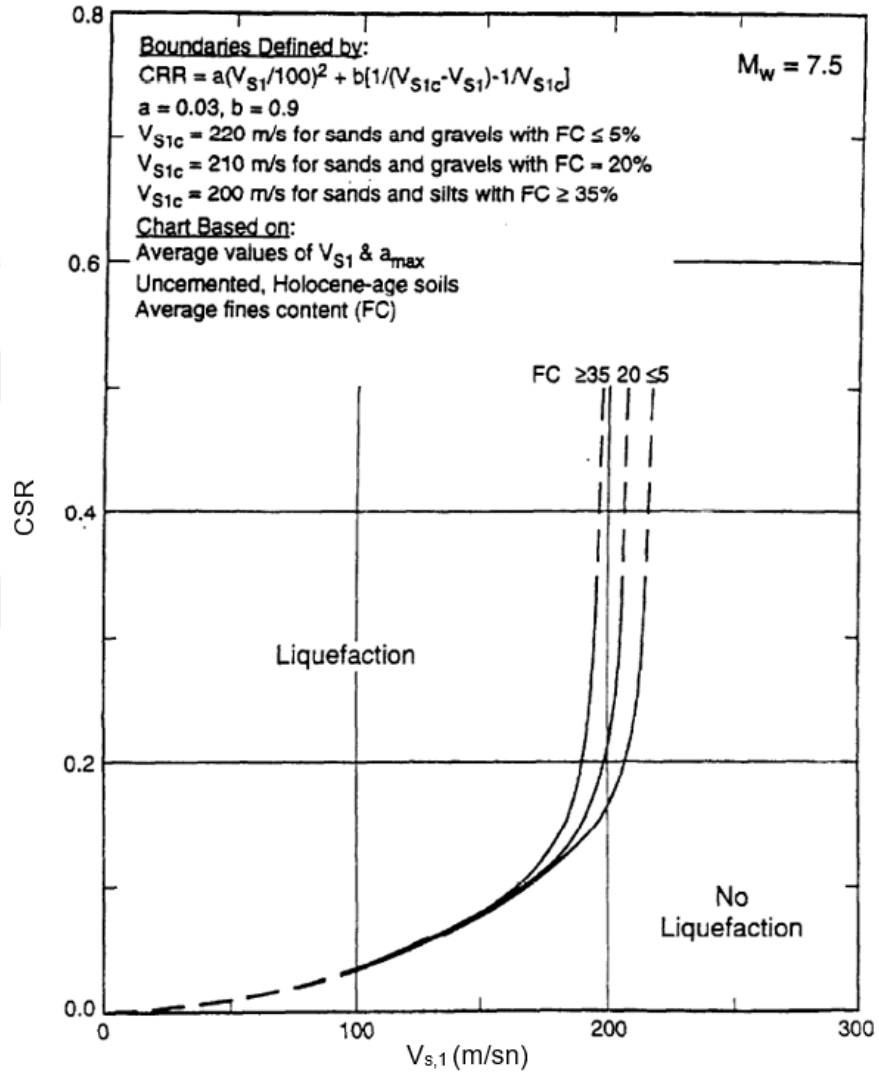
Sıvılaşma gözlenen ve gözlenmeyen zeminleri ayıran sınırın belirlenmesinde, bir $V_{s,1}$ değeri için eğrinin sabit bir değere ulaşarak asimptotik davranmıştır (Şekil 2.24). Bu sınır, sıkı iri daneli zeminlerin büyük birim deformasyonlar altında genişleme eğiliminde olmasından etkilenmektedir. Bu koşulları dikkate alındığında CRR'nin belirlenmesi için aşağıdaki eşitlik tavsiye edilmiştir,

$$CRR = \frac{T_1}{\sigma'_v} = a \left(\frac{V_{s,1}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{s,1c} - V_{s,1}} - \frac{1}{V_{s,1c}} \right)$$

Burada $V_{s,1c}$ zeminde sıkışma ve genişleme davranışını ayıran kritik kayma dalgası hızıdır. a ve b ise eğri uydurma parametreleridir. Moment büyüklüğü 7.5 olan deprem için $a=0,03$ ve $b=0,9$ kabul edilmiştir. İnce dane içeriğine göre zemin kritik kayma dalgası hızları Tablo 2.15'de sunulmuştur. Tüm bu bilgiler kullanılarak Andrus ve Stokoe tarafından 2000 yılında, kayma dalgası hızına bağlı olarak CRR'nin belirlenmesi için Şekil 2.25'teki eğriler tavsiye edilmiştir ($M_w=7.5$ için).

Tablo 2.14. İnce dane oranına göre zemin kritik kayma dalgası hızları

İDO ≤ %5	İDO ≈ %20	İDO ≥ %35
$V_{s,1c}=220$ m/sn	$V_{s,1c}=210$ m/sn	$V_{s,1c}=200$ m/sn



Şekil 2.25. Farklı ince dane oranına sahip zeminler için $V_{s,1}$ ile CSR ilişkisi (Andrus ve Stokoe, 2000)

Şekil 2.25'te önerilen eğriler incelendiğinde, zemin kayma dalgası hızının 200 m/sn'den büyük olması durumunda sıvılaşma direncinin hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir.

Çevrimsel gerilme oranı (CSR) yaklaşımında SPT, CPT ve V_s tabanlı analizler kullanım şartlarına göre Tablo 2.16'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.15. SPT, CPT ve V_s metotlarının sıvılaşma analizinde kullanımının karşılaştırılması

	SPT	CPT	V_s
Laboratuvar deneyleri için numune alınabilir.	+	-	-
Derinlik boyunca daha hassas aralıklarla ölçüm yapılabilir.	-	+	+
Deney verileri zemin ince dane oranına göre düzenlenmelidir.	+	+	-
Deney verileri üzerinde efektif yük düzeltmesi yapılmalıdır.	+	+	+
Deney ekibi ve ekipmanına göre verilerde büyük farklılıklar	+	-	-
Deney sonucunda elde edilen veri, zemin dayanımı hakkında	-	-	+

2.3.İnce Daneli Zeminlerde Sıvılaşma Analizi

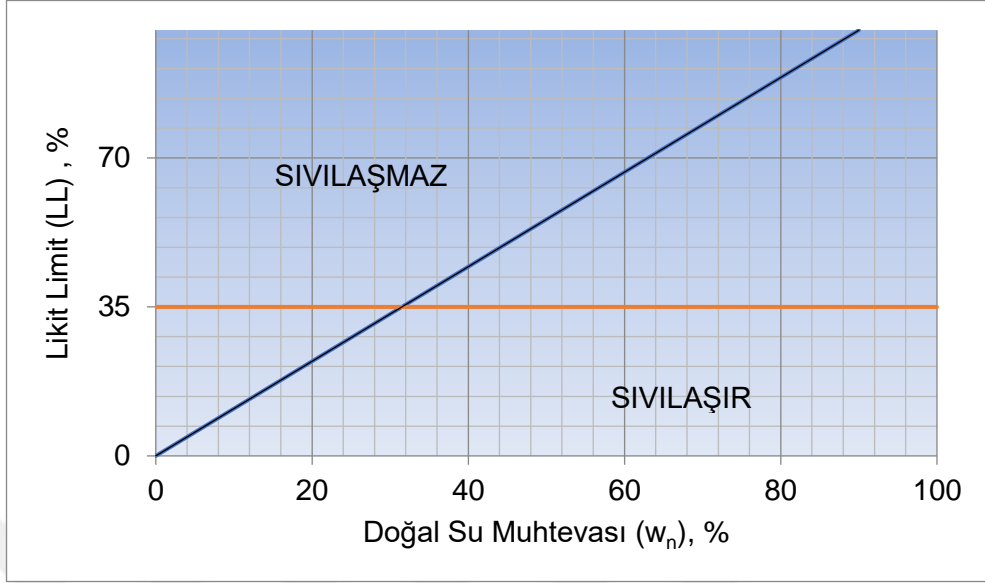
Zemin sıvılaşması düşük permeabilite nedeniyle suyun boşlukları yeterli hızda terk edememesiyle oluştuğundan, zeminin geçirimliliğini etkileyen tüm özellikler sıvılaşmayı da etkiler. Bunlar dane boyutu, dağılımı ve şekli olarak sıralanabilir. Sıvılaşma için en uygun zemin ince daneli kumlar olduğu bilinmektedir. Çakıllı zeminlerin yüksek permeabiliteye sahip olması hızlı drenaja neden olduğundan bu zeminlerde sıvılaşma gözlenmez. Kohezyonsuz ve plastik olmayan ince daneli zeminler sıvılaşma riski taşıyabilir. Yapılan çalışmalara göre siltlerin sıvılaşabileceği, killerin ise sıvılaşamayacağına karar verilmiştir. İnce daneli zeminler için belirleyici özellikler olan likit limit ve plastik limit değerleri sıvılaşma potansiyeli analizinde sıkça kullanılmıştır.

2.3.1.Çin kriteri

Bu metot ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli üzerine yapılmış olan en temel çalışmadır (Wang, 1979). Zeminin doğal su muhtevası ve likit limitine göre sıvılaşma riskinin belirlenmesini esas alır. Şekil 2.26'da Çin kriteri grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu yöntemin kullanılması için ince daneli bir zeminin aşağıdaki şartların hepsini sağlaması gerekmektedir,

- Doğal su muhtevası, likit limitin 0,9 katından büyük olmalı,
- Likit limiti 35'e eşit veya küçük olmalı,
- Likidite indisi 75'e eşit veya küçük olmalı,

- 0,005 mm'den küçük ince dane yüzdesi 15'e eşit veya küçük olmalıdır.

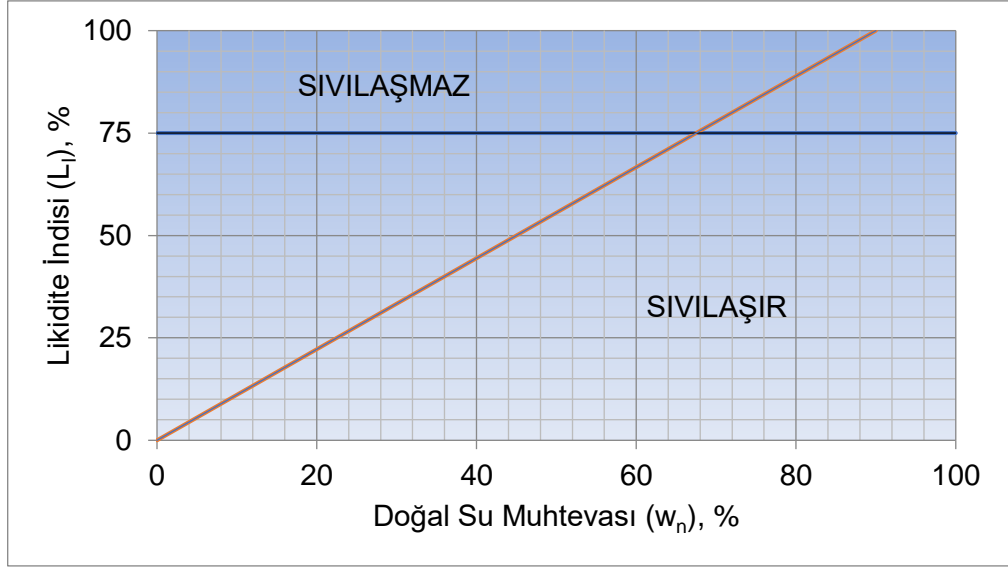


Şekil 2.26. Çin kriterine göre sıvılaşma koşulları

2.3.2.Modifiye Çin kriteri

Çin kriterinin yine Wang tarafından 1981 yılında geliştirilmiş ve düzenlenmiş halidir. Çin kriterine ilave olarak standart penetrasyon deney sonucu, serbest basınç mukavemeti ve hassaslık derecesi de dikkate alınmıştır (Şekil 2.27). Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan koşullar aşağıdaki gibidir,

- Doğal su muhtevası, likit limitin 0,9 katından büyük olmalı,
- Likidite indisi 75'e eşit veya küçük olmalı,
- Enerji düzeltmesi yapılmış standart penetrasyon darbe sayısı (N_{60}) 4'e eşit veya küçük olmalı,
- Serbest basınç mukavemeti (q_u) 50 kPa'dan küçük olmalı,
- Hassaslık derecesi 4'ten büyük olmalıdır.

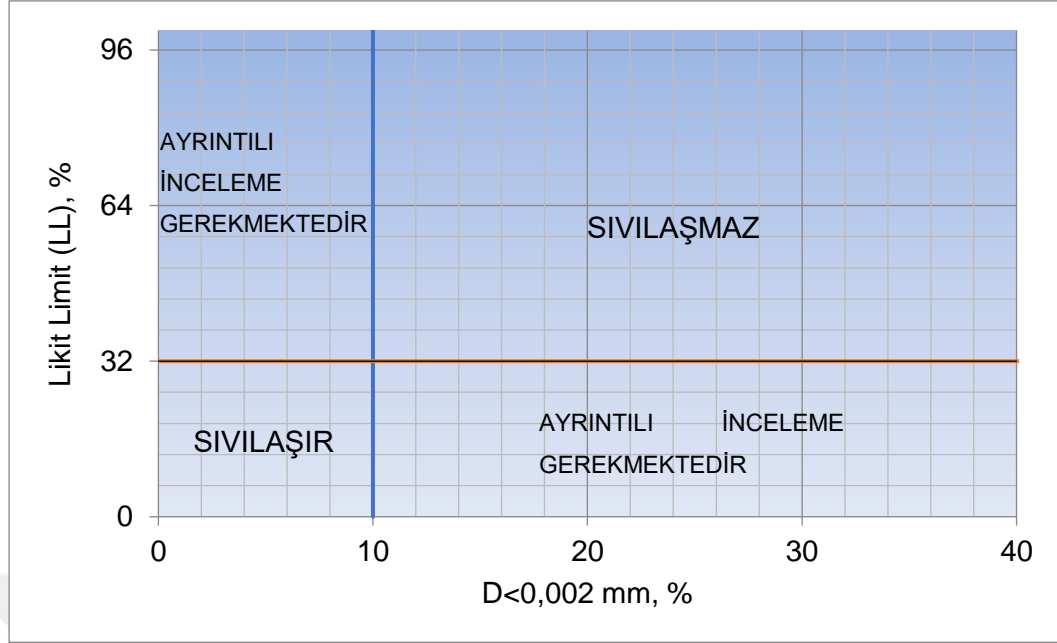


Şekil 2.27. Modifiye çin kriterine göre sıvılaşma koşulları

2.3.3. Andrews ve Martin yöntemi

Siltli zeminlerin sıvılaşma ihtimalini belirlemek üzere 2000 yılında geliştirilmiştir. Zeminin kil içeriğinin ve likit limitin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde anahtar parametreler olduğunu savunmaktadır. Yöntemin grafiksel hali Şekil 2.28'da gösterilmiştir. Bu yöntemde kil, 0,002 mm'den küçük olan daneler olarak kabul edilmiştir. Siltli bir zeminin sıvılaşma ihtimalleri aşağıdaki gibidir,

- Kil içeriği %10'dan az ve likit limit 32'den küçükse zemin sıvılaşır.
- Kil içeriği %10'dan az ve likit limit 32'ye büyük veya eşitse ayrıntılı inceleme gerekir. Mica gibi plastik olan ancak kil özelliği taşımayan daneler dikkate alınarak hesap yapılmalıdır.
- Kil içeriği %10'a eşit veya fazla ve likit limit 32'den küçük olması durumunda ayrıntılı inceleme gerekir. Bu koşullarda dikkate alınması gereken daneler plastik olmayan kil daneleridir. Maden ve bu ocakların yakınlarındaki atık bulunduran zeminlerde görülmesi olasıdır.
- Kil içeriği %10'dan fazla ve likit limit 32'den büyükse zemin sıvılaşma riski altında değildir (Andrews ve Martin, 2000).



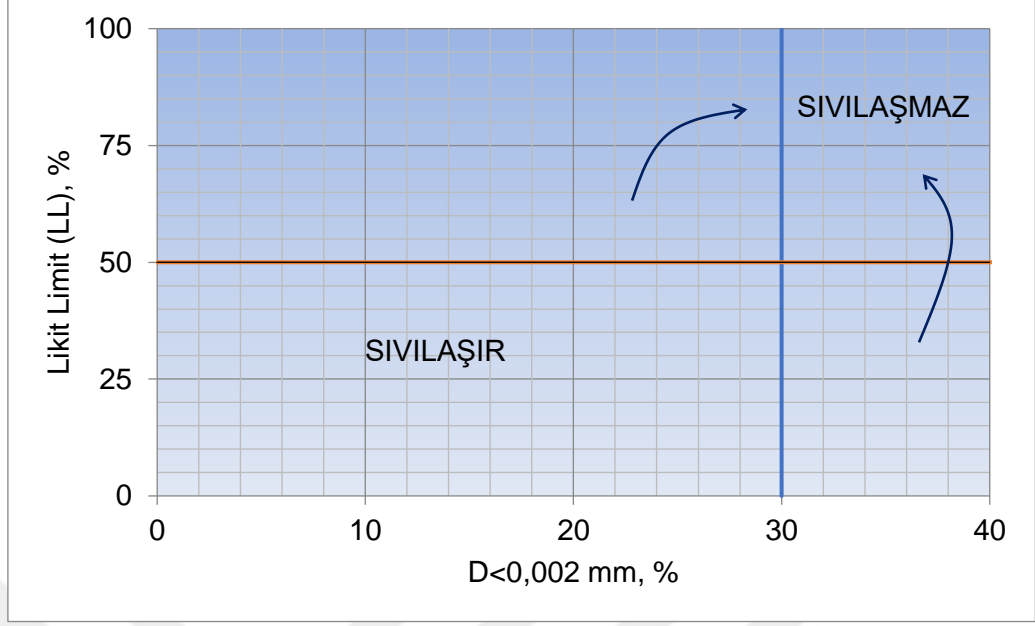
Şekil 2.28. Andrews ve Martin tarafından önerilen sıvılaştırma koşulları

2.3.4. Tezcan ve Özdemir yöntemi

1999 Kocaeli depreminden sonra zemin sıvılaşması Türkiye'de de popüler bir konu haline gelmiştir. 2004 yılında geliştirilmiş olan bu metot Türkiye'de ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesi için önemli bir yere sahiptir. 0,002 mm'den küçük çaptaki daneler kil olarak kabul edilmektedir. Zemindeki kil danelerinin %30'a eşit veya küçük olması durumunda aşağıdaki şartların tamamının sağlanması zeminin sıvılaşma potansiyelinin olduğunu göstermektedir,

- Doğal su muhtevası likit limitin 0,7 katına eşit veya büyük olmalı,
- Likit limit 50'ye eşit veya küçük olmalı,
- Likidite indisi 75'e eşit veya küçük olmalı,
- Plastisite indisi 75'e eşit veya küçük olmalıdır.

Plastisite indisinin kontrolünden sonra Şekil 2.29'da gösterilen grafik metodun uygulanmasında kullanılabilir.



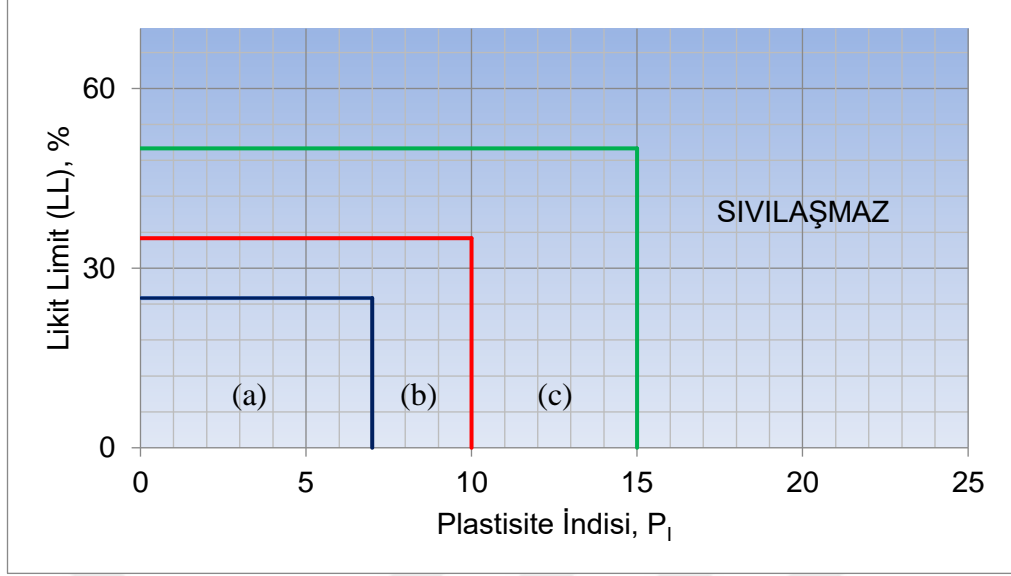
Şekil 2.29. Tezcan ve Özdemir tarafından önerilen sıvılaşma koşulları

2.3.5. Polito yöntemi

İnce daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan bu metotta, zeminin plastisite indisinin sıvılaşmadaki kilit parametre olduğunu düşünerek plastisite indisi tabanlı bir yol izlenmiştir (Polito, 2001). Çalışmada, 40 no'lu elekten geçen zemin numunelerinin Atterberg limit deneyleri yapılarak elde edilen plastisite indisleri kullanılmıştır (Şekil 2.30). Tablo 2.17'de beklenen zemin davranışları gösterilmiştir.

Tablo 2.16. Polito tarafından önerilen sıvılaşma koşulları

Koşullar	Zemin Davranışı
$LL < 25$	Sıvılaşır.
$25 < LL < 35$	Sıvılaşma potansiyeli var, detaylı inceleme gerekir.
$35 < LL < 50$	Çevrimsel hareketliliğe karşı duyarlıdır.



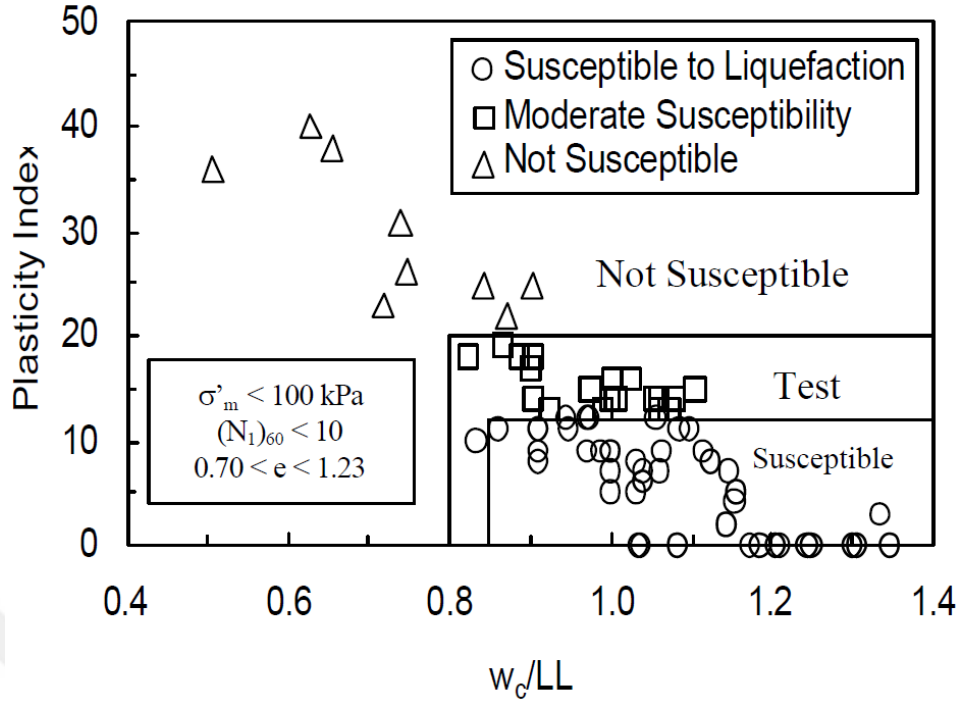
Şekil 2.30. Sıvılaşma gözlenen (a), sıvılaşma ihtimali olan (b) ve çevrimsel hareketliliğe karşı duyarlı olan zeminler (c)

2.3.6. Bray vd. Yöntemi

1999 Kocaeli depremi ile Adapazarı'nda sıvılaşmış olan zeminler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda sıvılaşmayı etkileyen asıl parametrenin zemindeki kil danelerinin boyutu ve miktarından ziyade plastisite indisi olduğu görülmüştür. Metodun sunduğu sıvılaşma koşulları Tablo 2.18'deki gibidir ve grafiksel hali Şekil 2.31'de gösterilmiştir.

Tablo 2.17. Bray vd. tarafından önerilen sıvılaşma koşulları

Koşullar	Zemin Davranışı
$PI \leq 12$	Sıvılaşma veya devirsel hareketliliğe karşı hassas.
$12 < PI \leq 20$	Sıvılaşma veya devirsel hareketliliğe karşı kısmen hassas.
$PI > 20$	Kil içeriği fazla olduğundan sıvılaşmaz.

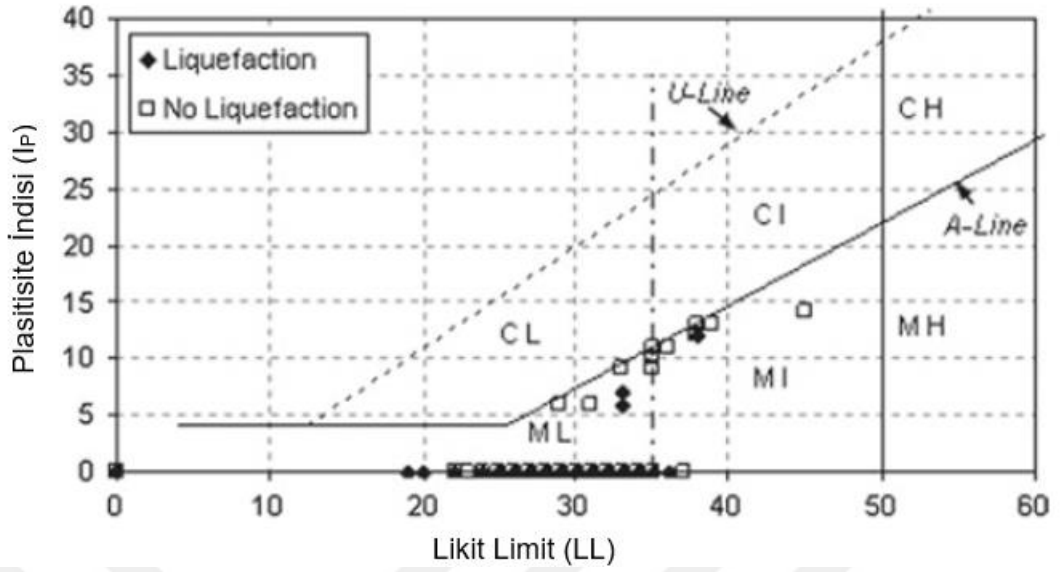


Şekil 2.31. Bray vd. tarafından önerilen sıvılaştırma koşulları (Bray ve Sancio, 2006)

2.3.7. Adapazarı kriteri

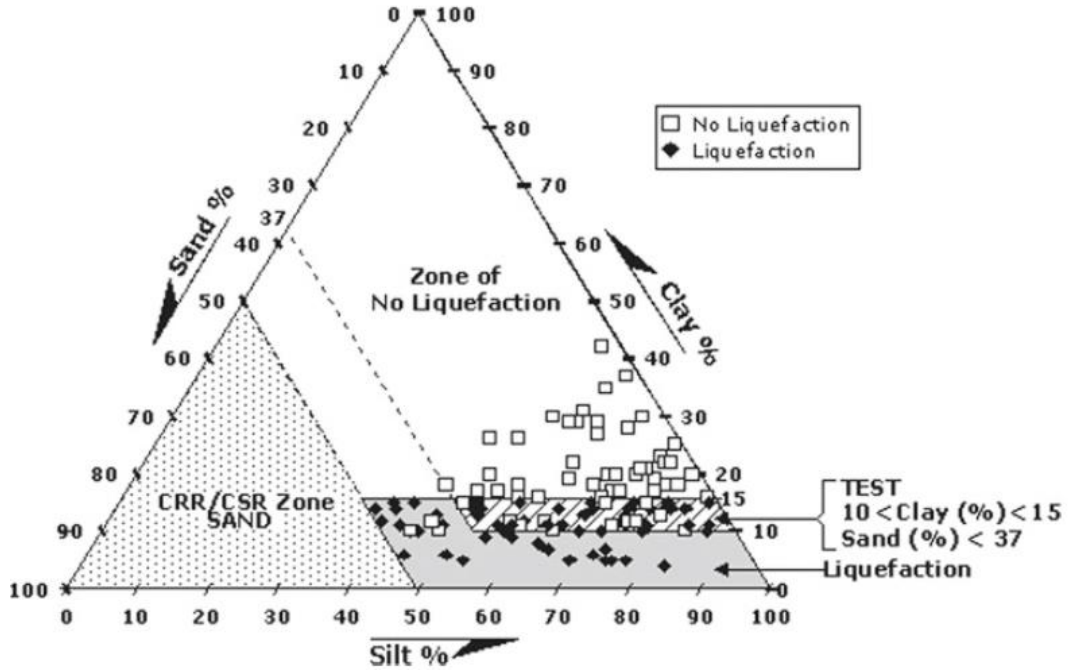
Sakarya nehrinin zaman içinde yatak değiştirmesi ile Adapazarı çevresinde oluşan çökellerin, ince kum ve siltten oluşan kısımlarında, 1999 Kocaeli depremde sıvılaştırma sonucu yıkıcı hasarlar meydana gelmiştir. Bunların sonucunda zemin sıvılaştırması akademik çevrede büyük ilgi uyandırmıştır. Akın Önalp öncülüğünde geliştirilen Adapazarı Kriteri, yapılmış çalışmalar arasında en ses getireni olmuştur.

Adapazarı kriterinde kil sayılacak dane çapı 0,02 mm olarak belirlenmiştir. Kum etki katsayısı (η) ile zeminin kum içeriği yüzde olarak belirlenir. Yöntemin kullanılabilmesi için η , 1 ile 0,51 arasında bir değer almalıdır. Bu durumda kum içeriği %0 ile %49 arasında olur ve zemin silt olarak sınıflandırılır. Adapazarı çevresindeki siltli zeminler üzerinde yapılan çalışmalar sonucu sıvılaştırma gözlenen numuneler çeşitli grafik ve abaklarla gösterilmiştir (Bol vd., 2010). Analiz sonuçlarının TS 1500'de verilen plastisite kartı üzerindeki yerleri Şekil 2.32'de gösterilmiştir.



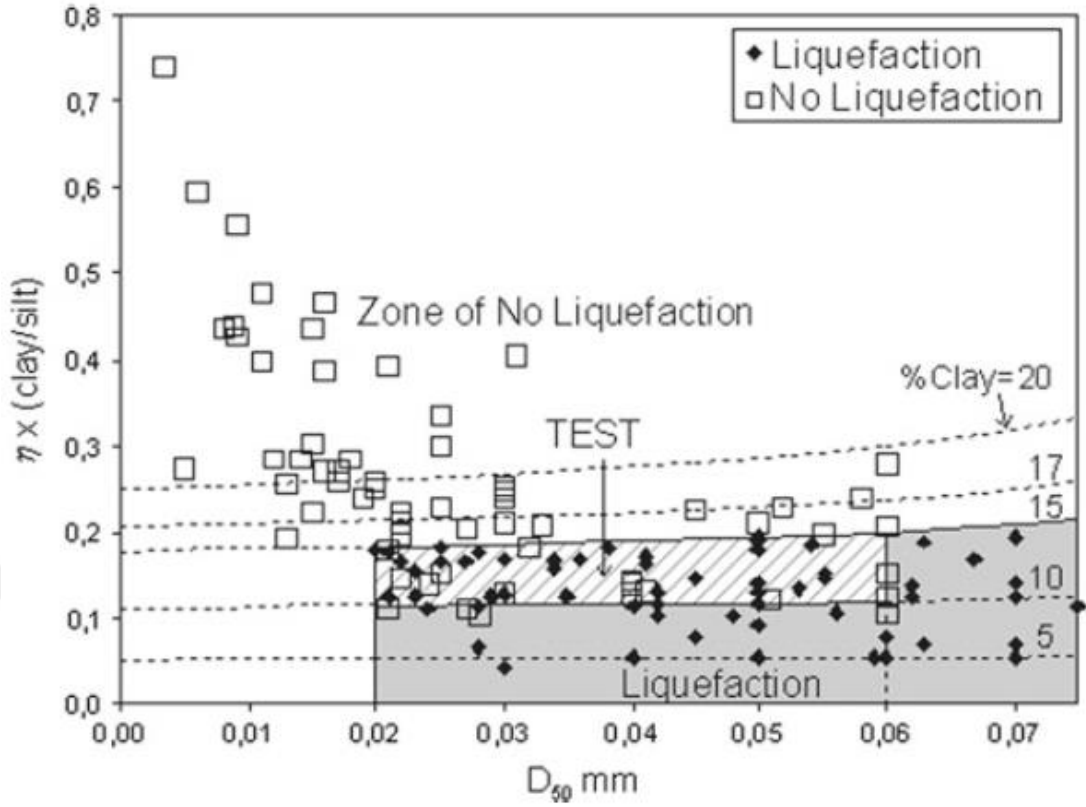
Şekil 2.32. Adapazarı kriterinin plastisite kartı üzerinde gösterimi (Bol vd., 2010)

Adapazarı kriterinin bir başka sınıflandırma ölçütü olan USDA sınıflandırma tablosu üzerindeki gösterimi Şekil 2.33'te gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Adapazarı kriterinin USDA sınıflandırma üçgeni üzerinde gösterimi (Bol vd., 2010)

Dane çapı-kum etki katsayısı- kil içeriği (%) ilişkisini veren grafikte sıvılaşma potansiyeli olan bölgeler gösterilmiştir (Şekil 2.34).



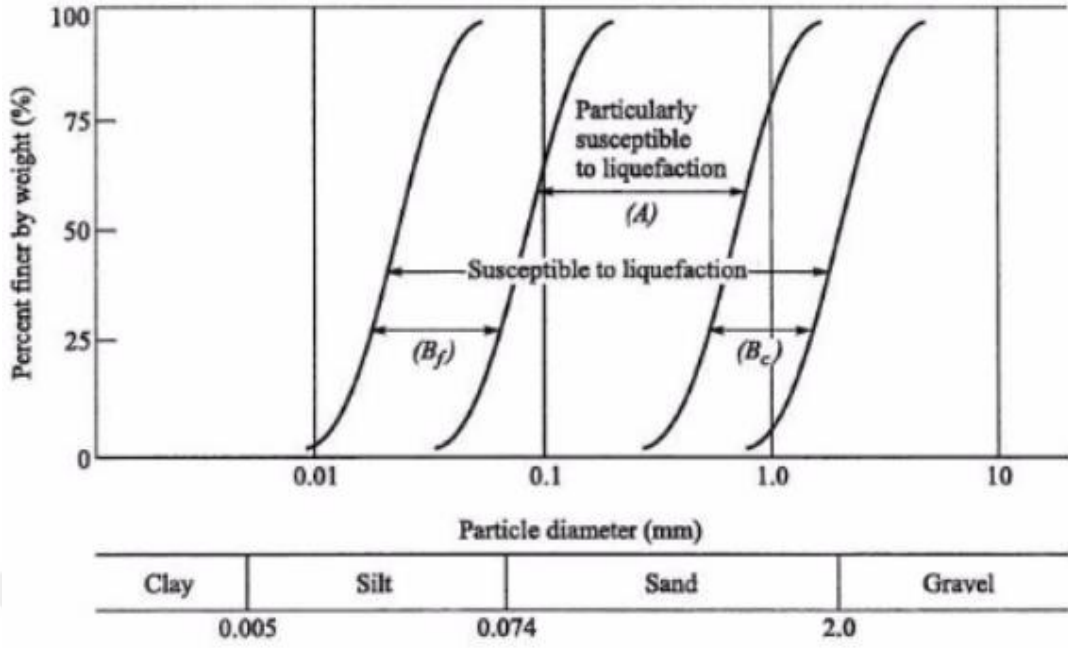
Şekil 2.34. Adapazarı kriterinin grafiksel gösterimi (Bol vd., 2010)

Adapazarı civarında yapılan çalışmalar sonucunda siltli bir zeminin sıvılaşması için aşağıdaki şartların tamamını sağlaması gerektiği anlaşılmıştır,

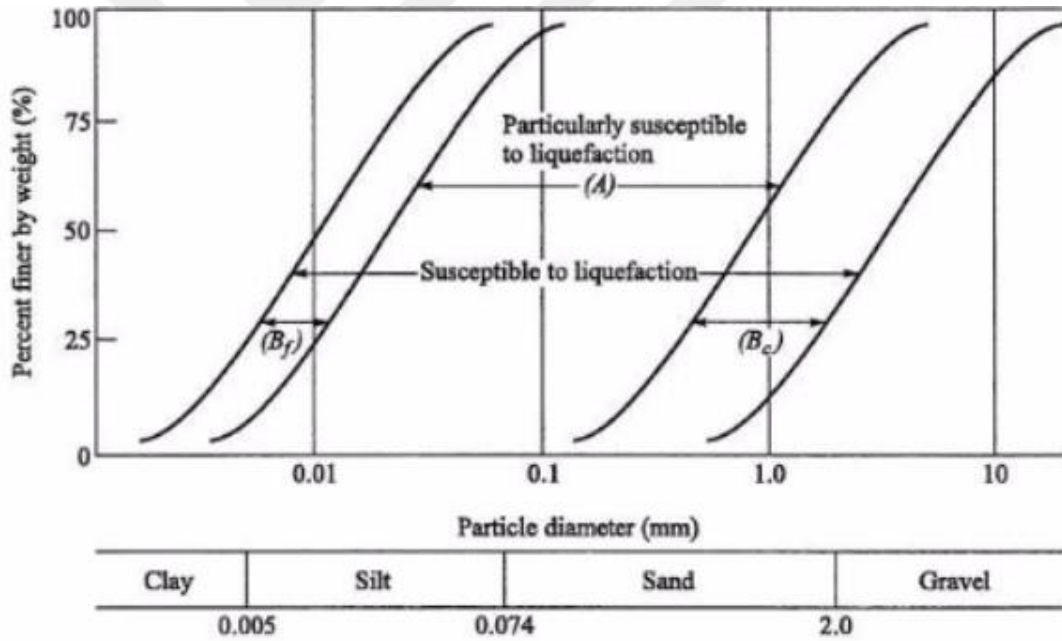
- $LL \leq 33$
- $w_n > 0,9 \cdot LL$
- Kil içeriği $< \%10$
- $D_{50} > 0,02$ mm

2.3.8. Japon kriteri

Japon kriteri geliştirilirken sarsma tablası deneyinden elde edilen deprem sonrası gözlemsel veriler kullanılmıştır. Metot, ince danelerin zeminde ağırlıkça yüzdesi ile dane çapı arasındaki ilişkiye göre sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesini hedefler. Şekil 2.32'de metodun grafiksel gösterimi verilmiştir. Kötü derecelenmiş zeminler ($C_u < 3,5$) için Şekil 2.35 (a) , iyi derecelenmiş zeminler ($C_u > 3,5$) için Şekil 2.35 (b) kullanılmalıdır.



(a)



(b)

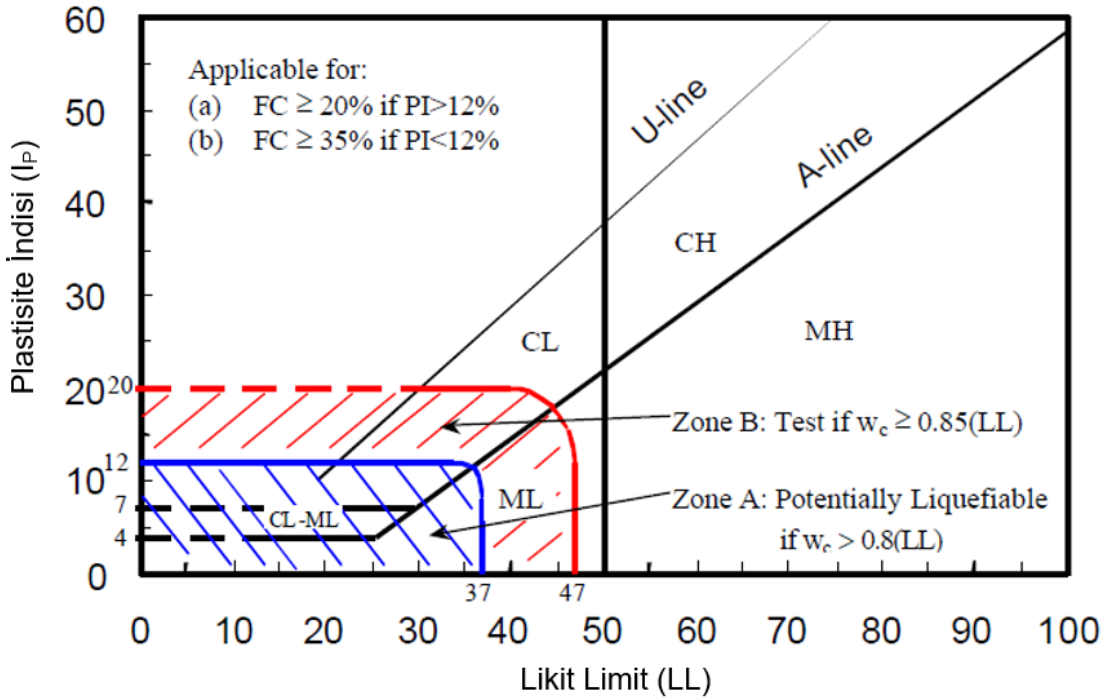
Şekil 2.35. Kötü derecelenmiş zeminler (a) ve iyi derecelenmiş zemin için (b) geliştirilen Japon kriteri (Green ve Ziotopoulou, 2015)

2.3.9. Seed vd. yöntemi

2003 yılında Modifiye Çin Kriteri esas alınarak yapılan düzenlemeler sayesinde geliştirilmiştir. Metodun uygulanabildiği zeminlerin özellikleri aşağıdaki gibidir,

- $PI > 12\%$ ise ince dane içeriği 20% 'ye eşit veya büyük
- $PI < 12\%$ ise ince dane içeriği 35% 'e eşit veya büyük

Modifiye Çin Kriterinde ince olarak bahsedilen daneler, aslında kil daneleridir. Killer sıvılaşmazken siltlerin sıvılaşabileceği kabul edildiğinden kil içeriğine göre sıvılaşmanın öngörülebileceği düşünülmüştür. Ancak kil içeriğinin 15% 'ten fazla olduğu durumlarda da birçok zemin sıvılaşması gerçekleşmiş olduğundan, Seed ve diğerleri yöntemde kil içeriğinden ziyade ince danelerin plastisitesinin belirleyici olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu sebeple yöntemde bahsedilen inceler, elek analizi deneyinde 200 no'lu elekten geçen yani $0,074$ mm'den küçük çaptaki danelerdir. Bunun dışında metotta likit limit ve doğal su muhtevası da etkili parametrelerdir. Yöntem kullanımı kolaylaştırmak amacıyla plastisite kartı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. Seed vd. tarafından önerilen sıvılaşma kriterleri

Tablo 2.18. İnce daneli zeminler için önerilen analiz yöntemlerinde kullanılan parametreler

İnce Daneli Zemin Sıvılaşma Analiz Metodu	W_n	LL	LI	PI	İ.D.O.	N_{60}	q_u	Hassaslık	η	C_u
Çin Kriteri	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-
Modifiye Çin Kriteri	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-
Andrews ve Martin, 2000	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Tezcan ve Özdemir, 2004	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Polito, 2001	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Bray vd., 2006	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Adapazarı Kriteri	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-
Japon Kriteri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Seed vd., 2003	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-

Atterberg limitleri ince daneli zeminlerin içerik ve karakteristik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Bu nedenle ince daneli zeminlerin sismik yüke maruz kalması durumundaki davranışının tahmin edilmesinde kullanılmaktadırlar. Tablo 2.19 incelendiğinde bahsedilen analiz yöntemleri ile ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yaygın kullanılan parametrelerin likit limit, doğal su muhtevası, likidite indisi, plastisite indisi ve ince dane oranı olduğu görülmektedir.

3.SERBEST ARAZİ KOŞULLARINDA SPT VE CPT TABANLI SIVILAŞMA ANALİZİ

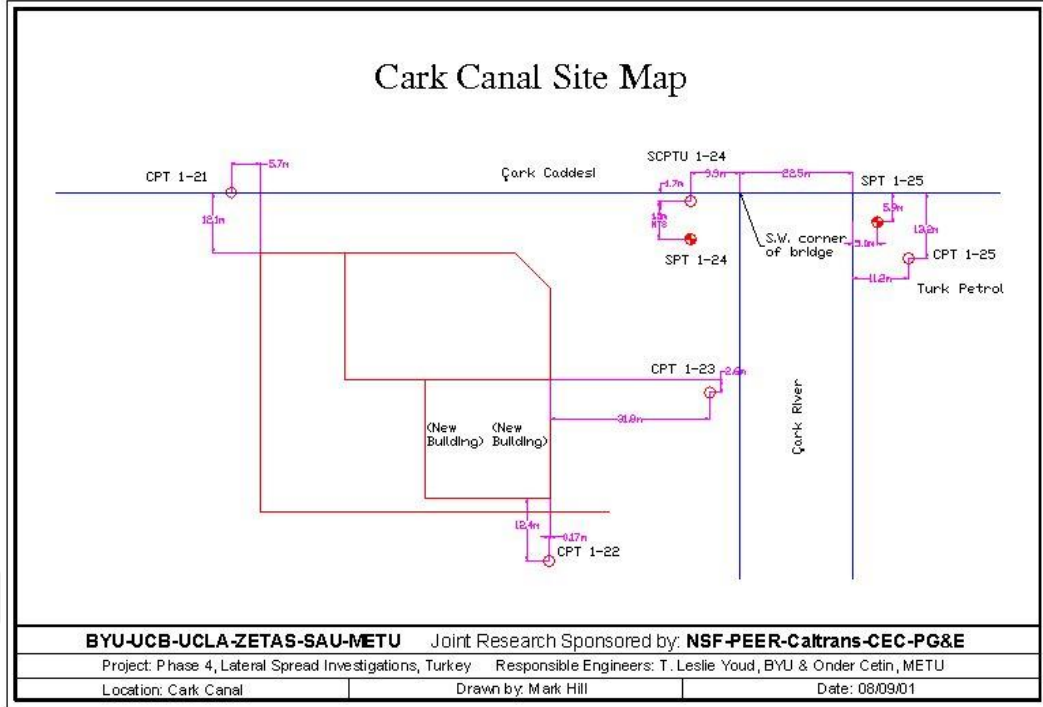
1999 Kocaeli depreminde birçok farklı sahada sivilaşma gözlenmiştir. Bu sahalarda zemin çoğunlukla kum ve silt içermektedir. Tez kapsamında sivilaşma analizi için Sakarya ili çevresinde 4 farklı sahada yapılan SPT deney verileri kullanılmıştır. Sivilaşma gözlenen ve gözlenmeyen bölgelerde sivilaşma analizi yapılarak kullanılan hesap yöntemleri karşılaştırılmıştır.

3.1.Saha ve Zemin Özellikleri

Adapazarı Çark caddesinde SPT deneyleri yapılarak sivilaşma için gerekli olan veriler elde edilmiştir. Çark suyu yakınında bulunan bu mevki, yer altı suyu açısından sivilaşmaya elverişlidir (Şekil 3.1). Çark suyu ve Çark caddesinin gösterildiği arazi planı Şekil 3.2'de sunulmuştur.

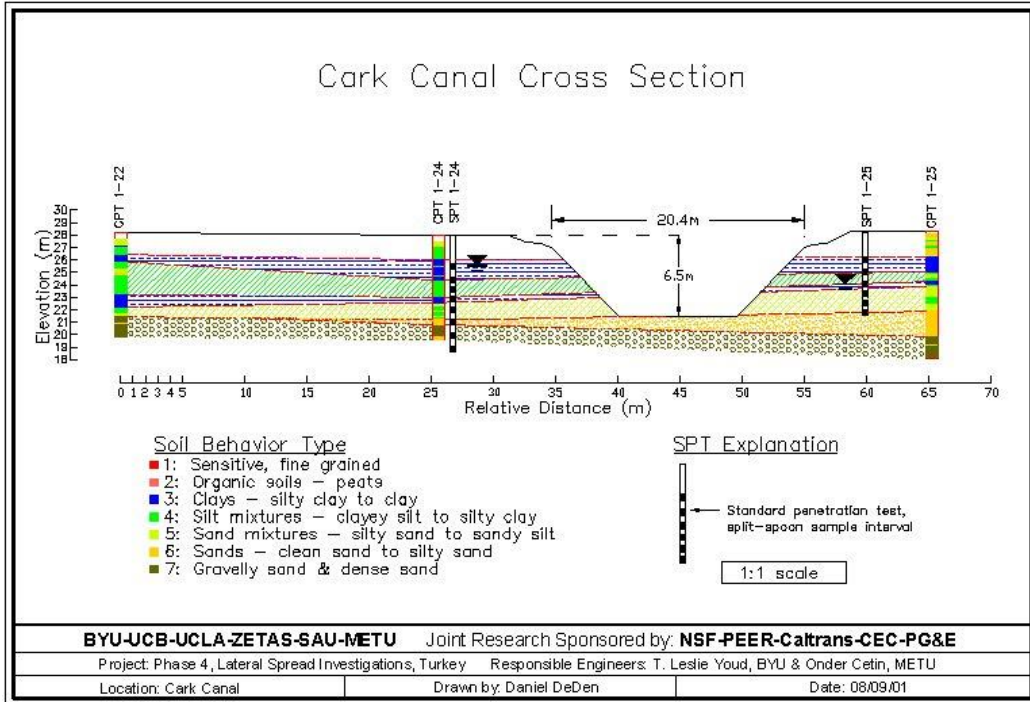


Şekil 3.1. Çark suyu (URL-1)



Şekil 3.2. Çark caddesi planı (URL-1)

Yer altı suyunun seviyesi yakında bulunan çay ile ilişkilidir. Çark suyunun karakteristik özelliklerinin ve zemin tabakalarının tahmini olarak gösterildiği kesit Şekil 3.3'te sunulmuştur.

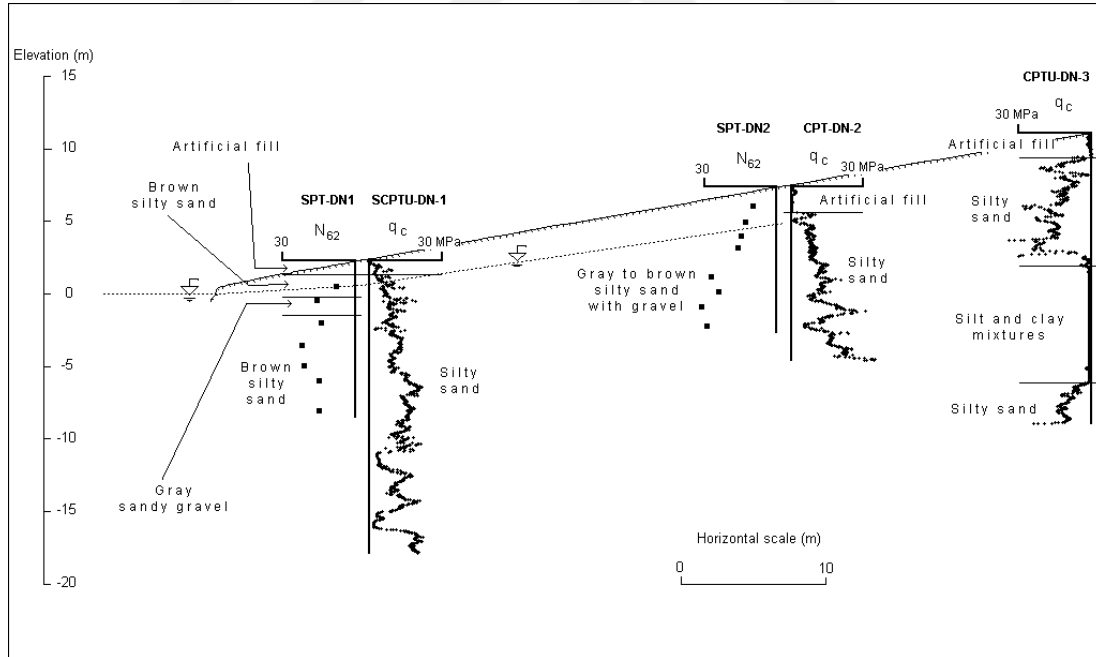


Şekil 3.3. Çark suyu kesiti (URL-1)

Değirmendere 1999 Kocaeli depreminin merkezüssü olan Gölcük ile komşu olan bir mevkidir. Bu bölgenin İzmit körfezine olan kıyısı Değirmendere burnu olarak adlandırılmaktadır ve 1999 Kocaeli depreminde büyük zemin yenilmelerinin gözlenmiştir (Şekil 3.4). Saha ve çevresinde yapılan SPT ve CPT deney verileri tez kapsamında sıvılaşma analizi için kullanılmıştır. Arazi deneylerinin yapıldığı bölgeler Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Değirmendere burnunda gözlenen zemin yenilmesi (URL-2)



Şekil 3.5. Değirmendere burnu mevkiinde yapılan arazi deneyleri ile ilgili bilgiler (URL-2)

Sapanca gölü kenarında bulunan Sapanca Vakıf Otel'i 1999 Kocaeli depreminde zemin yenilmesi nedeniyle büyük hasar alarak yıkılmıştır (Şekil 3.6-7). Göl kenarında bulunması nedeniyle zemin sıvılaşması için gerekli olan yer altı suyu koşulları

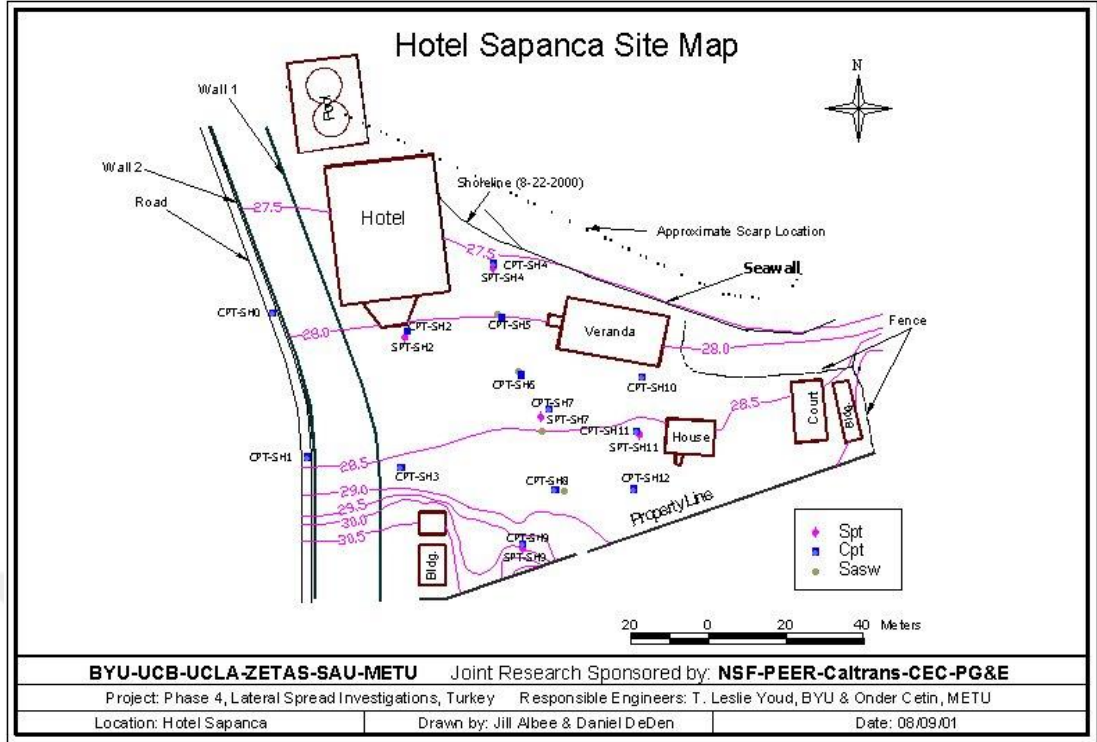
sağlanmaktadır. Bu saha ve yakınında yapılan arazi deneyleri verileri, sıvılaşma analizi için kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.6. 1999 Kocaeli depreminde zemin yenilmesi sonucu yıkılan Sapanca Vakıf Oteli (URL-3)



Şekil 3.7. Sapanca Vakıf Oteli çevresinde deprem sonrasında zeminde gözlenen deformasyonlar (URL-3)



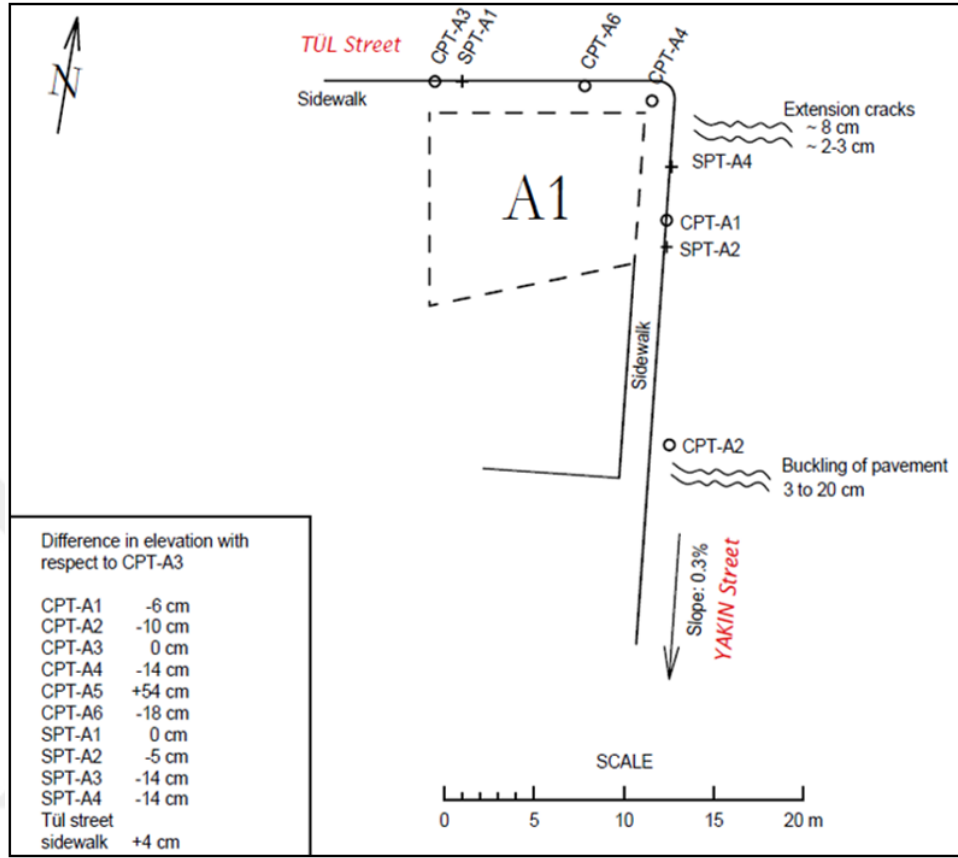
Şekil 3.8. Sapanca Vakıf Otel'i arazi planı (URL-3)

Sıvılaşma analizlerinde kullanılan bir diğer saha Sakarya Adapazarı'nda bulunan Yakın Caddesi'dir. Bu caddenin yakınlarında diğer sahaların aksine göl veya başka bir su kaynağı bulunmamaktadır. 1999 Kocaeli depremi sonrasında yol kaplaması üzerinde gözlenen deformasyonlar Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Yakın Caddesinde yol üzerinde depremden sonra meydana gelen hasarlar (URL-4)

Yakın caddesinin bulunduğu mevkiinin planı ve arazi deneylerinin lokasyonları Şekil 3.10'da verilmiştir.



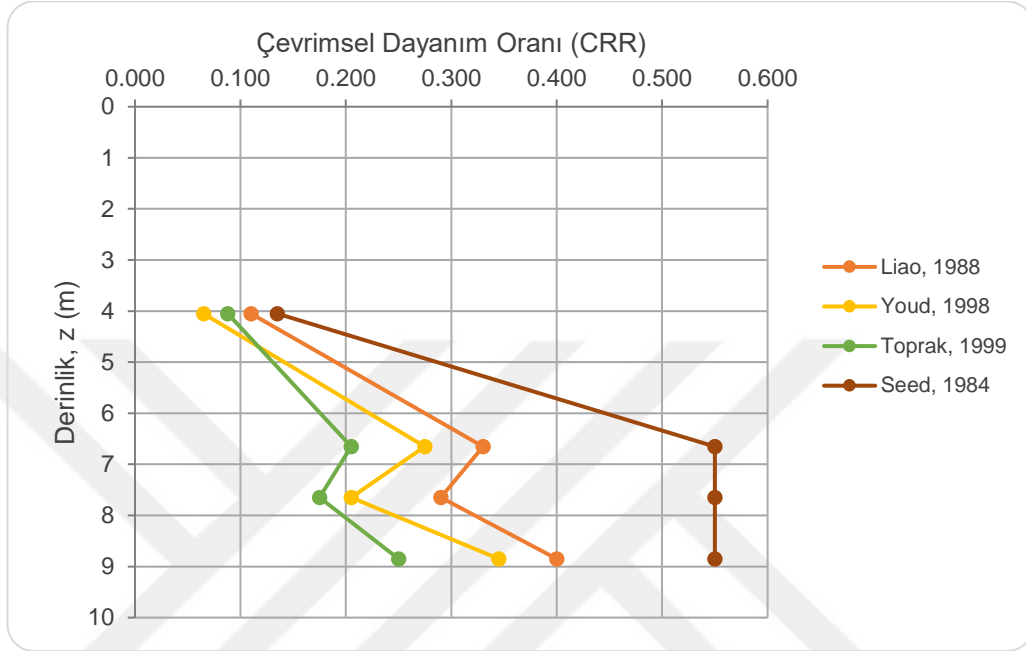
Şekil 3.10. Yakın caddesi üzerindeki hasarlar ve arazi deneyleri bölgeleri (URL-4)

3.2.Kum ve Silt İçeren Zeminlerde Serbest Arazi Koşullarında SPT Tabanlı Sıvılaşma Analizi

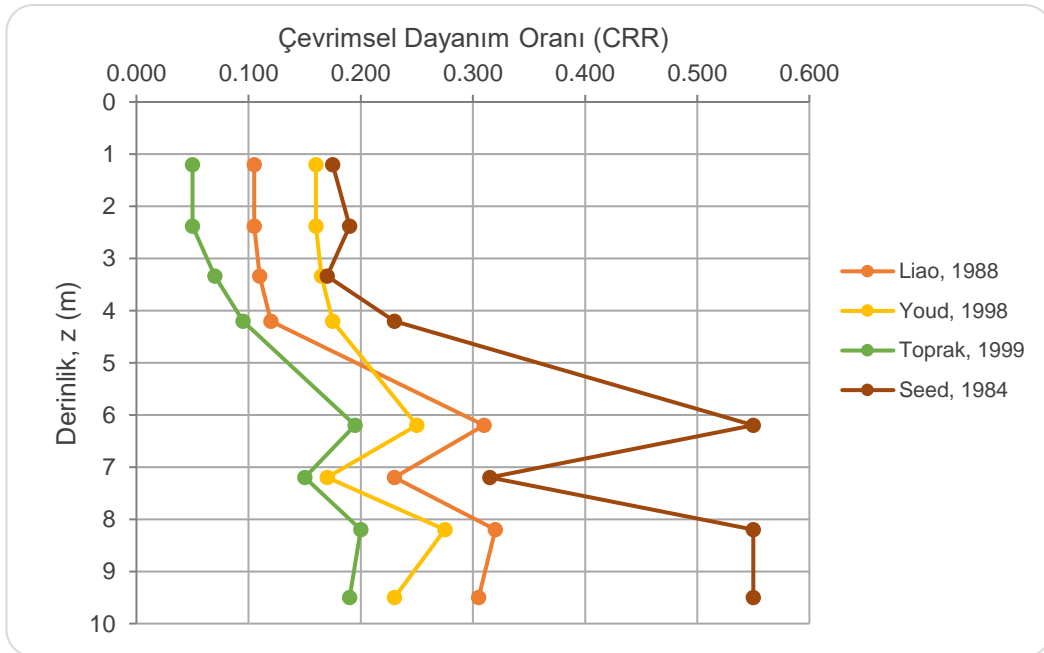
Serbest arazi koşulları zeminde herhangi bir yapı veya dolgunun bulunmadığı durumdur. Bu koşullarda zemin gerilmeleri jeolojik örtü yükünden kaynaklanır. Sıvılaşma analizlerinde kullanılan düşey efektif gerilmeler basit bir hesap yöntemiyle elde edilebilir. Arazide yapı olması zemin gerilmelerinde değişikliklere sebep olur ve bu gerilmelerin karmaşık bir yöntem ile hesaplanması gerekir. Zeminin yapı yükü etkisi altındaki sıvılaşma analizi belirlenmek istense de serbest arazi koşullarında analiz yapmak süreci kolaylaştırıp, yaklaşık bir sonuç elde edilmesini sağlar.

Tez kapsamında seçilen 4 arazide elde edilen SPT ve CPT verileri kullanılarak çevrimsel gerilme oranı yaklaşımı ile sıvılaşma analizleri yapıldı. SPT tabanlı arazide elde edilen darbe sayısı (N_{arazi}) üzerinde efektif yük ve deney ekipmanı düzeltmeleri

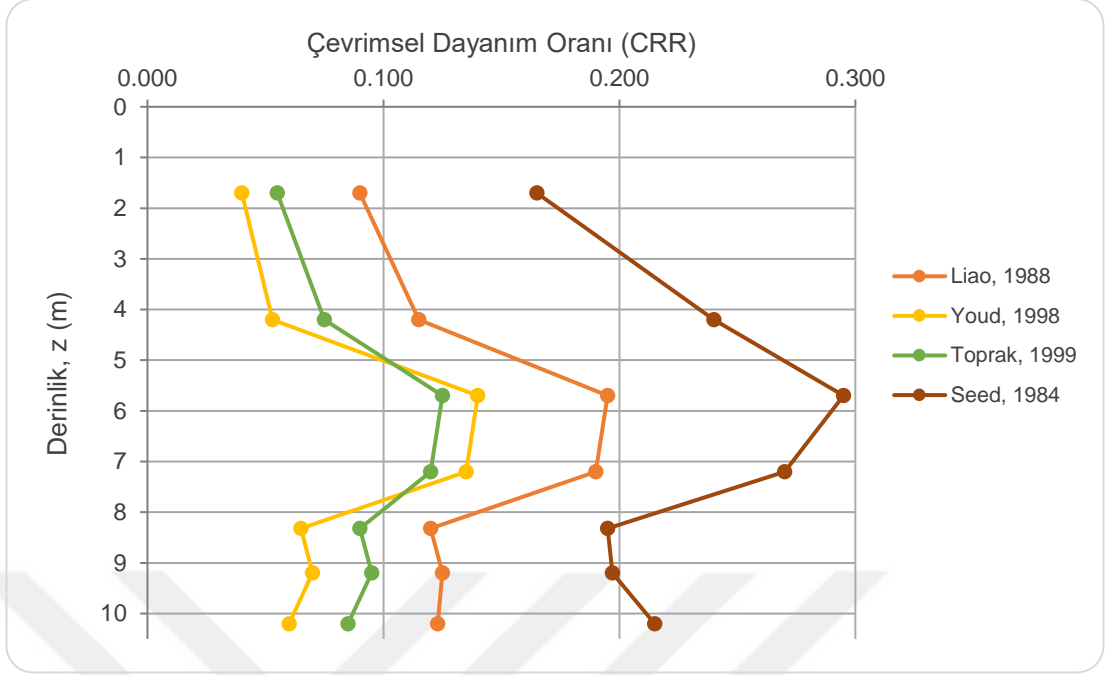
yapıldıktan sonra Liao (1988), Youd (1998), Toprak (1999) ve Seed (1985) tarafından önerilen CRR eğrileri kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Standart penetrasyon deney verileri ile elde edilen çevrimsel dayanım oranları Şekil 3.11-18'de sunulmuştur.



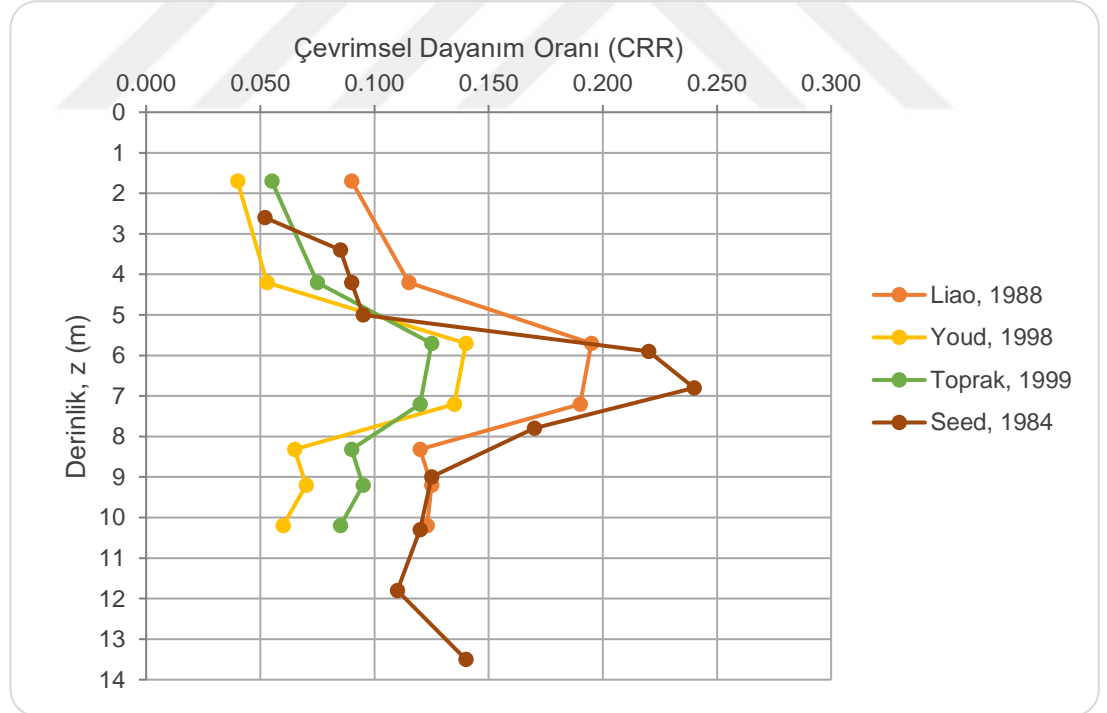
Şekil 3.11. Çark caddesi çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



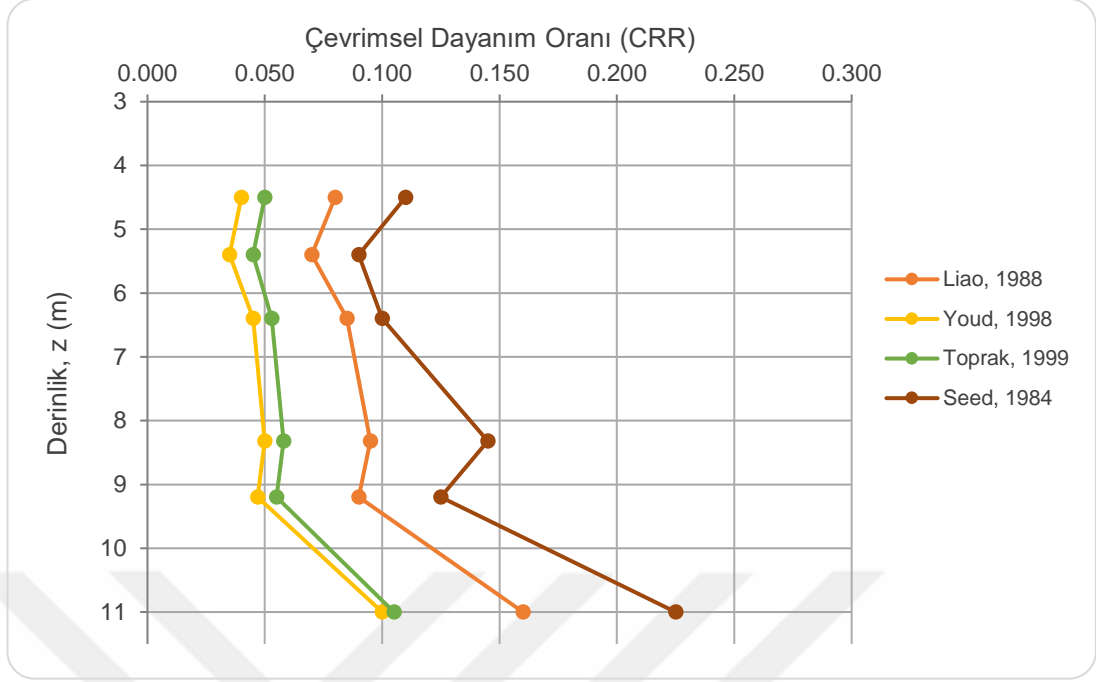
Şekil 3.12. Değirmendere burnu (SPT-I) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



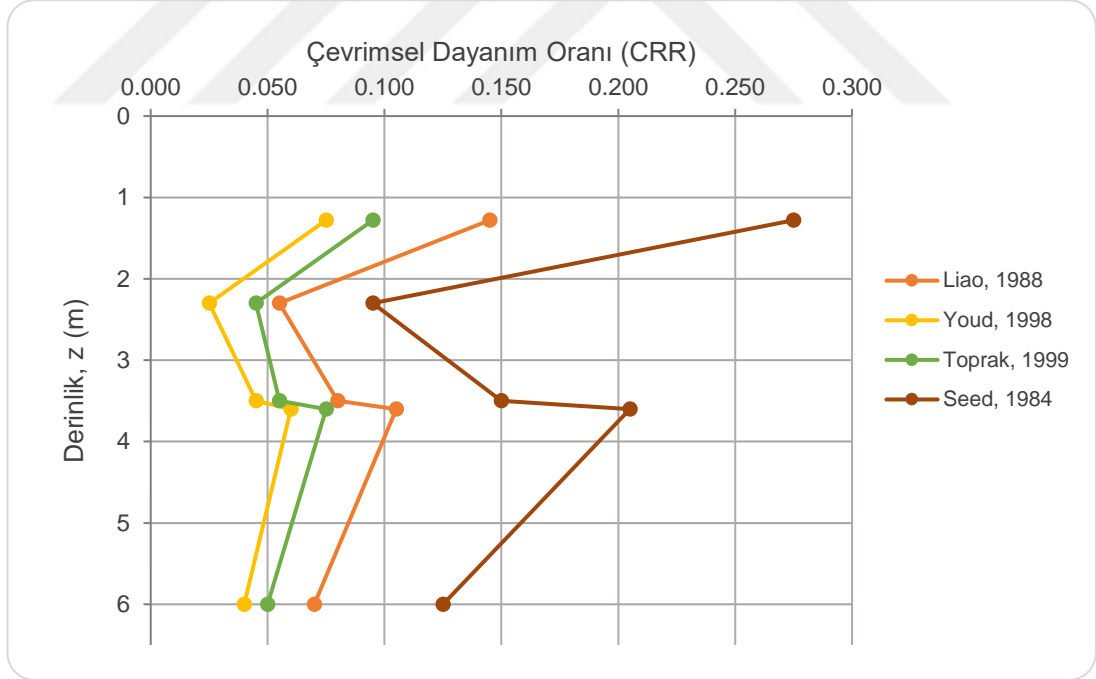
Şekil 3.13. Değirmendere burnu (SPT-II) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



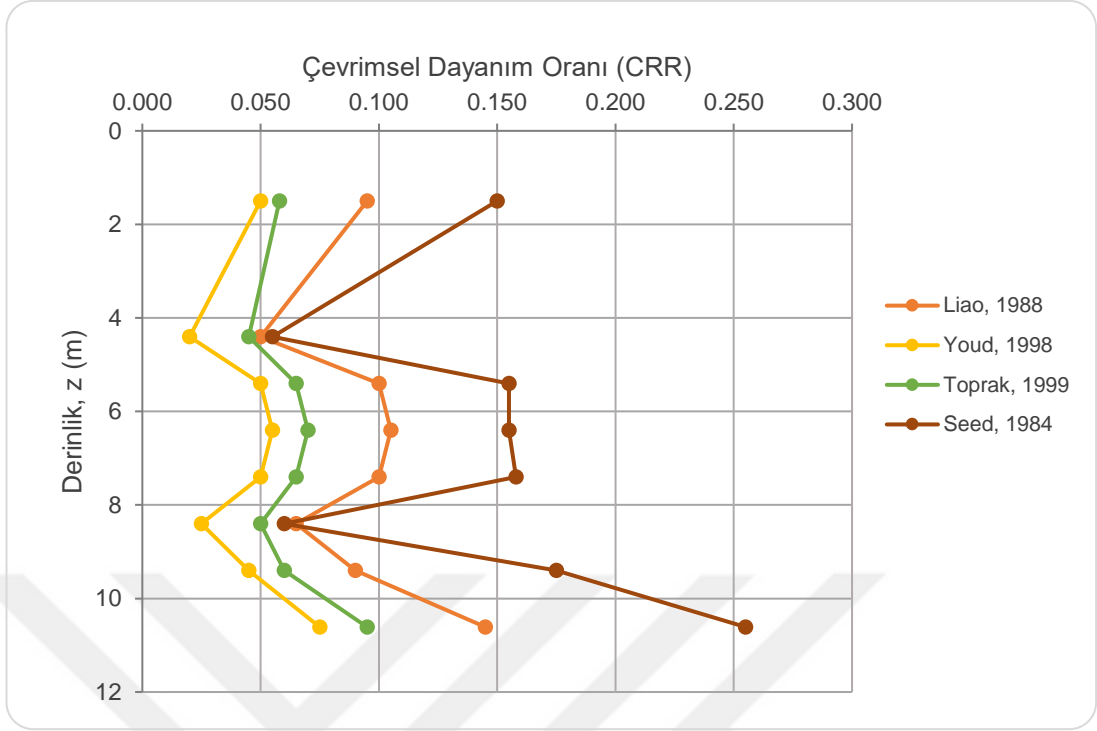
Şekil 3.14. Sapanca Oteli (SPT-I) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



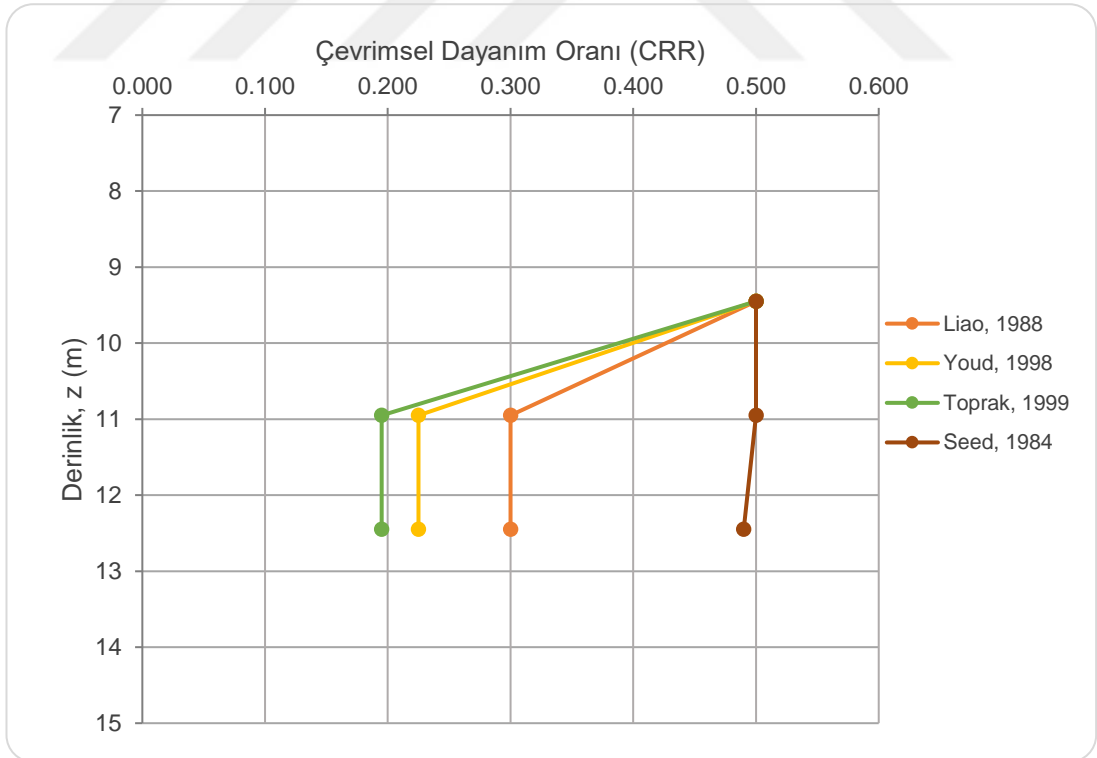
Şekil 3.15. Sapanca Oteli (SPT-II) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



Şekil 3.16. Sapanca Oteli (SPT-III) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



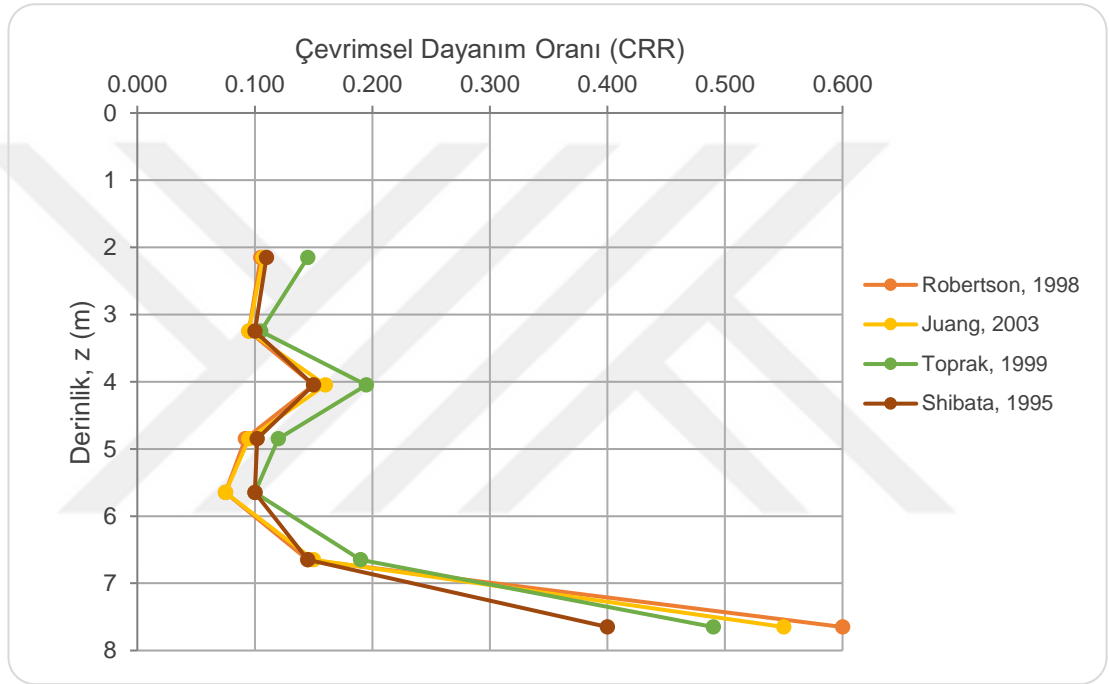
Şekil 3.17. Sapanca Oteli (SPT-IV) çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



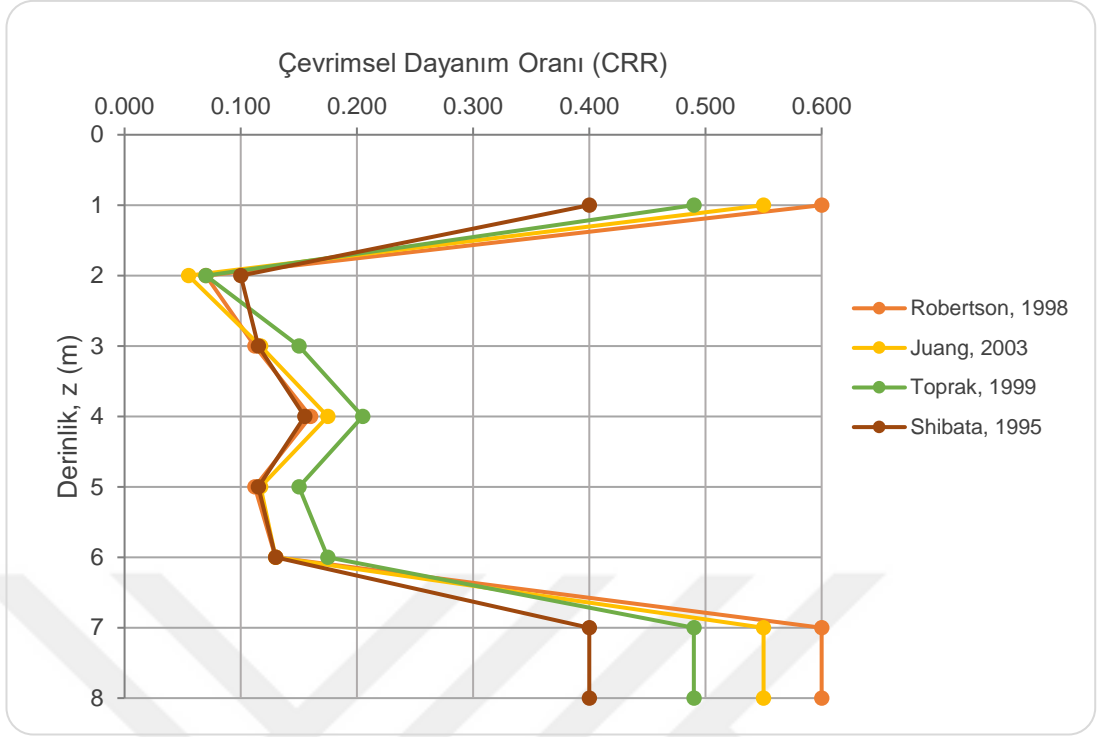
Şekil 3.18. Yakın Caddesi çevresinde yapılan SPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi

3.3.Kum ve Silt İçeren Zeminlerde Serbest Arazi Koşullarında CPT Tabanlı Sıvılaşma Analizi

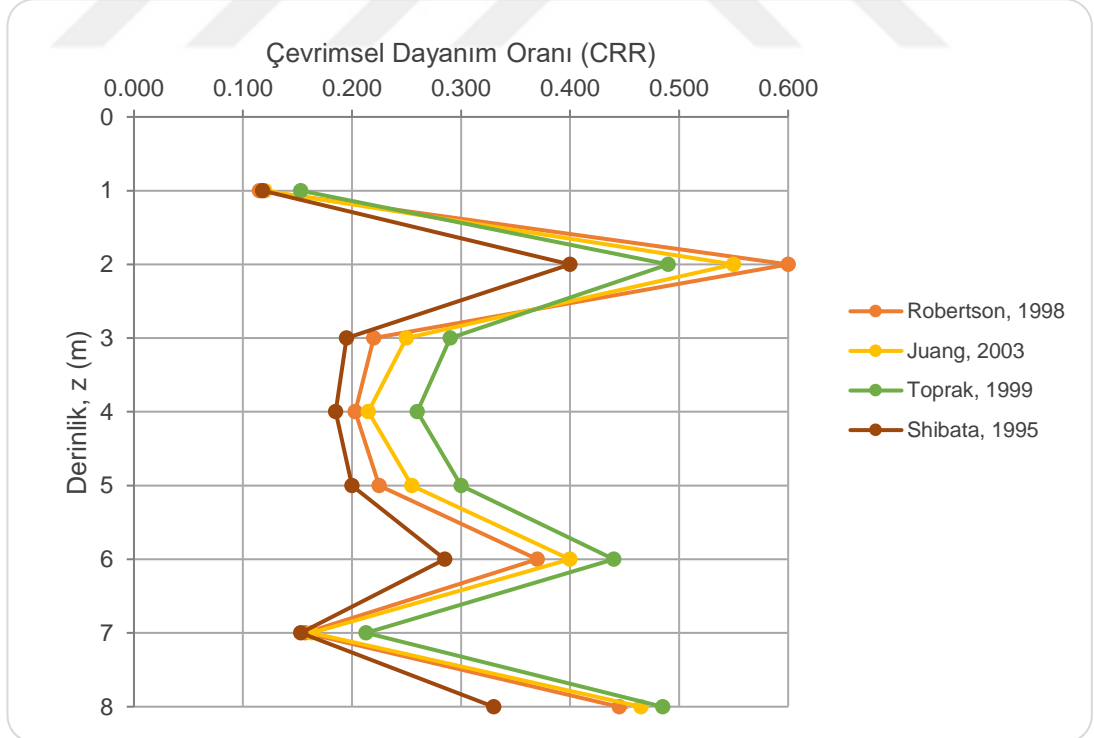
Konik penetrasyon deneyi ile arazide elde edilen uç direnci (q_c) ve sürtünme oranı (f_s) üzerinde efektif yük ve ince dane oranı düzeltmesi yapılarak elde edilen $q_{c,1}$ ile Robertson (1998), Juang (2003), Toprak (1999) ve Shibata (1995) tarafından önerilen CRR eğrileri kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Konik penetrasyon deney verileri ile elde edilen çevrimsel dayanım oranları Şekil 3.19-36'da sunulmuştur.



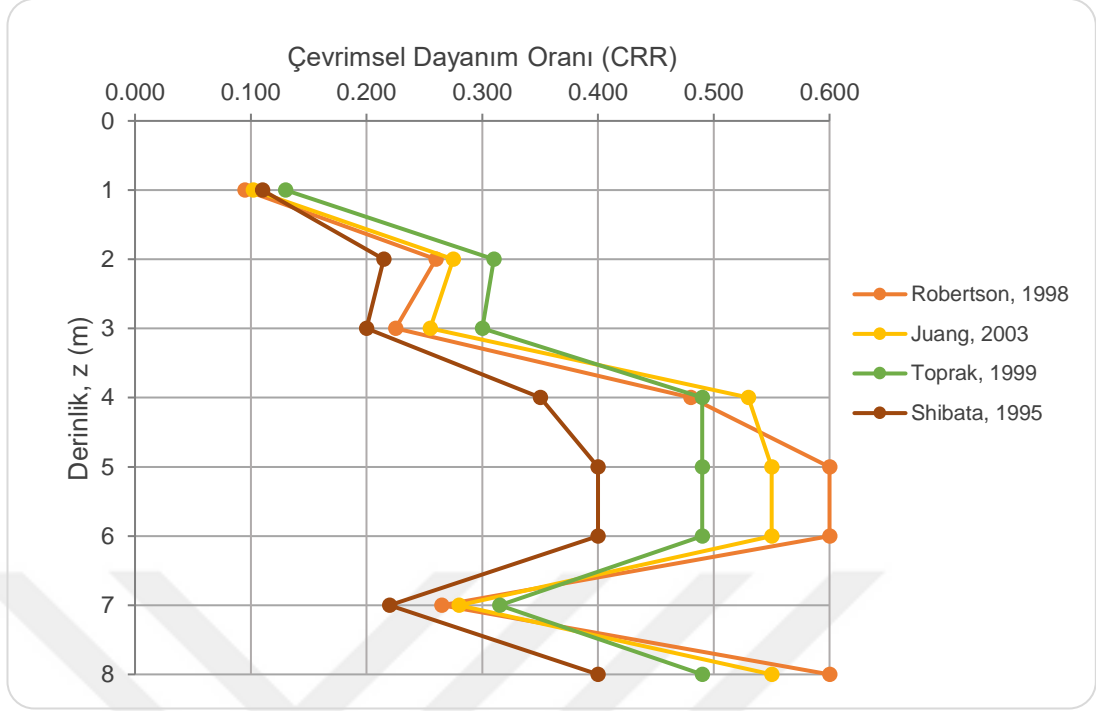
Şekil 3.19. ark Caddesi (CPT-I) evresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



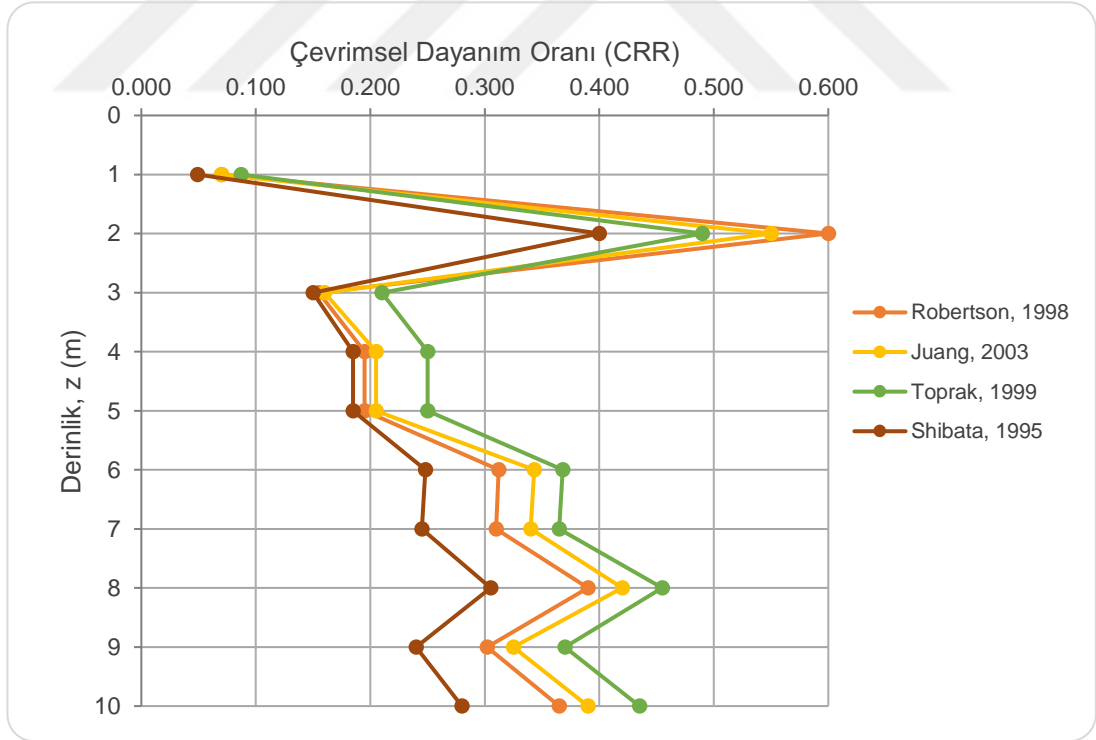
Şekil 3.20. Çark Caddesi (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



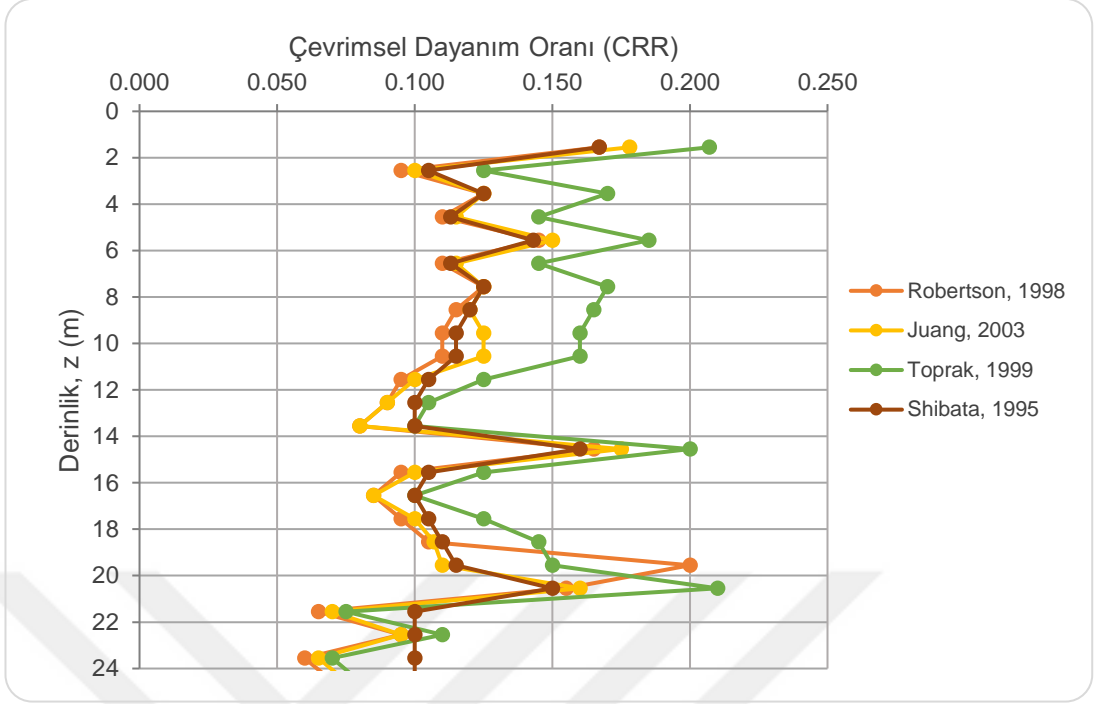
Şekil 3.21. Değirmendere burnu (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



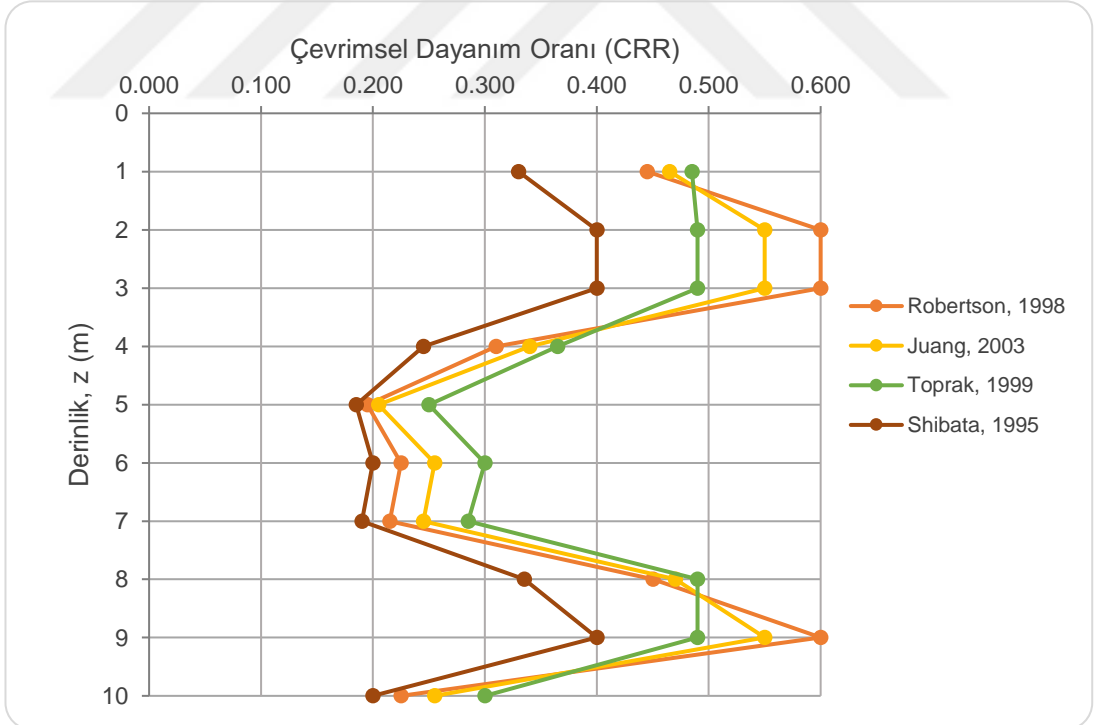
Şekil 3.22. Değirmendere burnu (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



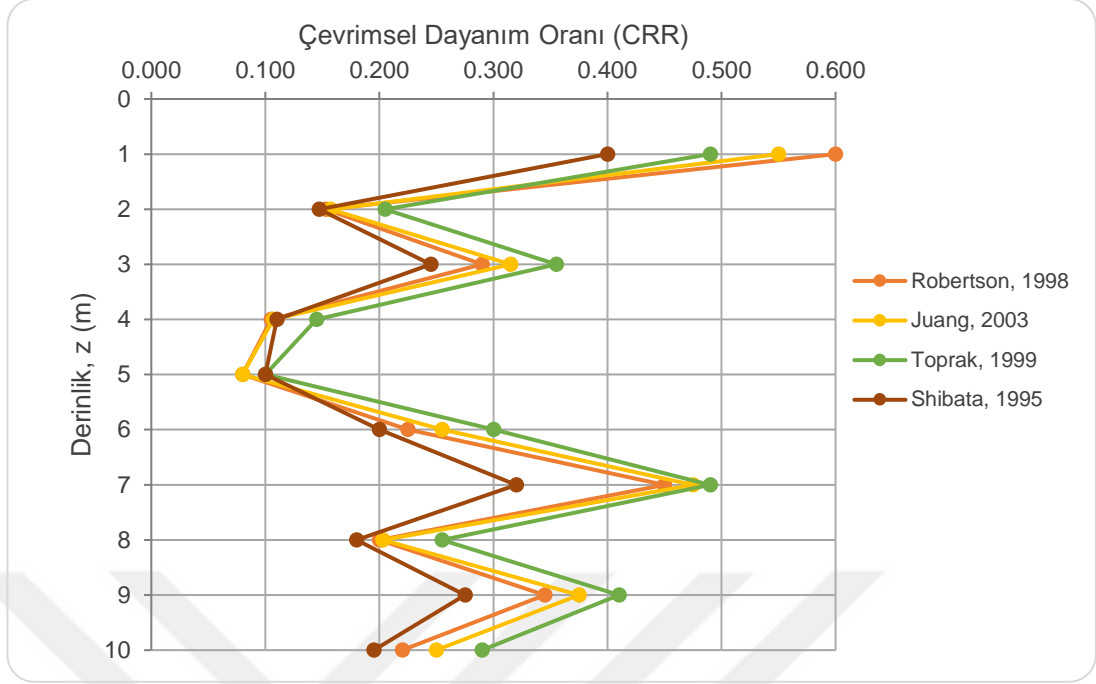
Şekil 3.23. Değirmendere burnu (CPT-III) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



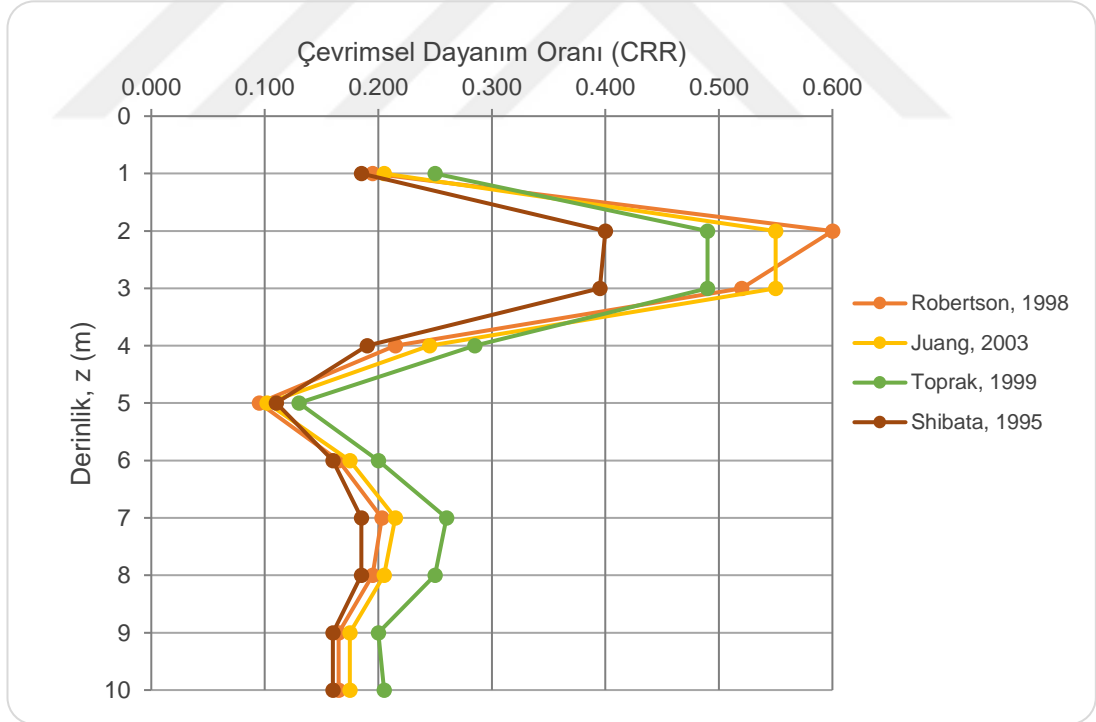
Şekil 3.24. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



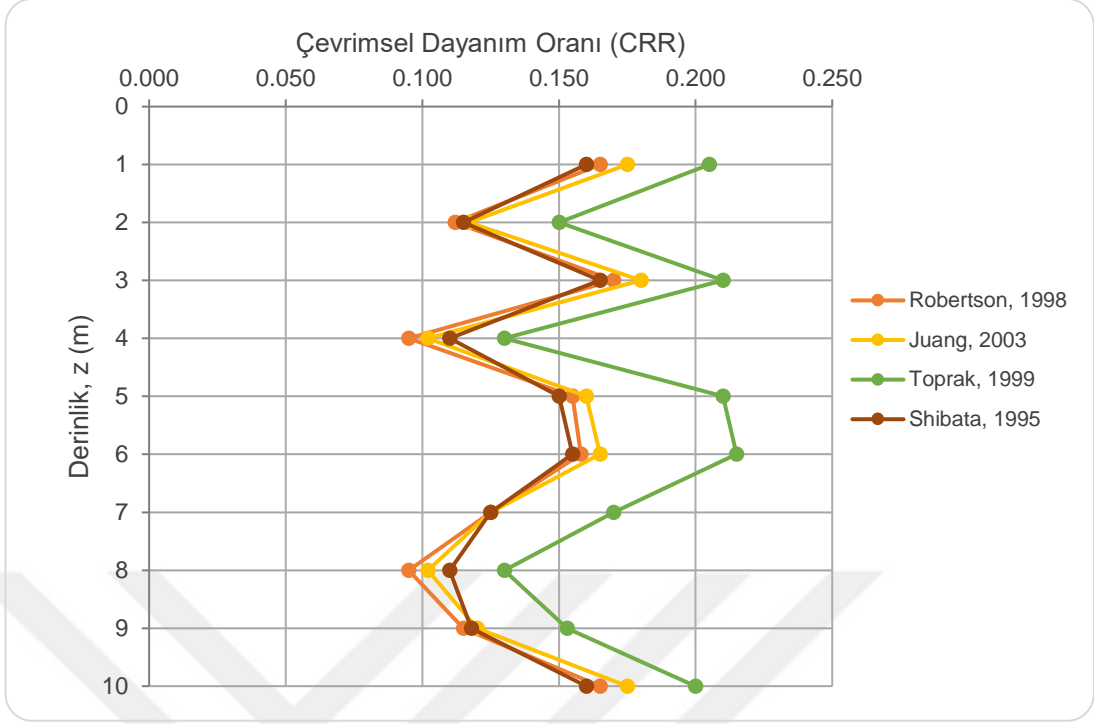
Şekil 3.25. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



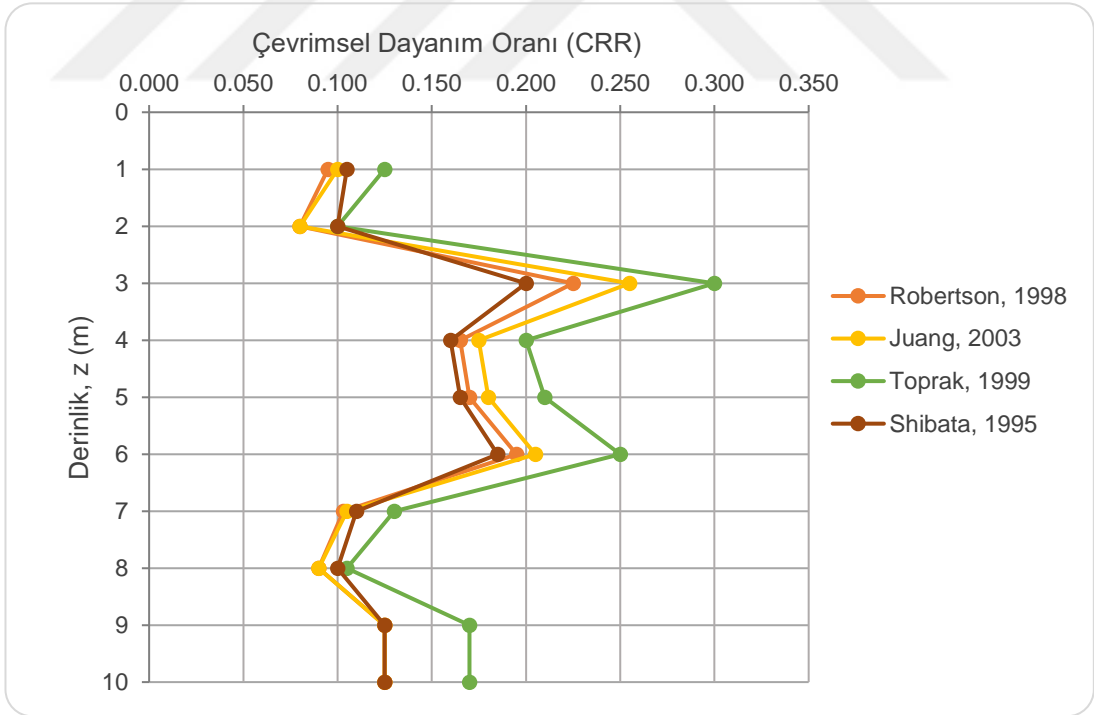
Şekil 3.26. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-III) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



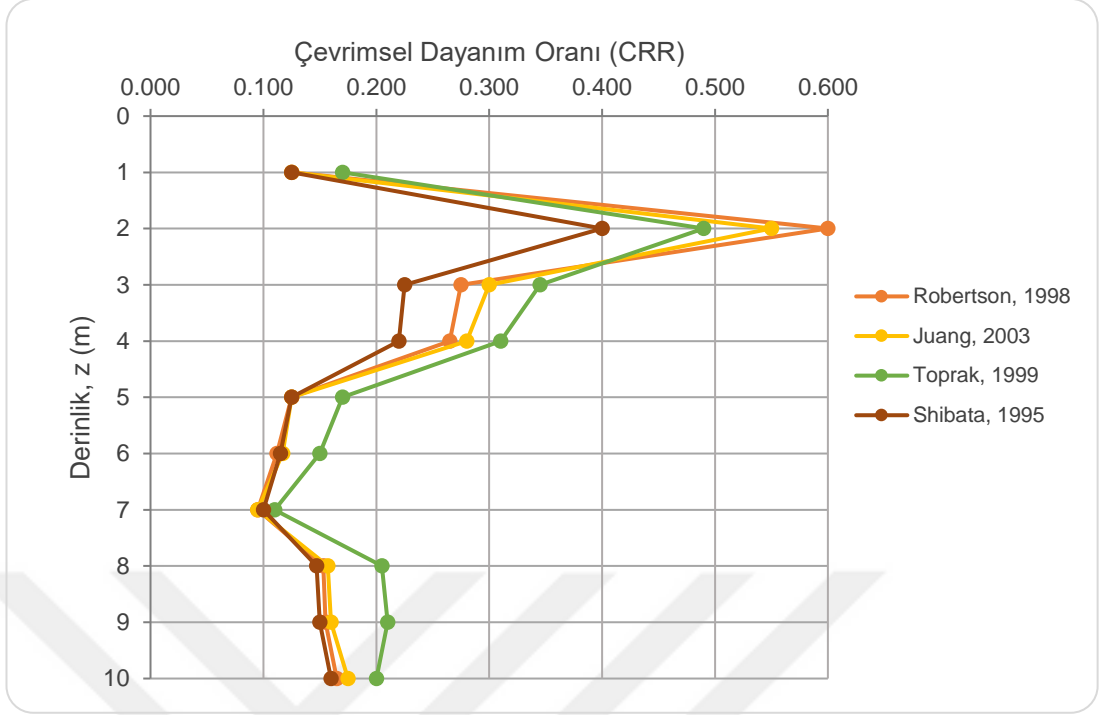
Şekil 3.27. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-IV) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



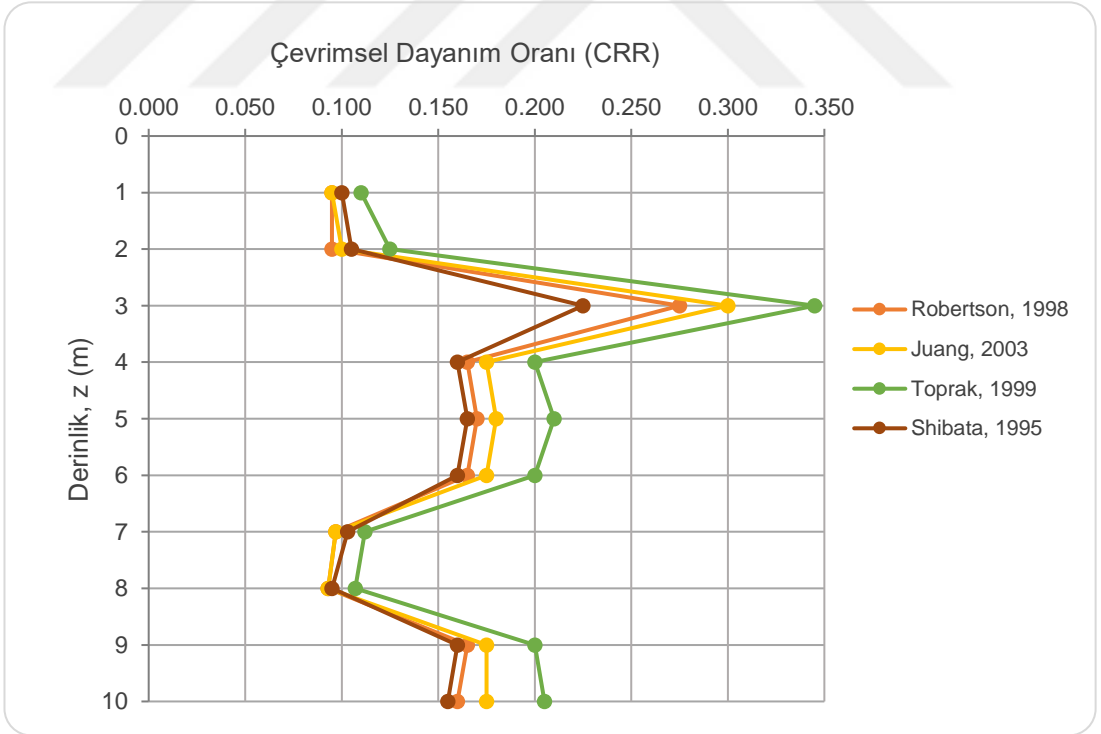
Şekil 3.28. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-V) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



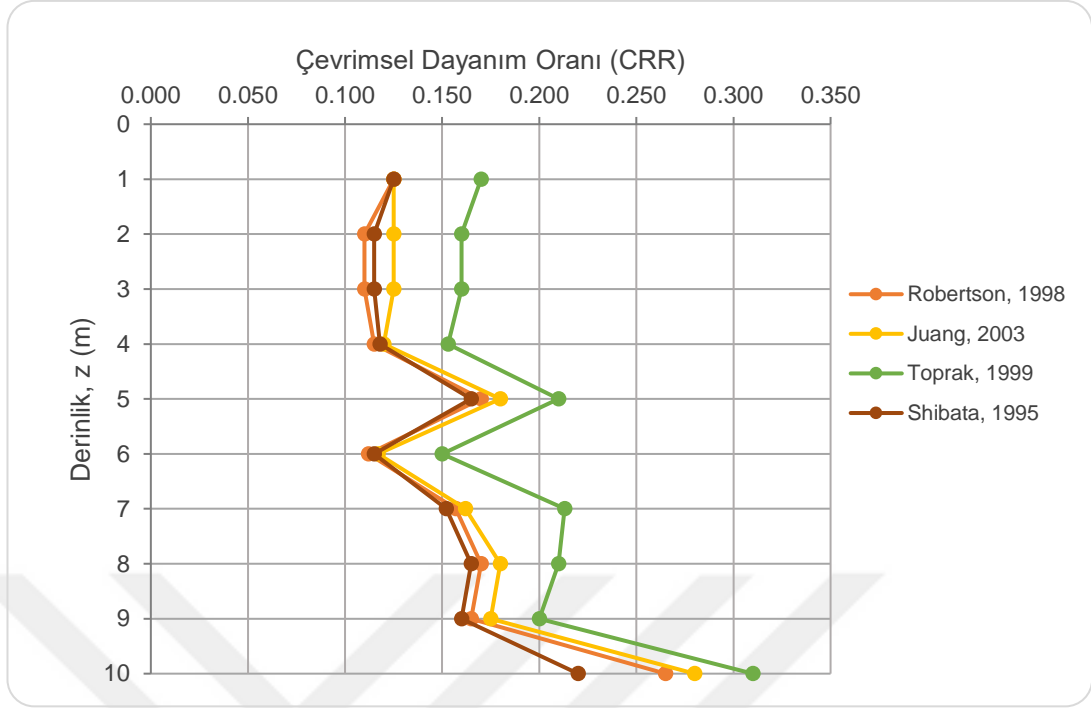
Şekil 3.29. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-VI) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



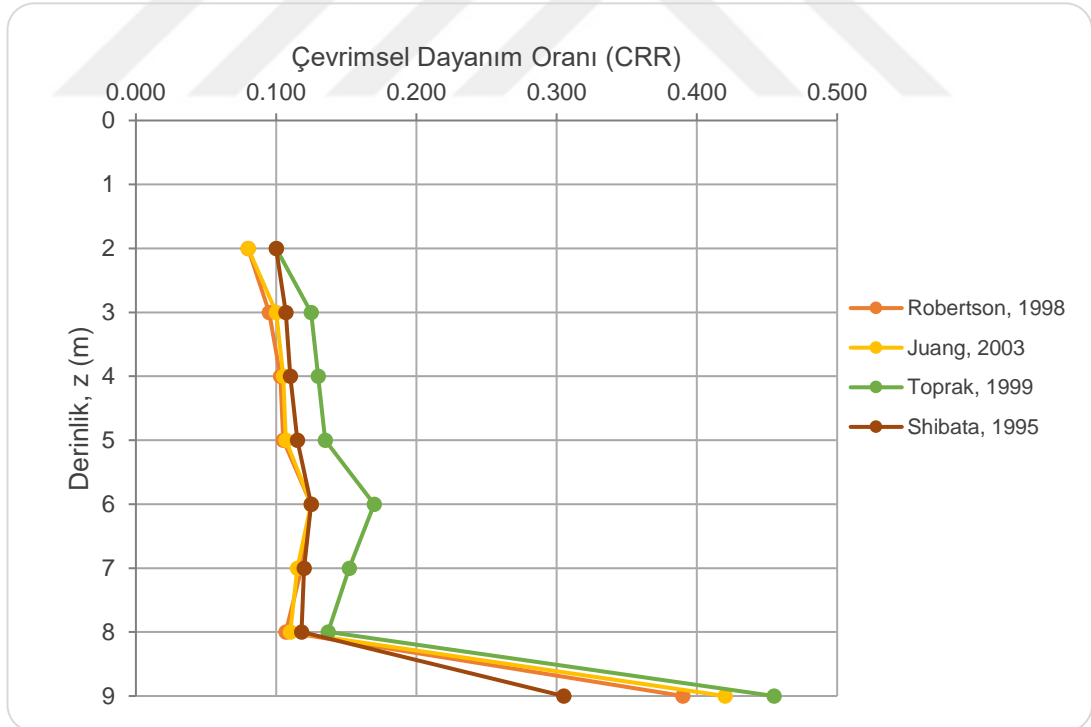
Şekil 3.30. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-VII) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



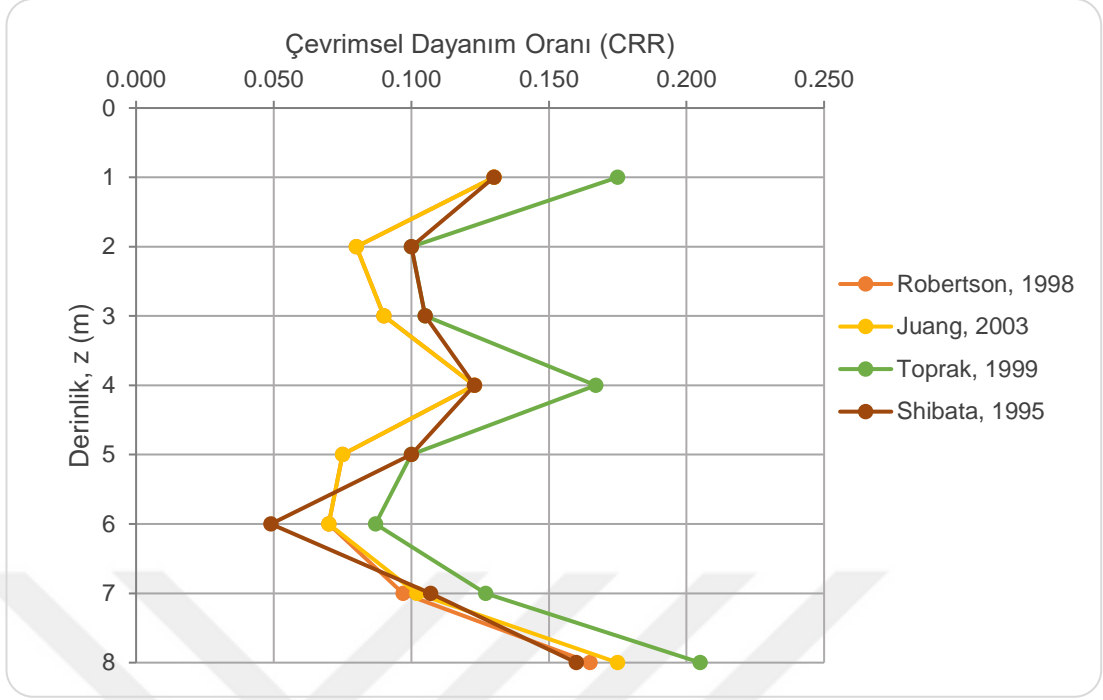
Şekil 3.31. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-VIII) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



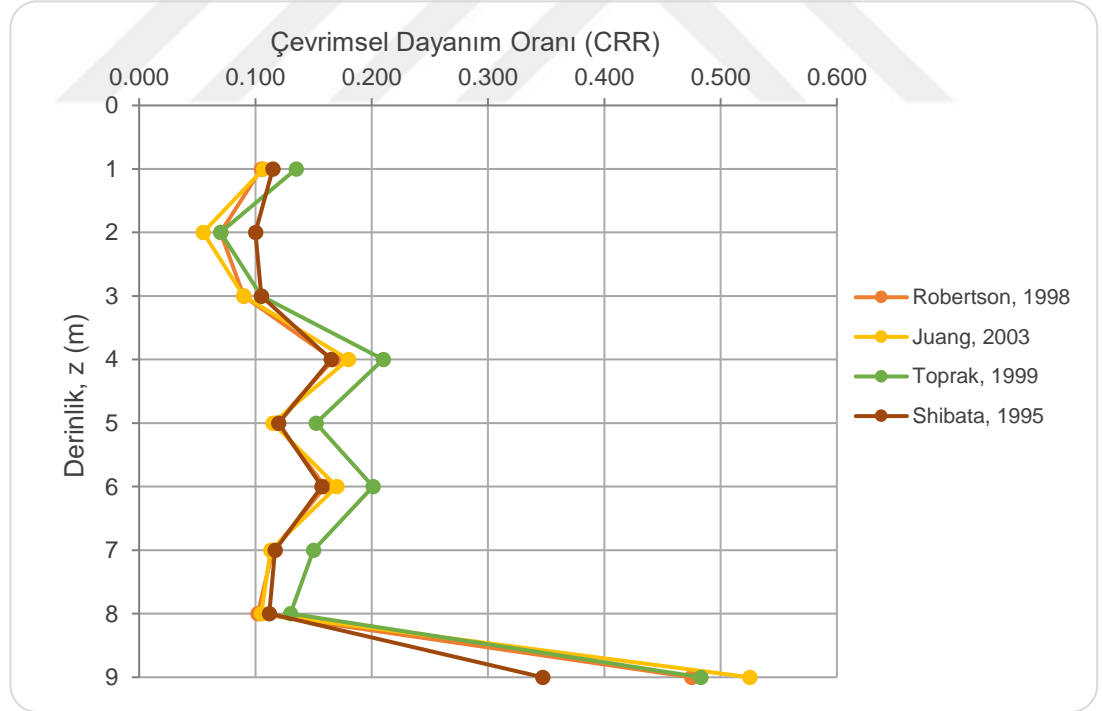
Şekil 3.32. Sapanca Vakıf Oteli (CPT-IX) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



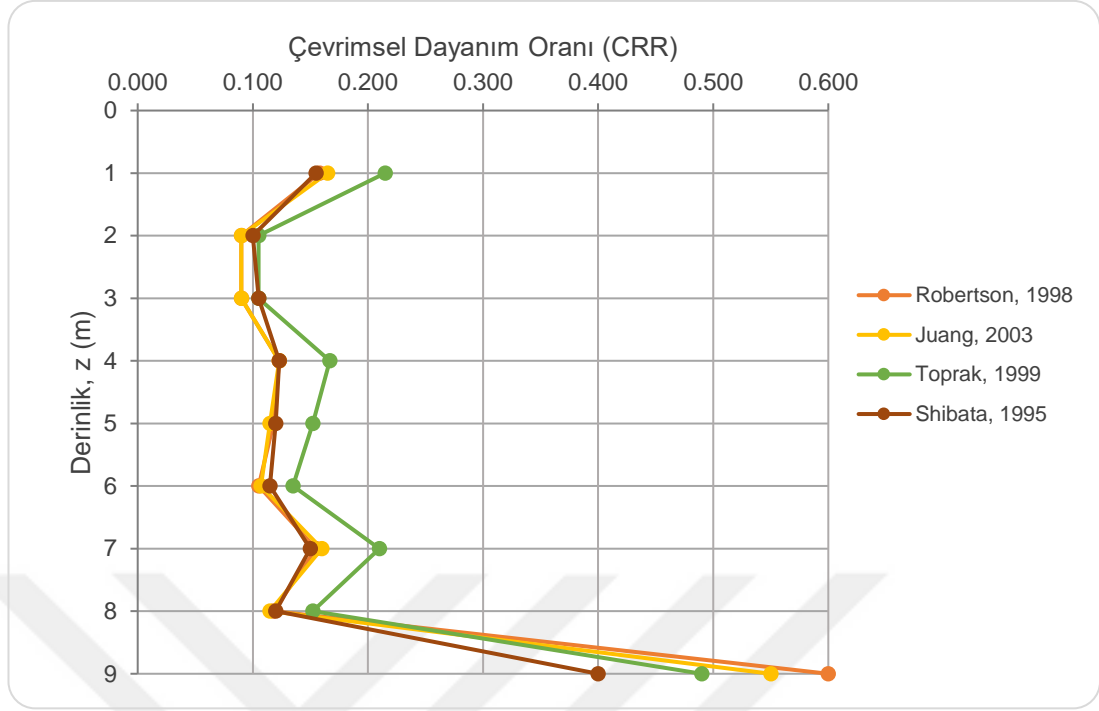
Şekil 3.33. Yakın Caddesi (CPT-I) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



Şekil 3.34. Yakın Caddesi (CPT-II) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



Şekil 3.35. Yakın Caddesi (CPT-III) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi



Şekil 3.36. Yakın Caddesi (CPT-IV) çevresinde yapılan CPT deney verileri ile elde edilen CRR-z ilişkisi

Aynı arazi koşullarında, 1999 yılında Toprak ve diğerleri tarafından hazırlanan çalışmada elde edilen eğri ile en küçük CRR'ye ulaşılmıştır ve en emniyetli sınıflama analizi sonuçları elde edilmiştir. Bu yaklaşımda Seed ve diğerleri (1984) tarafından önerilen eğri ile aynı zemin koşulları için kullanıldığında en büyük dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Bu nedenle güvenlik sayısının en düşük olduğu sınıflama analizi sonuçları elde edilmiştir.

4.SIVILAŞMA ANALİZİNDE ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

Günümüzde sivilaşıma analizleri çoğu zaman serbest arazi koşulları dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu analizlerde zemin yüzeyinin eğimsiz ve üzerinde herhangi bir yükün olmadığı kabul edilir. Zemin yüzeyinin eğimli olması durumunda ve zeminde yapı olması durumunda temel altında oluşacak olan kayma gerilmeleri sivilaşıma dayanımını olumsuz olarak etkileyecektir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Zemin-yapı etkileşimi, statik ve dinamik koşullar için iki aşamada incelenmelidir. Statik koşullar dikkate alındığında, temel tabanında oluşacak olan ilave kayma gerilmeleri zemin dayanımını olumsuz olarak etkilerken, yapı kaynaklı gerilme artışları sivilaşıma direncini artırması beklenmektedir. Dinamik koşullarda temel tabanı ile zemin yüzeyi arasında oluşacak olan sürtünme kuvveti ve zemin ile temelin rijitlik farkından kaynaklanan kayma gerilmeleri, zemin sivilaşıma potansiyelini artırmaktadır (Unutmaz, 2008). Bu sebeple zeminin yapı yükü altında sivilaşıma potansiyeli hakkında kısmen yetersiz kalmaktadır. Çeşitli yapı türleri için zemin-yapı etkileşimi adına 5 etkenden bahsetmek mümkündür (Rollins ve Seed, 1990);

1. Başlangıç statik kayma gerilmesi
2. Çevre basıncındaki değişim
3. Aşırı konsolidasyon oranı
4. Zeminde düşey efektif gerilme artışı
5. Sismik yükleme durumunda yapı tepkisi

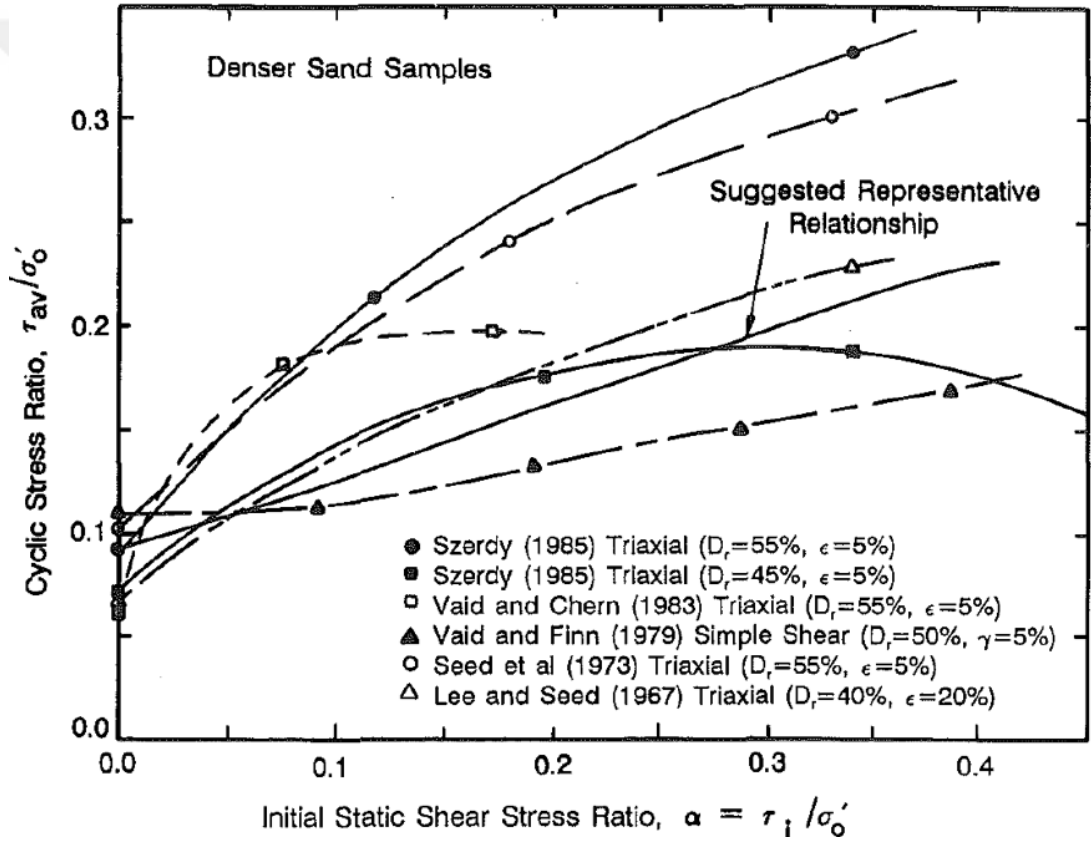
Sivilaşıma analizlerinin zeminde yapı kaynaklı özel gerilme durumları dikkate alınarak yapılması, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

4.1.Başlangıç Statik Kayma Gerilmesi Etkisi

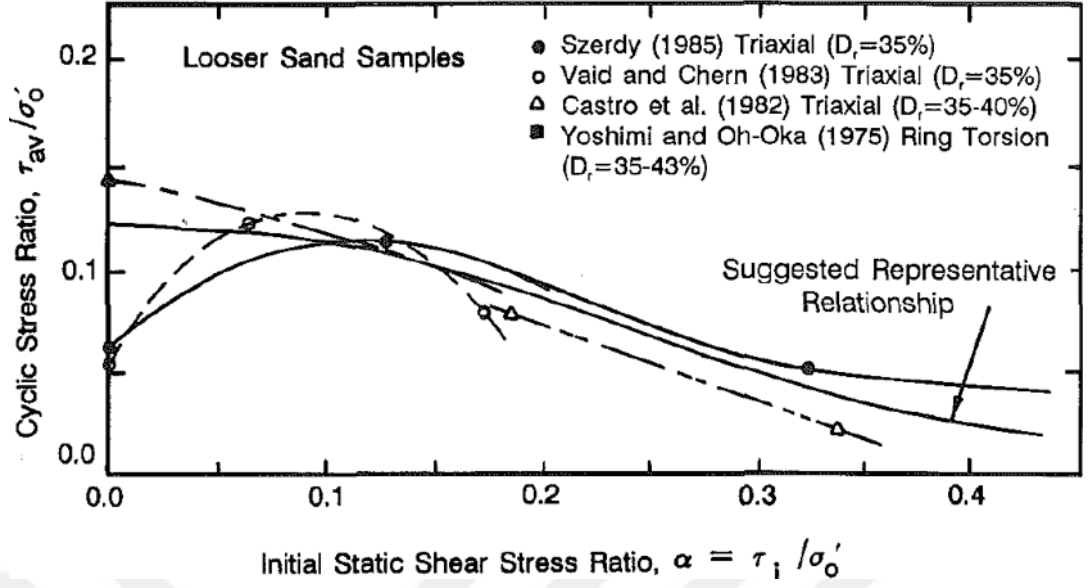
Suya doygun kumların drenajsız çevrimsel yükleme durumundaki davranışında başlangıç kayma gerilmesinin varlığından etkilenmektedir. Serbest arazi koşullarında denge durumunda bulunan her zeminde, herhangi bir yatay düzlemde kayma gerilmesi bulunmaz. Zeminde yapı olması durumunda, yükleme etkisiyle temel kenarı altındaki zeminde, incelenecek olan her yatay düzlem için kayma gerilmeleri oluşacaktır. Bu durum çoğu yapı için geçerlidir. Bodrum katına sahip olan yapılarda

yapılan kazı ile zeminde oluşan yük kaybının, yapı yüküne denk gelmesi durumunda bu gerilme artışından bahsedilmez.

Başlangıç statik kayma gerilmesinin (τ_i), düşey efektif gerilmeye oranı (σ_{v0}') statik kayma gerilmesi olarak tanımlanır ve α ile ifade edilir. Serbest arazi koşullarında α sıfır iken yapı kenarına yaklaştıkça sıfırdan daha büyük bir değer almaktadır. Yapılan laboratuvar çalışmaları sonrasında, sıkı kum numuneleri için ($D_R > \%40$) α arttıkça çevrimsel gerilme oranının ve bu sayede sıvılaşma olasılığının arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.1). Daha gevşek kum numuneleri için ise α -CSR arasında bunun tam tersi olan bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.2).



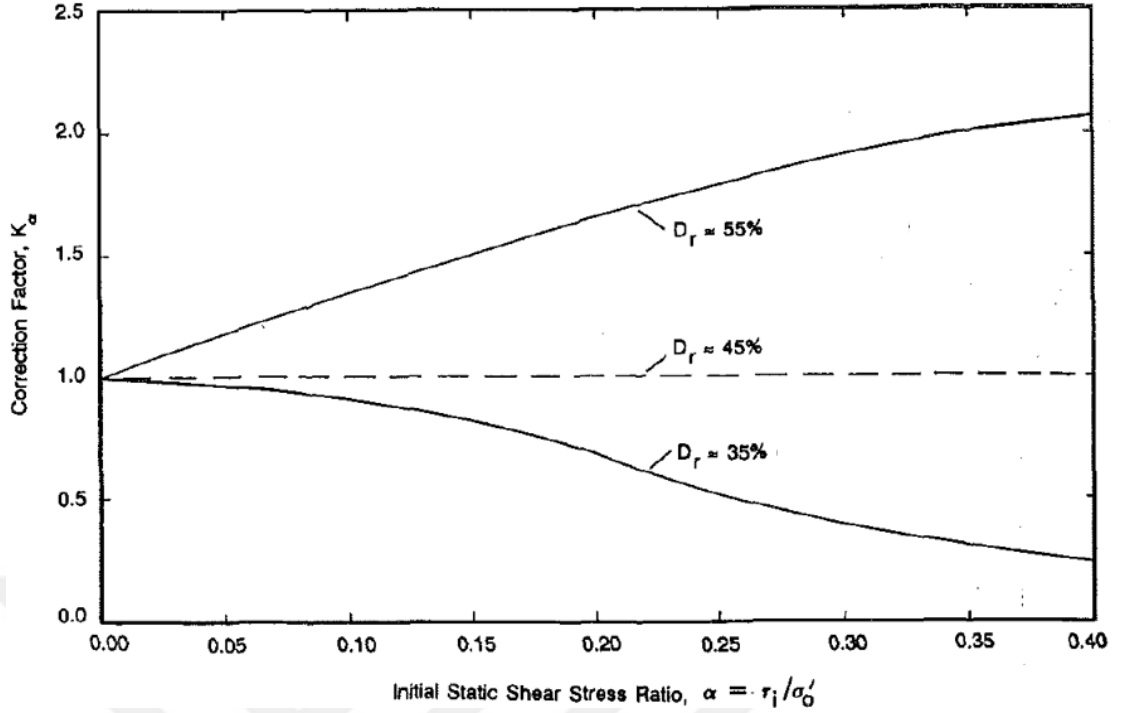
Şekil 4.1. 10 çevrim için sıkı kum numuneleri için ($D_R > \%40$) α -CSR ilişkisi



Şekil 4.2. 10 çevrim için gevşek kum numuneleri için ($D_R < 40\%$) α -CSR ilişkisi

CSR ile K_α düzeltme faktörü kullanılarak, başlangıç statik kayma gerilmesi etkisi düzeltilmesi yapılmış olan eşdeğer çevrimsel gerilme oranına ulaşılmaktadır. K_α ; rölatif sıklık (D_R), çevre basıncı veya yatay zemin gerilmesi (σ_3) ve kabul edilen kırılma kriterine göre farklılık göstermektedir. Kum zeminler için K_α ile etkilendiği parametreler arasındaki ilişki, kritik durum (yenilme durumu) analizi veya yarı-stabil durum analizi ile incelenebilir.

Seed (1983) tarafından önerilen K_α - α ilişkisi Şekil 4.3'deki gibidir. K_α zemin rölatif sıklık değerine göre farklılık göstermektedir. Zeminde α arttıkça; $D_R = 55\%$ için K_α 'nın 1,0 ile 2,1 arasında, $D_R = 35\%$ için K_α 'nın 1,0 ile 0,25 arasında değer aldığı ve $D_R = 45\%$ için K_α 'nın yaklaşık 1,0'da sabitlendiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 4.3. Farklı rölatif sıklıktaki zeminler için K_α - α ilişkisi

Başlangıç statik gerilmesi düzeltme faktörünün (K_α) belirlenmesinde, rölatif genişleme indeksini (I_{RD}) içeren bir bağıntı önerilmiştir (Boulanger, 2003). Kumdaki ortalama dayanım ve hacim değişikliğinin tahmin edilmesinde Bolton (1986) tarafından bağıntı aşağıdaki gibidir;

$$I_{RD} = D_R \left(Q \ln \frac{100 \cdot p'}{P_a} \right) - 1$$

Burada;

D_R = Rölatif sıklık

Q = Dane şekline göre belirlenen ampirik katsayı (Tablo 4.1)

p' = Ortalama efektif normal gerilme

P_a = Atmosfer basıncı

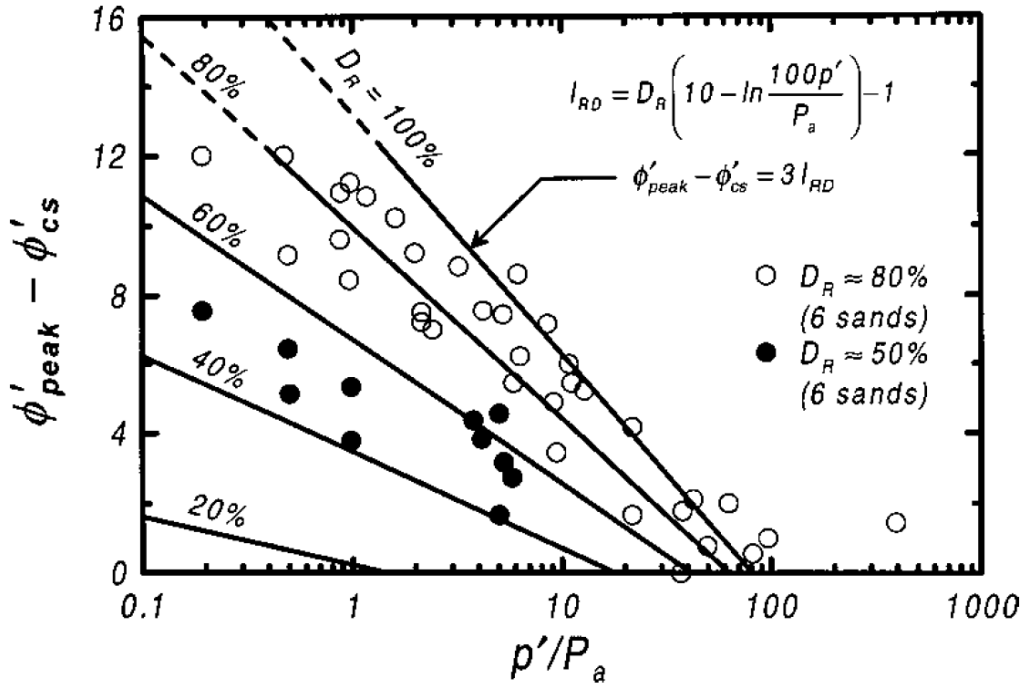
Tablo 4.1. Dane türüne göre Q katsayısının aldığı değerler

Q	Zemin Dane Özelliği
10	Kuvars ve feldspat
8	Kireçtaşı
7	Antrasit
5,5	Kalker

Kritik durumda (zemin yenilme anı) $I_{RD}=0$ 'dır. Bu sayede zeminin yenilme anındaki kritik rölatif sıkılığına ulaşmak mümkündür.

$$D_{R,CS} = \frac{1}{Q \cdot \ln \frac{100 \cdot p'}{P_a}}$$

Maksimum içsel sürtünme açısı ile kritik içsel sürtünme açısı arasındaki farkın belirlenmesinde I_{RD} kullanılmaktadır. Farklı rölatif sıkılıktaki zeminler için sunulan $(\phi'_{peak} - \phi'_{cs}) - p'/P_a$ eğrileri Şekil 4.4'deki gibi önerilmiştir (Bolton, 1986).



Şekil 4.4. $\phi'_{peak} - \phi'_{cs}$ tahmininde rölatif sıkılığa bağlı olarak I_{RD} 'nin kullanılması

Durum parametresi olarak tanımlanan ξ , anlık ortalama efektif gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranı (e) ile kritik durumdaki boşluk oranı (e_{cr}) arasındaki fark olarak ifade edilir. Kritik rölatif sıklık değeri kullanılarak ξ için bir sayısal değere ulaşmak mümkündür (Been ve Jefferies,1985);

$$\xi = (e_{maks} - e_{min})(D_{R,CS} - D_R)$$

Bu bağıntının ($e_{maks} - e_{min}$) ile normalize edilmesi ile rölatif durum parametresi olarak tanımlanan ξ_R elde edilir. Bu parametre kumlarda kayma davranışının korelasyonunda daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bağıntıdaki D_R penetrasyon testleri ile elde edilmektedir (Konrad, 1988);

$$\xi_R = D_{R,CS} - D_R = \frac{1}{Q \cdot \ln \frac{100 \cdot p'}{P_a}} - D_R$$

Sıvılaşmanın tetiklenmesini tanımlamak amacıyla geliştirilen %3 kayma gerinimi kriteri, limit kalıntı boşluk suyu basıncının gelişmesi karşılık geldiği için zemindeki yenilme kriteri olarak kullanılabilir. Çevrim sayısının artmasıyla daha büyük CSR elde edilmektedir bu nedenle de daha büyük kayma gerinimlerine ulaşmak mümkündür. Yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonrasında elde edilen K_α ile ξ_R ilişkisi aşağıda sunulmuştur;

$$K_\alpha = a + b \cdot e^{(-\xi_R/c)}$$

$$a = 1267 + 63 \cdot \alpha^2 - 634 \cdot e^\alpha - 632 \cdot e^{-\alpha}$$

$$b = \exp[-1,11 + 12,3 \cdot \alpha^2 + 1,31 \cdot \ln(\alpha + 0,00001)]$$

$$c = 0,138 + 0,126 \cdot \alpha + 2,52 \cdot \alpha^3$$

Bu bağıntıda sınır koşulları $\alpha \leq 0,35$ ve $-0,6 \leq \xi_R \leq 0,1$ olarak belirlenmiştir.

4.2.Çevre Basıncındaki Değişimin Etkisi

Çevrimsel yüklemeye maruz kalan zeminlerde oluşan kayma gerilmeleri toplamının zemin kayma dayanımından büyük olması durumunda zemin yenilir. Zeminde herhangi bir noktadaki çevre basıncı dayanımı olumlu olarak etkilemektedir. Bu

nedenle çevre basıncındaki artış zemin sıvılaşma riskini azaltmaktadır. K_σ düzeltme faktörü kullanılarak sıvılaşma potansiyelinde çevre basıncı etkisi gösterilmektedir. Bu sayede zemin için eşdeğer CRR'ye ulaşılmaktadır.

$$CRR = CRR_{\sigma=1, \alpha=0} \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha$$

Çevre basıncının sıvılaşma potansiyeli üzerinde etkilerini araştıran çalışmalar incelendiğinde bu etki için iki farklı şekilde düzeltme yapılabileceği görülmektedir;

1. Penetrasyon deneyi tabanlı sıvılaşma analizlerinde ilave bir korelasyon ile SPT için darbe sayısı $(N_{1\xi})_{60}$, CPT için ise uç direnci $q_{c1\xi}$ elde edilebilir,
2. CRR'nin K_σ çevre gerilmesi faktörü ile düzeltilmesi eşdeğer çevrimsel dayanım oranına ulaşması sağlanabilir.

K_σ için 2004'te Boulanger ve Idriss tarafından önerilen bağıntı aşağıdaki gibidir;

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{v0}'}{P_a}\right) \leq 1,0$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 17,3 \cdot D_R} \leq 0,3$$

Temiz kum için önerilen $N_{1,60}$, q_{c1n} ve D_R korelasyonu;

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{1,60}}{46}}$$

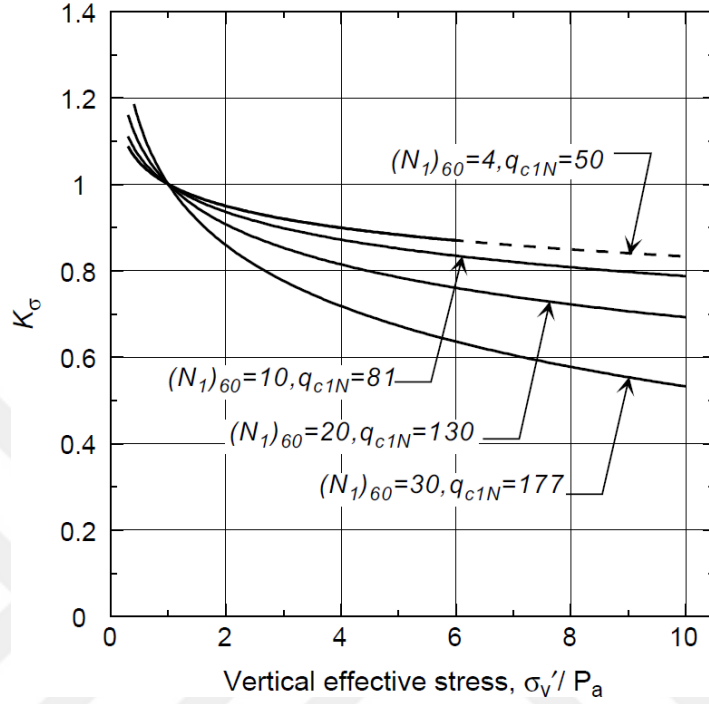
$$D_R = 0,478(q_{c1N})^{0,264} - 1,063$$

C_σ katsayısını, penetrasyon deneyleri ile elde edilen ve zeminin dayanım özellikleri hakkında bilgi veren $N_{1,60}$ ve q_{c1N} ile belirlemek mümkündür;

$$C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 2,55 \sqrt{N_{1,60}}}$$

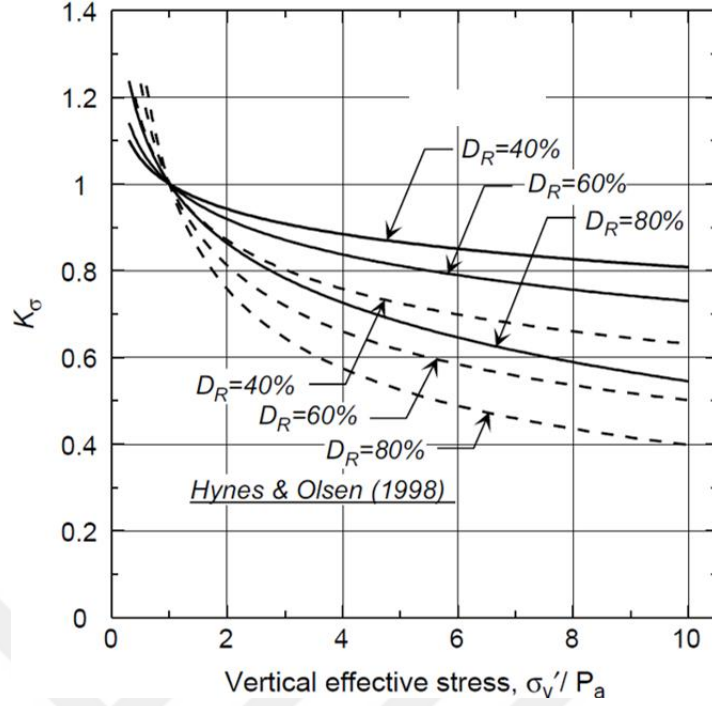
$$C_\sigma = \frac{1}{37,3 - 8,27 (q_{c1N})^{0,264}}$$

Bu bağıntılar sayesinde penetrasyon deney verilerine bağlı olarak zemin için elde edilen K_σ faktörünün düşey efektif gerilmeye göre değişimi Şekil 4.5'te sunulmuştur (Boulanger ve Idriss, 2004).



Şekil 4.5. ξ_R ile bağıntılı olarak geliştirilen $K_\sigma - (\sigma_v'/P_a)$ ilişkisi (Idriss ve Boulanger, 2006)

K_σ düzeltme faktörü için 1'den küçük olma koşulu bulunmaktadır. Şekil 4.5 incelendiğinde $(\sigma_v'/P_a) < 1$ olduğu durumlarda K_σ 'nin 1'i aşabildiği görülmektedir. Şekil 4.5'te Boulanger ve Idriss (2006) tarafından sunulan eğriler ile Heynes ve Olsen (1998) tarafından önerilen ve farklı rölatif sıklıktaki zeminler için çizilen $K_\sigma - (\sigma_v'/P_a)$ eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.6).

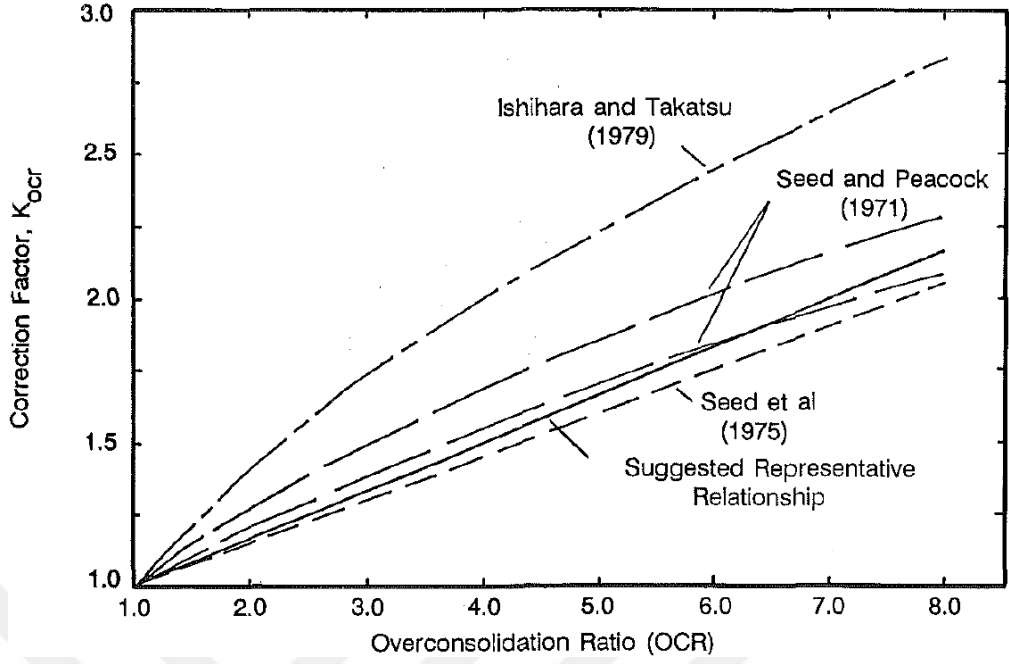


Şekil 4.6. K_{σ} - (σ_v'/P_a) ilişkisinde çalışmaların karşılaştırılması

4.3. Aşırı Konsolidasyon Oranı Etkisi

Suya doymun kumların sıvılaşma direnci üzerine yapılan birçok çalışma, aşırı konsolidasyon oranının belirleyici bir etken olduğunu göstermiştir. Çevrimsel yüklemelerle tetiklenen zemin sıvılaşması, aşırı konsolidasyon oranının (OCR) 1 olduğu durum için değerlendirilmektedir. Bu sebeple OCR'nin farklı bir değer olması durumunda, K_{OCR} düzeltme faktörü kullanılarak çevrimsel gerilme oranı normalize edilebilir.

Normal konsolide doymun kum zeminde, derin kazıların yapılmadığı yüzeysel temellere sahip olan yapının varlığı aşırı konsolidasyon oranını değiştirmeyecektir. Bu koşullardaki sıvılaşma analizlerinde K_{OCR} faktörünün kullanılması gerekmemektedir. Bodrum kata sahip yapılar için yapılan temel kazısı ile azaltılan jeolojik yük, yapı kaynaklı oluşan yük ile eşdeğer ise temel altındaki zeminde OCR artacaktır. Çoğu çalışmada bu artış ile beraber sıvılaşmaya sebep olan çevrimsel gerilme oranının da %20'ye kadar arttığı görülmüştür. K_{OCR} katsayısının tahmini için yapılan çalışmalardan üçü Şekil 4.7'de sunulmuştur (K.M.Rollins ve H.B.Seed, 1990).



Şekil 4.7. Aşırı konsolidasyon oranı ile K_{OCR} arasındaki ilişki

4.4. Bina Tepkisinin Etkisi

Arazide yapı olması durumunda zeminde oluşacak olan düşey gerilme artışları incelenirken yapının rijit olduğu kabul edilmiştir. Ancak gerçek yapılar için böyle bir durum mümkün değildir. Her yapının bir miktar esnekliği ve titreşim periyodu bulunmaktadır.

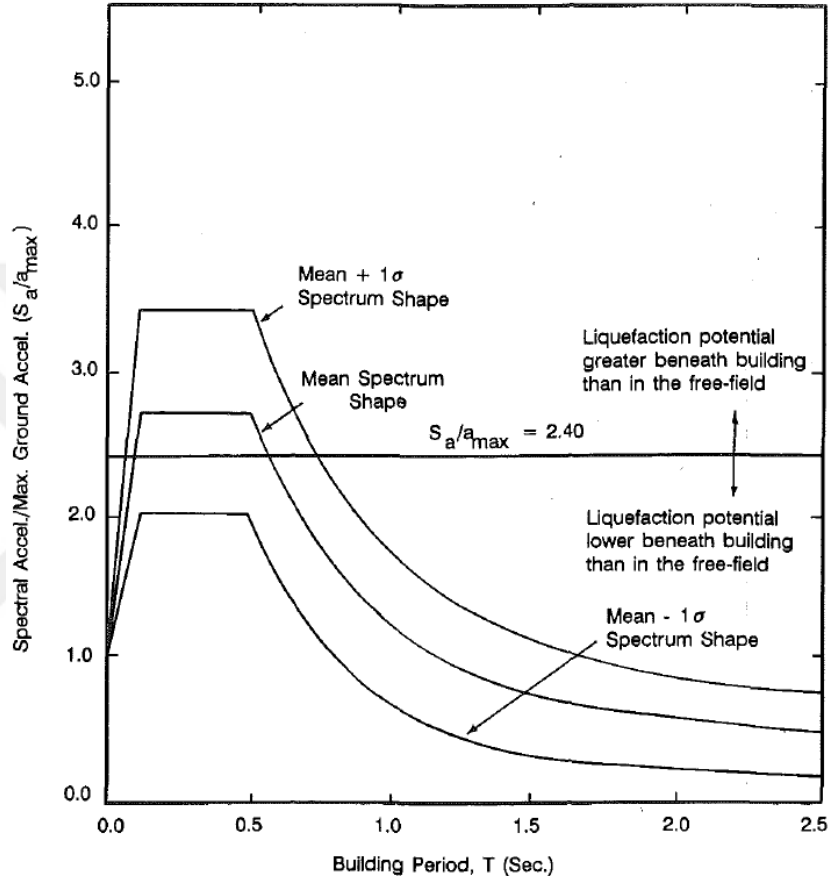
Yapı temelinde oluşan kayma gerilmesi, deprem hareketleri ve yapının doğal periyodu için yapılan tepki spektrumunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bu kayma gerilmeleri, deprem ile oluşan tekrarlı yükleme durumunda yapının davranışından etkilenmektedir. Yapının sebep olacağı kayma gerilmelerinin tarif edilmesinde basitleştirilmiş bir yaklaşım kullanılırsa temel altındaki kesme kuvveti, yapının ağırlığı (W) ve binanın doğal periyoduna karşılık gelen spektral ivme (S_a) ile ilişkilendirilebilir,

$$V_{maks} \approx 0,8 \frac{S_a}{g} W$$

Kesme kuvvetinin temel taban alanına oranlanması ile elde edilecek olan maksimum kayma gerilmesinin 0,65 katı ortalama kayma gerilmesini vermektedir,

$$\tau_{ort} \approx 0,65 \cdot 0,8 \cdot \frac{S_a}{g} \cdot \frac{W}{B}$$

Yapılan çalışmalar sonucunda S_a/a_{maks} oranının 2,4'ten büyük olduğu durumlarda, yapı yükü altındaki zeminin sıvılaşma riskinin serbest arazi koşullarındakinden daha fazla olduğu görülmüştür. Seed vd.(1975) yapı etkisini göstermek amacıyla 100'den fazla yatay yer hareketi kaydı kullanılarak elde edilen tepki spektrumları ile $S_a/a_{maks}=2,4$ sıvılaşma sınırını göstermiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Tipik deprem spektrumları ile $S_a/a_{maks}=2,4$ sıvılaşma sınır hattının gösterimi

4.5.Düşey Efektif Gerilme Artışı

Yapı kaynaklı gerilme artışları temel boyutları ve taban gerilmesinin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Düşey efektif gerilmeler üzerindeki yapı etkisi derinlikle beraber azalmakta ve belirli bir derinlikten sonra sönümlenerek sıvılaşma potansiyelini etkilememektedir. Temel boyutları arttıkça yapı kaynaklı gerilme artışları daha büyük derinliklere kadar ulaşmaktadır (Coduto vd, 2011). İlave gerilmelerin derinlik boyunca olan değişimi birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Tez kapsamında yapı kaynaklı gerilme artışları Newmark (1935) analitik çözüm eşitlikleri kullanılarak tanımlanmıştır. Eşitliklerde; B temelin kısa kenar uzunluğunu, L temelin

uzun kenar uzunluğunu ve z_f ise zeminde ilave gerilmenin elde edilmek istendiği derinliktir. Yapı nedeniyle temelde oluşacak olan temel taban gerilmesi q_{taban} ile gösterilmiştir,

$$B^2+L^2+z_f^2 \leq B^2L^2/z_f^2 \text{ ise,}$$

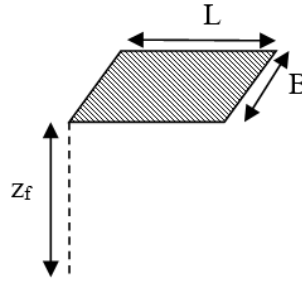
$$I_q = \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{2BLz_f \sqrt{B^2+L^2+z_f^2}}{z_f^2(B^2+L^2+z_f^2)+B^2L^2} \right) \left(\frac{B^2+L^2+2z_f^2}{B^2+L^2+z_f^2} \right) + \pi \sin^{-1} \left(\frac{2BLz_f \sqrt{B^2+L^2+z_f^2}}{z_f^2(B^2+L^2+z_f^2)+B^2L^2} \right) \right]$$

$$B^2+L^2+z_f^2 > B^2L^2/z_f^2 \text{ ise,}$$

$$I_q = \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{2BLz_f \sqrt{B^2+L^2+z_f^2}}{z_f^2(B^2+L^2+z_f^2)+B^2L^2} \right) \left(\frac{B^2+L^2+2z_f^2}{B^2+L^2+z_f^2} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{2BLz_f \sqrt{B^2+L^2+z_f^2}}{z_f^2(B^2+L^2+z_f^2)+B^2L^2} \right) \right]$$

$$\Delta\sigma = q_{\text{taban}} \cdot I_q$$

Bu eşitliklerde açı birimi olarak radyan kullanılmalıdır. Newmark analitik çözümü dikdörtgen şeklinde üniform şekilde yüklenmiş alanın köşe noktası altındaki zeminde gerilme dağılımını modellemek için kullanılır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Yüklenmiş olan dikdörtgen alan için Newmark çözümü

Serbest arazi koşullarında zemin boyunca hesaplanan düşey efektif gerilme değerleri yapı ile beraber değişmektedir. Rölatif sıkılığın %65'ten büyük olduğu durumlarda zemin sıvılaşması beklenmemektedir (Seed ve Idriss, 1971). Efektif gerilmelerdeki artış zeminin boşluk oranını azaltarak rölatif sıkılığın artırır ve sıvılaşma potansiyelini olumlu etkiler. Yapı kaynaklı düşey gerilme artışları dikkate alınarak yapılan sıvılaşma analizlerinde çevrimsel gerilme oranı,

$$CSR_{yapı} = 0,65 r_d \frac{(\sigma_{v0} + \Delta\sigma) a_{max}}{(\sigma_{v0}' + \Delta\sigma) g}$$

Sıvılaşma potansiyeli, çevrimsel dayanım oranı (CRR) ve çevrimsel gerilme oranı arasındaki ilişki ile belirlenir. Çalışma kapsamında CRR'nin yapı varlığından etkilenmediği kabul edilerek, gerilme artışının CSR'de sebep olacağı azalım aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

$$FS_{yapı/arazi} = \frac{CSR_{arazi}}{CSR_{yapı}} = \frac{\sigma_{v0}(\sigma_{v0}' + \Delta\sigma)}{\sigma_{v0}'(\sigma_{v0} + \Delta\sigma)}$$

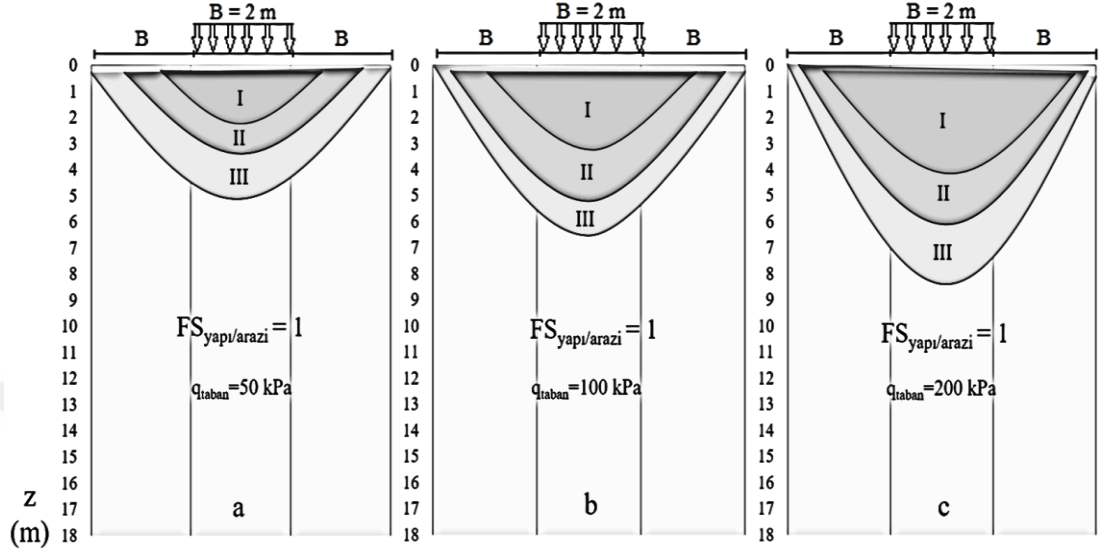
4.5.1. Düşey efektif gerilme artışının CSR üzerindeki etkisinin basitleştirilmiş yaklaşımla incelenmesi

Sıvılaşma potansiyelinde yapı varlığının etkisini incelemek için yapılan bu çalışmada, zeminin temiz kum olduğu ve yer altı su seviyesinin yüzeyde olduğu kabul edilmiştir. Arazideki gerilme artışları projelendirilen yapının özelliklerine göre değişim göstermektedir. Temel geometrisinin sıvılaşma potansiyeline etkisinin incelenmesi amacıyla 2x2, 10x10 ve 25x25 m² olan temeller dikkate alınmıştır. Yapı etkisiyle zeminin sıvılaşma potansiyelinde oluşacak olan değişimlerin en fazla olduğu noktaları belirlemek amacıyla temel kenarı boyunca, temel köşe noktasında ve temel boyutları dışında gerilme artışları modellenmiştir.

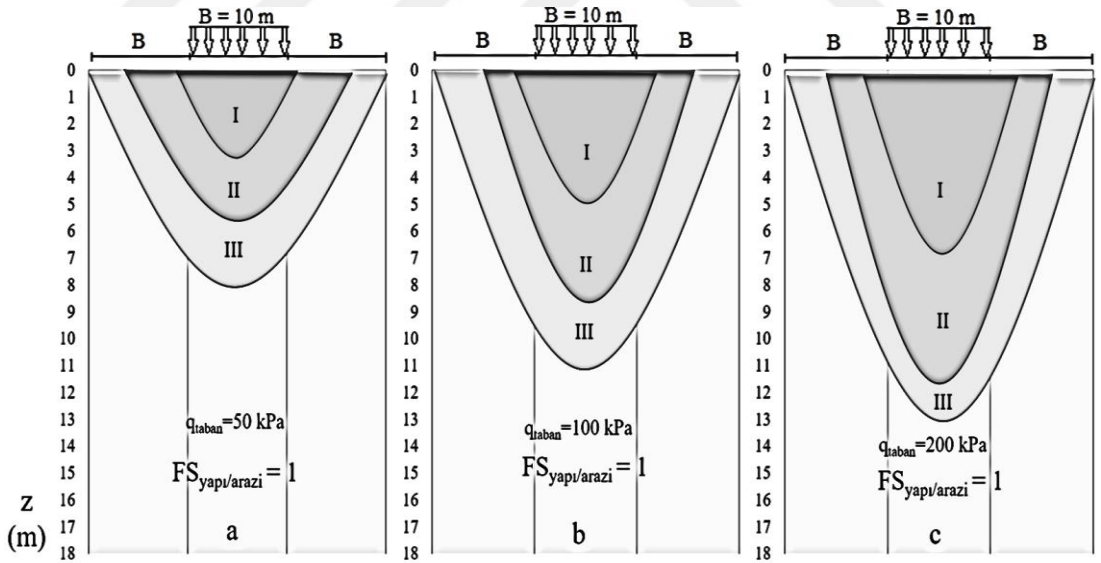
Yapı boyutları büyüdükçe temel tabanında oluşacak olan gerilmeler artacaktır. Farklı temel taban gerilmelerine sahip yapıların zeminde sebep olacağı ilave düşey efektif gerilmeler farklı olmaktadır. Bu durumu göz önünde bulundurmak için farklı yüksekliklerdeki yapıları temsil etmek amacıyla temel taban gerilmesi 50, 100 ve 200 kPa alınarak analizler tekrar edilmiştir.

Analizlerde serbest arazi koşullarında ve zeminde yapı olması durumunda elde edilen sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları oranlanarak, yapı varlığının sıvılaşma potansiyeli üzerine etkilerinin derinlikle beraber değişimi incelenmiştir. Şekil 4.10-12'de zeminde yapı olması durumunda ve serbest arazi koşullarındaki güvenlik sayıları oranının derinlikle değişimi, 3 bölgeye ayrılarak gösterilmiştir,

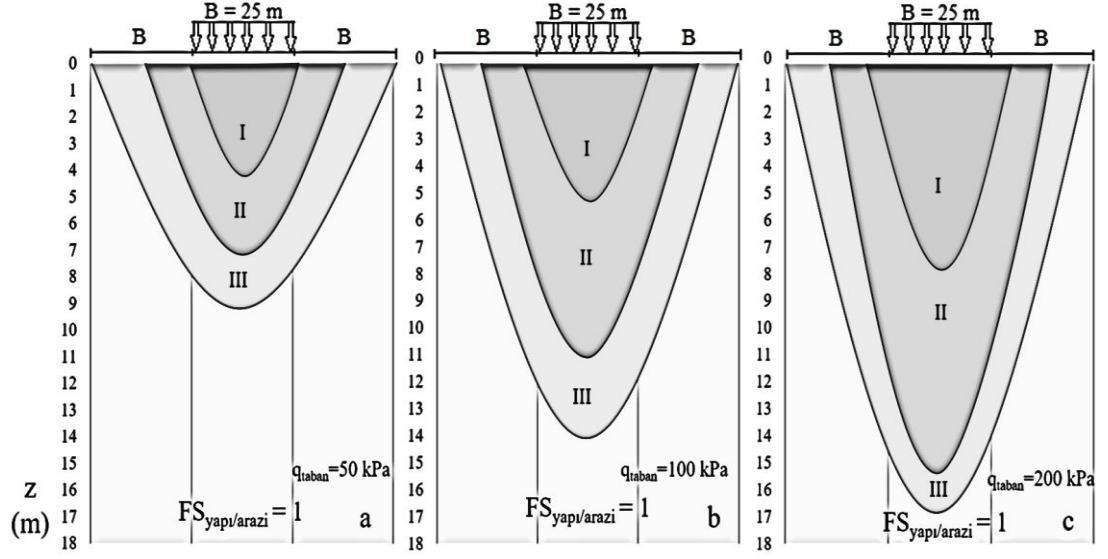
- I numaralı bölgede, $FS_{yapı/arazi} \geq 1,3$
- II numaralı bölgede, $1,1 < FS_{yapı/arazi} < 1,3$
- III numaralı bölgede, $1 < FS_{yapı/arazi} \leq 1,1$ olarak gözlenmiştir.



Şekil 4.10. $2 \times 2 \text{ m}^2$ boyutundaki temelde taban gerilmesinin 50 kPa (a), 100 kPa (b) ve 200 kPa (c) olduğu durumda $FS_{yapı/arazi}$ 'nin derinlikle değişimi



Şekil 4.11. $10 \times 10 \text{ m}^2$ boyutundaki temelde taban gerilmesinin 50 kPa (a), 100 kPa (b) ve 200 kPa (c) olduğu durumda $FS_{yapı/arazi}$ 'nin derinlikle değişimi



Şekil 4.12. 25x25 m² boyutundaki temelde taban gerilmesinin 50 kPa (a), 100 kPa (b) ve 200 kPa (c) olduğu durumda $FS_{yapı/arazi}$ 'nin derinlikle değişimi

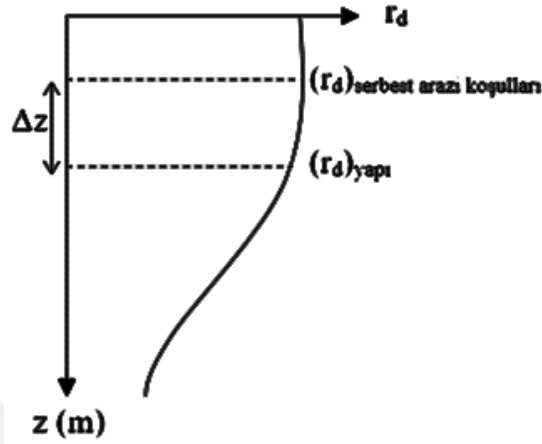
Yapılan analizler sonucunda yapı varlığının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısında sebep olduğu en büyük artış temel orta noktasının altında kalan zeminin temel tabanına yakın olan derinliklerde görülmüştür. 25x25 m² boyutundaki temelde taban gerilmesinin 200 kPa olduğu koşulda $FS_{yapı}/FS_{arazi}$ oranı 1,876 ile en büyük değerine ulaşmıştır. Yapı varlığının sıvılaşma potansiyeli üzerine etkisi gerilme artışlarının derinlikle sönümlenmesiyle orantılı olarak azalmıştır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının yapı etkisi ile olan değişimi temel boyutları ve temel taban gerilmesine göre farklılık göstermektedir. Temel boyutları büyüdükçe sıvılaşma potansiyelindeki yapı etkisinin etki derinliği artarken yataydaki etkin mesafenin azaldığı gözlenmiştir. Temel taban gerilmesi büyüdükçe sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının yapıdan etkilendiği mesafenin düşeyde ve yatayda arttığı görülmüştür. Yapı varlığının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısını %88'e kadar artırdığı görülmüştür.

4.5.2. Düşey efektif gerilme artışının gerilme azalım faktörü (r_d) üzerindeki etkisinin basitleştirilmiş yaklaşımla incelenmesi

Gerilme azalım faktörünün hesaplandığı derinlikte, serbest arazi koşullarındaki ve yapı yükü altındaki çevre basınçları birbirinden farklıdır. Yapı etkisiyle oluşan ilave gerilmelerin zemin yatay gerilmelerinde sebep olduğu artış, aynı derinlik için daha küçük r_d katsayısı hesaplanmasına neden olacaktır. Bu değişim derinlik farkı (Δz) ile tanımlanabilir. Hesap derinliği, serbest arazi koşullarında z iken yapı yükü altında $z + \Delta z$ kadar olacaktır. Şekil 4.13'te referans derinlik için iki farklı gerilme durumunda elde

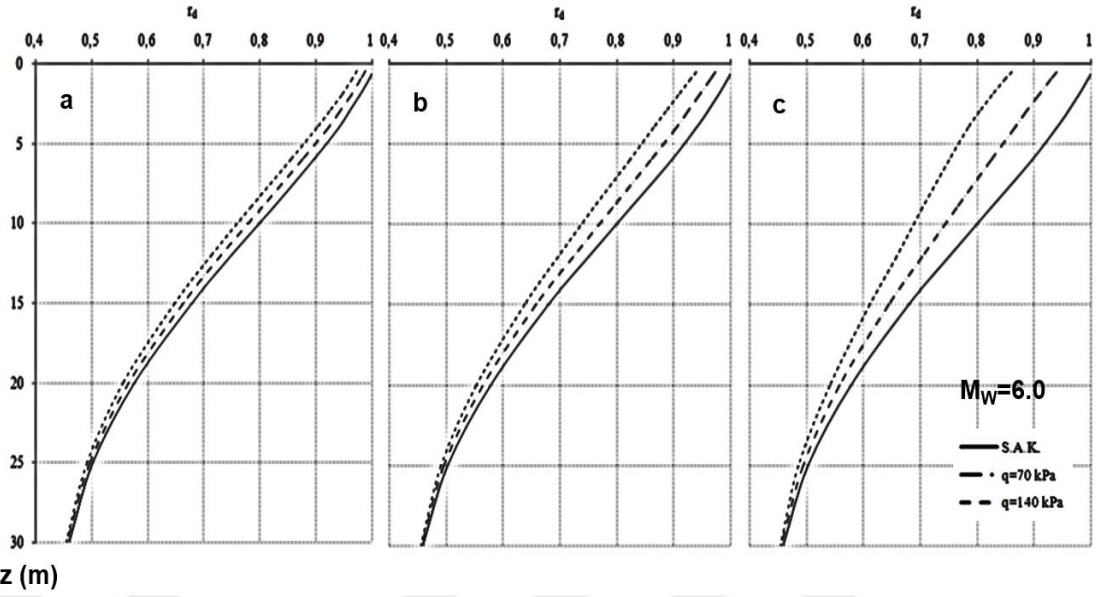
edilecek olan r_d katsayısı şematik olarak gösterilmiştir. Yapı kaynaklı gerilme artışları ile derinlik farkı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir,

$$\Delta z = \frac{\Delta \sigma}{\gamma}$$

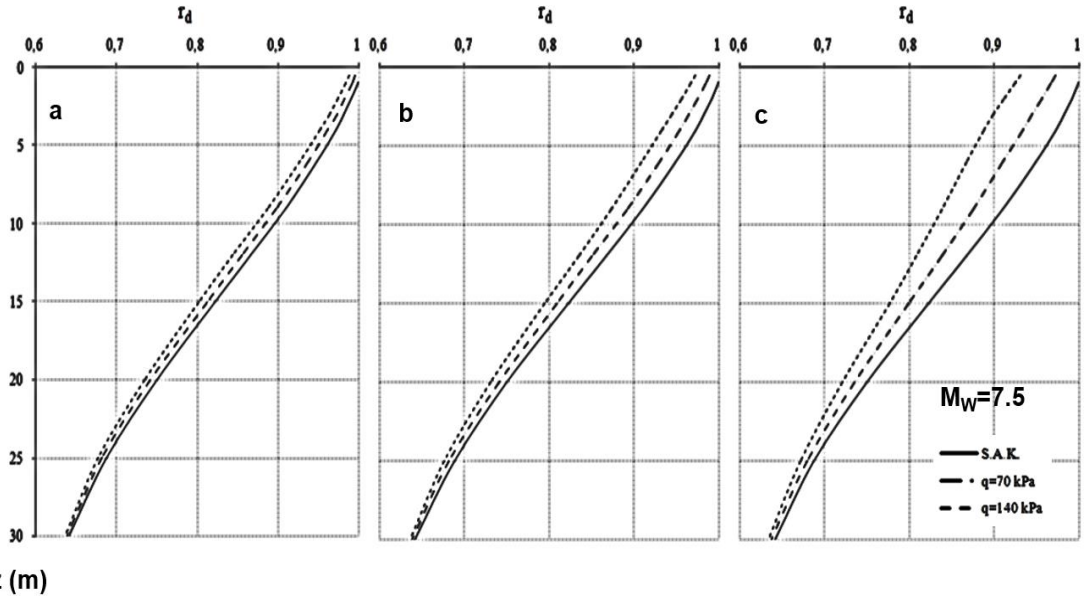


Şekil 4.13. Referans derinlik için serbest arazi koşullarında ve yapı etkisi altında r_d katsayısının şematik gösterimi

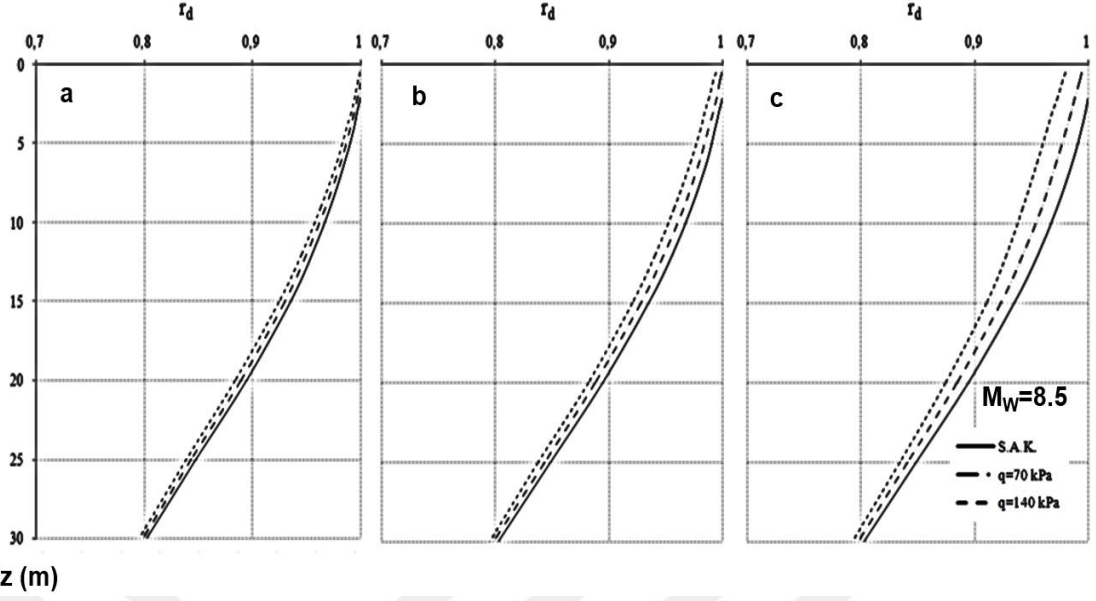
Zeminde yapı varlığının gerilme azalım faktörüne olan etkisini incelemek amacıyla, boyutları 15x25 m² olan yapıda, farklı kat sayılarını temsil etmek amacıyla taban gerilmesinin 70 ve 140 kPa olduğu iki durum göz önüne alınmıştır. Yapı kaynaklı gerilme artışının en kritik olduğu temel köşesi, kenar ortası ve temel ortası altında kalan zemin için derinlik boyunca gerilme artışları modellenmiştir. Beklenen depremin büyüklüğünün r_d faktörü üzerine etkisini incelemek için büyüklükleri 6, 7.5 ve 8.5 olan 3 farklı deprem senaryosunda analizler tekrarlanmıştır. Çalışmada zeminin temiz kum olduğu ve yer altı su seviyesinin yüzeyde olduğu kabulü yapılmıştır. Analizler sonucunda farklı deprem senaryoları için elde edilen r_d -derinlik ilişkisi Şekil 4.14-16'da sunulmuştur.



Şekil 4.14. $M_w = 6.0$ için temel köşesi (a), kenar orta noktası (b) ve temel orta noktası (c) altındaki zeminde $q = 70$ kPa ve $q = 140$ kPa olması durumunda derinlik- r_d ilişkisi



Şekil 4.15. $M_w = 7.5$ için temel köşesi (a), kenar orta noktası (b) ve temel orta noktası (c) altındaki zeminde $q = 70$ kPa ve $q = 140$ kPa olması durumunda derinlik- r_d ilişkisi



Şekil 4.16. $M_w= 8.5$ için temel köşesi (a), kenar orta noktası (b) ve temel orta noktası (c) altındaki zeminde $q=70$ kPa ve $q=140$ kPa olması durumunda derinlik- r_d ilişkisi

Yapılan analizler sonucunda yapı kaynaklı düşey gerilme artışlarının gerilme azalım faktörünü küçülterek, deprem anında zeminde oluşacak olan maksimum kayma gerilmesi oranını azalttığı ve zemin için olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir.

Depremin moment büyüklüğü arttıkça r_d faktöründeki değişim oranının azaldığı sonucuna varılmıştır. Referans derinlik için serbest arazi koşullarında elde edilen gerilme azalım faktörünün, yapı olması durumunda elde edilenden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Yapıda kat sayısının artması ile daha büyük temel taban gerilmesine ulaşılmaktadır. Bu koşullarda gerilme azalım faktörü küçülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda r_d faktöründeki en belirgin değişimin, yapı kaynaklı gerilme artışları için kritik bölge olan temel orta noktası altındaki zeminde olduğu gözlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında birçok araştırmacı tarafından önerilen $CSR-N_{1,60}$ eğrilerinin kıyaslanması için 1999 Kocaeli depremi sonrasında zemin yenilmesi gözlenen 4 sahanın arazi deney sonuçları kullanılmıştır. Analizler sonrasında en küçük CRR değerlerine Toprak vd. tarafından 1999'da sunulan eğri ile ulaşılırken, en büyük çevrimsel kayma dayanımı Seed ve diğerleri (1984) tarafından hazırlanan çalışmada önerilen eğri ile elde edilmiştir.

SPT tabanlı analizler incelendiğinde, farklı araştırmacılar tarafından önerilen eğrilerin birbirinden farklı çevrimsel dayanım oranı elde edilebileceği görülmüştür. CPT sonuçlarında kullanılan eğriler ile elde edilen CRR değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle CPT deney verilerinin sıvılaşma analizinde daha tutarlı sonuçlara ulaşılmasını sağladığı gözlenmiştir.

Serbest arazi koşullarında ve yapı yükü etkisi altındaki zeminde, sıvılaşma potansiyeli farklılık gösterir. Temel altında kalan zeminde, düşey ve yatay efektif gerilmeler ile beraber kayma gerilmesi düzeyi değişmektedir. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde zemin-yapı etkileşimi incelenirken 5 temel etki mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bunlar; başlangıç statik kayma gerilmesi, çevre basıncındaki değişim, aşırı konsolidasyon oranı, zeminde düşey efektif gerilme artışı ve sismik yükleme durumunda yapı tepkisidir. Tez kapsamında düşey efektif gerilme artışının CSR ve r_d üzerine etkileri incelenmiştir. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının yapı etkisi ile olan değişimi temel boyutları ve temel taban gerilmesine göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

Yapı kaynaklı düşey gerilme artışları gerilme azalım faktörünü küçülterek, maksimum kayma gerilmesi oranını azaltmakta ve zemin için olumlu bir etki oluşturmaktadır. Aynı zemin koşulları için serbest arazi koşullarında elde edilen gerilme azalım faktörünün, yapı olması durumunda elde edilenden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Yapı yüksekliği ile birlikte daha büyük temel taban gerilmesine ulaşılmaktadır. Bu koşullarda gerilme azalım faktörü küçülmektedir.

Sıvılaşma analizlerinde yapı varlığı ile zeminde değişen gerilme durumlarının hepsinin birlikte dikkate alınması, sıvılaşma potansiyelinin gerçeğe daha yakın olacak şekilde belirlenmesini sağlayacaktır. Bu etkilerin tamamını göz önüne alarak sıvılaşma analizi yapan bilgisayar programları hali hazırda kullanılmaktadır. Ancak küçük bütçeli işlerde kullanılmaları maliyet açısından projeyi olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Bu nedenle sonraki çalışmalarda, yapı-zemin etkileşimi ile meydana gelen tüm gerilme koşulları dikkate alınarak sıvılaşma analizlerinin geleneksel yöntemle gerçekleştirilebilmesi üzerine çalışılması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

Andrews D.C.A., Martin G.R., Criteria For Liquefaction Of Silty Soils, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, Yeni Zelanda, 30 Ocak-4 Şubat 2000.

Andrus R.D., Stokoe K.H., Liquefaction Resistance Based On Shear Wave Velocity, *National Center for Earthquake Engineering Research*, 89-128, 1997.

Arango I., Magnitude Scaling Factors for Soil Liquefaction Evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **122**(11), 929-936.

Bol E., Önalp A., Arel E., Sert S., Özocak A., Liquefaction Of Silts: The Adapazari Criteria, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, **8**(4), 859-873.

Bolton M.D., The Strength and Dilatancy of Sands, *Geotechnique*, 1986, **36**(1), 65-78

Boulanger R.W., High Overburden Stress Effects in Liquefaction Analyses, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(12), 1071-1082.

Boulanger R.W., Relating K_a to Relative State Parameter Index, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(8), 770-773.

Bray J.D., Sancio R.B., Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(9), 1165-1177.

Coduto D.P., Yeung M.R. Kitch W.A., Stress, Editors: Horton M., Stark H., Disanno S., *Geotechnical Engineering Principles and Practices*, 2nd ed., Pearson Education, New Jersey, 404-405, 2011.

Çetin K.Ö., Unutmaz B., Zemin Sıvılaşması Ve Sismik Zemin Davranışı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2004, 430, 32-37.

Davis R. O., Berrill J.B., Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1982, **10**, 59-68.

Green R.A., Ziotopoulou K., Overview Of Screening Criteria For Liquefaction Triggering Susceptibility, *10th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Sidney, Avustralya, 6-8 Kasım 2015.

Idriss I.M., Boulanger R.W., Semi-Empirical Procedures For Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, **26**, 115-130.

Juang C.H., Yuan H., Lee D.H., Lin P.S., Simplified Cone Penetration Test-Based Method for Evaluating Liquefaction Resistance of Soils, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(1), 66-80.

Kramer S.L., Sıvılaşma, Editörler: Stenquist B., Zucker I., Conte J., Meehan J., Weist M., Geoteknik Deprem Mühendisliği, 1. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 401-431, 2003.

Law K.T., Cao Y.L., He G.N., An Energy Approach for Assessing Seismic Liquefaction Potential, *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, **27**, 320-329.

Li D.K., Juang C.H., Andrus R.D., Liquefaction Potential Index: A Critical Assessment Using Probability Concept, *Journal of GeoEngineering*, 2006, **1**(1), 11-24.

Liao S.S.C., Veneziano D., Whitman R.V., Regression Models For Evaluating Liquefaction Probability, *Journal Of Geotechnical Engineering*, 1988, **114**(4), 389-411.

Mollamahmutoğlu M., Babuğu F., Sıvılaşma Kökenli Hasar Tipleri, Zeminlerde Sıvılaşma: Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, 1. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 13-26, 2006.

Mollamahmutoğlu M., Babuğu F., Sıvılaşma Türleri, Zeminlerde Sıvılaşma: Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, 1. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 7-11, 2006.

Nemat-Nasser S., Shokooh A., A Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, **16**(4), 659-678.

Newmark N.M., Simplified Computation of Vertical Pressures in Elastic Foundations, Engineering Experiment Station, 24, Illinois Üniversitesi, Urbana, A.B.D.

Orhan M., Ateş A., Standard Penetrasyon Testi (SPT) ile Saruhanlı (Manisa) İlçesi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2011, **10**(2), 37-49.

Polito C., Plasticity Based Liquefaction Criteria, *International Conferences On Recent Advances In Geotechnical Earthquake Engineering And Soil Dynamics*, San Diego, Kaliforniya, 26-31 Mart 2001.

Robertson P.K., Sasitharan S., Shear-Wave Velocity to Evaluate In-Situ State of Ottawa Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, **121**(3), 262-273.

Robertson P.K., Wride C., Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test, *Canadian Geotechnical Journal*, 1988, **35**, 442-459.

Rollins K.M., Seed H.B., Influence Of Buildings On Potential Liquefaction Damage, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, **116**(2), 165-185.

Seed H.B., Idriss I.M., Simplified Procedure For Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions*, 1971, **107**(9), 1249-1274.

Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R.M., Influence Of SPT Procedures In Soil Liquefaction Resistance Evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, **111**(12), 1425-1445.

Seed R.B., Çetin K.Ö., Moss R.E.S., Kammerer A.M., Wu J., Pestana J.M., Riemer M.F., Sancio R.B., Bray J.D., Kayen R.E., Faris A., Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering: A Unified And Consistent Framework, Earthquake Engineering Research Centercollege, EERC 2003-06, 2003.

Shibata T., Teparaska W., Evaluation of Liquefaction Potential of Soils Using Cone Penetration Testing, *Soils Found.*, 1988, **28**(2), 49–60.

Stark T.D., Olson S.M., Liquefaction Resistance Using CPT And Field Case Histories, *Journal Of Geotechnical Engineering*, 1995, **121**(12), 856-869.

Sykora D.W., Creation of A Data Base of Seismic Shear Wave Velocities for Correlation Analysis, Geotech. Lab. Misc. Paper, U.S. Army Engr. Waterways Experiment Station, GL-87-26, 1987.

Tokimatsu K., Uchida A., Correlation Between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity, *Japanese Society Of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1990, **30**(2), 33-42.

Tokimatsu K., Uchida A., Correlation Between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity, *Soils and Found.*, 1990, **30**(2), 33–42.

Toprak S., Holzer T.L., Bennett M.J., Tinsley J.C., CPT- And SPT-Based Probabilistic Assessment Of Liquefaction Potential, MCEER, 1999.

Toprak S., Holzer T.L., Liquefaction Potential Index: Field Assessment, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(4), 315-322.

Unutmaz B., Assessment Of Soil – Structure – Earthquake Interaction Induced Soil Liquefaction Triggering, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 238285.

URL-1:

<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/phase4/cark/index.html>
(Ziyaret Tarihi: 17 Temmuz 2017)

URL-2:

<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/phase4/degirmendere/index.html>
(Ziyaret Tarihi: 17 Temmuz 2017)

URL-3:

<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/phase4/sapanca/index.html>
(Ziyaret Tarihi: 17 Temmuz 2017)

URL-4:

<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/phase4/yakin/index.html>
(Ziyaret Tarihi: 17 Temmuz 2017)

Wang W.S., Some Findings In Soil Liquefaction, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific, 1979, Araştırma Enstitüsü, Pekin, Çin.

Youd T. L., Noble S.K., Magnitude Scaling Factors, Proceedings NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER, 1997, 149–165.

Youd T.L., Idriss I.M., 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*, 2001, **127**(4), 297-313.

Youd T.L., Idriss I.M., Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER, 97-0022, 3-16, 1997.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Emiroğlu T., Arsoy S., Sıvılaşma Analizinde Yapı Varlığının Gerilme Azalım Faktörüne Etkisi, *3rd International Soil-Structure Interaction Symposium*, İzmir, Türkiye, 18-20 Ekim 2017.

Emiroğlu T., Arsoy S., Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Basitleştirilmiş Yaklaşımla Yapı Etkisi Analizi, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Eskişehir, Türkiye, 11-13 Ekim 2017.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında girdiği Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2015-2018 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2016 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

