

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. SIVILAŞMA	2
2.1 Sıvılaşma Mekanizması	2
2.2 Dalga Etkisinde Sıvılaşma	4
2.2.1 Boşluk Suyu Basıncının Oluşması ile Meydana Gelen Sıvılaşma (Kalıcı Sıvılaşma)	4
2.2.2 Yukarı Doğru Yönelmiş Düşey Basıncı Gradyanı Etkisi ile Oluşan Sıvılaşma (Anlık Sıvılaşma)	5
2.2.3 Dalga Etkisi Altında Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması	6
2.2.4 Kalıcı Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması	7
2.2.4.1 Genel Yaklaşım	7
2.2.4.2 Periyot-Ortalama Boşluk Suyu Basıncı Denklemi	8
2.2.4.3 Boşluk Suyu Basıncı Denklemine Sınırsız Derinlikte Bir Zemin için Çözümü ..	10
2.2.4.4 Boşluk Suyu Basıncı Denklemine Sınırlı Derinlikte Bir Zemin için Çözümü	11
2.2.4.5 Sıvılaşma Olan ve Olmayan Rejimler	11
2.2.5 Anlık Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması	12
2.2.5.1 Genel Yaklaşım	12
2.2.5.2 Boşluk Suyu Basıncı Denklemine Tamamen Doygun Zemin Durumu için Çözümü	14
2.2.5.3 Boşluk Suyu Basıncı Denklemine Doygun Olmayan Zemin Durumu için Çözümü	14
2.3 Deprem Etkisinde Sıvılaşma	15
2.3.1 Yer Hareketleri ve Tasarım Yer Hareketinin Seçimi (W.D.L. Finn, 2000)	15
2.3.2 Sismik Faktörlerin Hesaplamalarda Ele Alınış Biçimleri	16
2.3.3 Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi (Çetin, 2003)	17
2.3.4 Sıvılaşabilir Zeminler (Çetin, 2003)	18
3. AMPİRİK YÖNTEMLERLE SIVILAŞMA ANALİZİ	20

3.1	Japon “Tane Çapı Dağılımı - Standart Penetrasyon (N) Sayısı” Yöntemi	20
3.1.1	Sıvılaşma Risk Bölgesinin Tespiti.....	20
3.1.2	Eşdeğer N Sayısının Bulunması	21
3.1.3	Maksimum Kayma Gerilmesinin (τ_{mak}) Bulunması.....	22
3.1.4	Eşdeğer Yer İvmelerinin Bulunması	22
3.1.5	Sıvılaşma Riskinin Tayin Edilmesi	22
3.1.6	Sıvılaşma Olasılığı için Karar Verilmesi.....	25
3.1.7	Sıvılaşma Derecesi II ve III için Üç Eksenli Tekrarlı Gerilme Deneyi ile Sıvılaşma Olasılığının Bulunması	25
3.2	Seed vd. (1984,1985) Tarafından Geliştirilmiş Olan Yaklaşım	29
3.2.1	Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranı (CSR)’nin Bulunması.....	30
3.2.2	Sıvılaşma Dayanımı ya da Tekrarlı Kayma Gerilmesi Dayanma Oranının (CRR) Bulunması	32
3.2.3	Eşdeğer Tekrarlı Kayma Gerilmesi Dayanma Oranının (CRR _{7,5}) Bulunması	36
3.2.4	Deprem Şiddeti Düzeltme Katsayısının (MSF) Bulunması	36
3.2.5	Yüksek Efektif Basınç Değerleri için Düzeltme Faktörünün Bulunması (K σ)... 38	
3.2.6	Sonuç	40
3.3	Yeni SPT Tabanlı Sıvılaşma Bağlılıkları ve Kullanma Yöntemi (Çetin ve Seed, 2000, 2001).....	40
3.3.1	Arazi Denk Üniform Tekrarlı Gerilme Oranının (CSR _{denk}) Hesaplanması.....	41
3.3.2	Tekrarlı Kayma Gerilmesi Dayanımının Bulunması (CRR)	44
3.3.3	İnce Taneli (Siltli-Killi) Malzemeler için Düzeltmeler	47
3.3.4	Deprem Büyüklüğü Bağlılıkları Süre Düzeltmesi	48
3.3.5	Efektif Gerilme Düzeltmesi.....	49
3.3.6	Yeni Bağlılıkları Kullanarak Sıvılaşma Riskinin Olasılıksal Olarak Bulunması... 52	
3.3.7	Yeni Bağlılıkları Kullanarak Sıvılaşma Direncinin Deterministik Olarak Bulunması	53
3.3.8	Yeni Bağlılıkların Bütün Olarak Sunulduğu Denklemler Yardımı ile Sıvılaşma Riski ve Direncinin Bulunması.....	53
4.	UYGULAMA	55
4.1	Ereğli Balıkçı Limanı	55
4.2	Problemin Tanımı	57
4.3	Hasar Analizi	60
4.3.1	Kum Tabakada Meydana Gelen Anlık Oturma (Bowles, 1982)	60
4.3.2	Konsolidasyon Oturması	63
4.3.3	Sıvılaşma ve Sıvılaşma Oturması	63
4.3.3.1	Japon “Tane Çapı Dağılımı - Standart Penetrasyon (N) Sayısı” Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi.....	66
4.3.4	Seed vd. (1984-1985) Yöntemi	91
4.3.4.1	Yeni SPT Tabanlı Sıvılaşma Bağlılıkları ve Kullanma Yöntemi (Çetin ve Seed, 2000, 2001).....	110
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	132
	KAYNAKLAR.....	139
	EKLER	141
	Ek 1 Tane çapı dağılımının zemin davranışına olan etkileri (Özaydın, 1989).....	142

Ek 2 Sıvılaşma olasılığının sayısal yöntemler ile belirlenmesi	143
Ek 3 Maksimum yatay yer ivmesinin (a_{mak}) bulunması	144
ÖZGEÇMİŞ.....	145

SİMGE LİSTESİ

σ'_v	Düşey efektif basınç
σ'_o	Başlangıçtaki efektif gerilme
σ_v	Toplam düşey gerilme
τ	Kayma gerilmesi
τ_{av}	Ortalama kayma gerilmesi
τ_{mak}	Maksimum kayma gerilmesi
K'	Suyun gerçek hacimsel elastiklik modülü
γ'	Toprağın batık özgül ağırlığı
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlığı
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı
ϕ'	Kohezyon açısı
c_u	Kohezyon
ν	Young elastiklik sabiti
$(N)_{0.66}$	Japon Teknik Standartları, Eşdeğer N Sayısı
$(N)_{1-60}$	100 kPa efektif basınca göre normalize edilmiş, çekiçten numuneye aktarılan enerji oranı %60 olan düzeltilmiş eşdeğer N sayısı
a_{eq}	Eşdeğer yer ivmeleri
a_{mak}	Maksimum yatay yer ivmesi
A	Çok kolay sıvılaşabilir zemin sınıfı
B_c	Kolayca sıvılaşabilir kaba zemin sınıfı
B_f	Kolayca sıvılaşabilir ince zemin sınıfı
a	Dalgakıran merkezi
b_1	Dalgakıran şev altı, topuktan 10 metre içerisi
b_2	Dalgakıran şev altı, topuktan 5 metre içerisi
c	Dalgakıran şevi-rihtım duvarı altı ve topuktan 5 metre içerisi
d	Dalgakıran kesiti dışında kalan bölge
C_B	Sondaj çapı düzeltmesi
C_E	Çekiç enerji verimi düzeltmesi
E_R	Enerji oranı
$C_{ince-tane}$	İnce malzeme oranı düzeltmesi
C_k	Şok tipi deprem dalgası için düzeltme katsayısı
C_N	Efektif basınç düzeltmesi
C_R	Kısa tij düzeltmesi
α	İnce malzeme oranı düzeltme katsayısı
β	İnce malzeme oranı düzeltme katsayısı
$CRR_{7.5}$	7.5 şiddetindeki depreme eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranı
C_S	Standart olmayan numune alıcısı düzeltmesi
CSR	Tekrarlı kayma gerilmesi oranı
CSR_{denk}	Üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranı
C_v	Konsolidasyon katsayısı
D_r	Rölatif yoğunluk
DWF_M	Deprem şiddeti ile bağıntılı süre düzeltme katsayısı
M_w	Deprem büyüklüğü
E	Elastiklik modülü
E_s	Young elastik sabitlerinden biri
f	Arazi şartlarını temsil eden üstel sayı
FC	İnce malzeme oranı
F_L	Sıvılaşma direnç faktörü

G	Kayma modülü
g	Yerçekimi ivmesi
H	Dalga yüksekliği
H_1, H_2	Zemin tabaka kalınlığı
H_w	Su tabakası kalınlığı
h	Su derinliği
z	Zemin derinliği
$K\sigma$	Yüksek efektif basınç değerleri için düzeltme faktörü
K_0	Yatay gerilme ve düşey gerilme oranı
L_{mak}	Maksimum kayma gerilmesi oranı
MSF	Deprem şiddetini düzeltme faktörü
m_v	Hacim değişikliği katsayısı
n	(bölüm 3.3.5)
N	Tekrar sayısı
N_{avg}	Ortalama N sayısı
$N_{1,60,CS}$	İnce malzeme oranı düzeltmesi yapılmış eşdeğer N sayısı
N_1	Salınım (dalga) sayısı
N_m	Yerinde arazi deneyi sırasında ölçülen SPT N sayısı
p	Boşluk suyu basıncı
P	İskele duvar ağırlığı
p_l	Deniz tabanında dalgadan dolayı oluşan basınç
p_b	Taban basıncının maksimum değeri
P_L	Sıvılaşma olma olasılığı
r_d	Gerilme düzeltme katsayısı
R_{mak}	Sıvılaşma dayanıma oranı
r_u	Sıkışmaya yol açan tekrar sayısı
S_1	Gevşek kum tabakadaki ani oturma miktarı
S_2	Orta sıkılıktaki kum tabakası için ani oturma miktarı
S_c	Kil tabakadaki oturma miktarı
S_i	Kum tabakalarda oluşan toplam ani oturma miktarı
T	Dalga periyodu
$V_{s, 40'}$	40 feet'deki zemin ortalama kayma dalga hızının feet/saniye biriminden ifadesi
Φ	Standart kümülatif normal dağılımı

KISALTMA LİSTESİ

CRR	Cyclic Resistance Ratio
CSR	Cyclic Stress Ratio
EERA	Equivalent linear Earthquake Response Analysis
FC	Finest Content
FS	Factor of Safety
MSF	Magnitude Scaling Factor
NCEER	National Center for Earthquake Engineering Research
NSF	National Science Foundation
SPT	Standart Penetrasyon Testi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.3 Boşluk suyu basıncı, kayma birim uzaması ve kayma gerilmelerinin zamana bağlı değişimleri (Peacock ve Seed, 1968)	3
Şekil 2.4 Dalga etkisi altındaki zeminde oluşan elastik deformasyonlar	5
Şekil 2.5 Dalganın geçişi sırasında boşluk suyu basıncının tipik dağılımı (Hidrostatik basıncın aşılması durumu), (a) Doygun zemin, (b) Doygun olmayan zemin	6
Şekil 2.6 Dalga etkisi altında deniz tabanında oluşan akıntı	6
Şekil 2.7 Boşluk suyu basıncı ve dalga hareketinin zamana göre değişimi; $h=42$ cm, $H=10$ cm, $z=16.5$ cm, $d=17$ cm, $T=1.6$ cm (Sümer vd., 2002)	8
Şekil 2.8 Boşluk suyu basıncının iki bileşeni olan kalıcı bileşen $\bar{p}$ ve salınım yapan bileşen, $p - \bar{p}$ 'i gösteren karakterize edilmiş çizim	8
Şekil 2.9 Tekrar sayısına göre boşluk suyu basıncındaki artışı gösteren basit lineer model.....	9
Şekil 2.10 Sıvılaşmanın olduğu ve olmadığı rejimler	12
Şekil 2.11 Tanımlayıcı çizim.....	13
Şekil 2.12 (1x1xz) boyutlarındaki zemin elemanı üzerindeki kuvvetler.....	13
Şekil 2.13 Anlık sıvılaşma derinliği (Sakai vd., 1992).....	14
Şekil 2.14 Sıvılaşma değerlendirme aşamaları (Çetin, 2002)	17
Şekil 3.1 Tane boyutu dağılımı – Sıvılaşma Potansiyeli	21
Şekil 3.2 A Tipi zeminler için sıvılaşma grafiği (1GAL=981g)	23
Şekil 3.3 Kritik N değerini azaltma faktörü	24
Şekil 3.4 B_f ve B_c Tipi zeminler için sıvılaşma grafiği (1GAL=981g).....	24
Şekil 3.5 Sıvılaşma tahmininin yapılabilmesi için izlenmesi gereken işlem sırası (Japan International Cooperation Agency, 1994).....	26
Şekil 3.6 Eşdeğer üniform tekrarlı gerilme oranı (CSR) ile SPT $N_{1,60}$ vuruş sayısı arasındaki bağıntı (1996 NCEER ve 1998 NCEER/NSF Özet Raporu)	29
Şekil 3.7 Düzeltme katsayısı (Youd ve Idriss, 2000)	31
Şekil 3.8 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR) ile sıvılaşma yol açan tekrar sayısı arasındaki ilişki.....	37
Şekil 3.9 MSF grafiği (Youd ve Noble, 1997)	37
Şekil 3.10 Derlenmiş K_σ eğrileri (Youd ve Idriss, 2001)	39
Şekil 3.11 $K_\sigma - \sigma_v'$ değişimi	40
Şekil 3.12 r_d gerilme dağılımı düzeltme katsayısı (Çetin ve Seed, 2004)	43
Şekil 3.13 $M_w=7.5$ ve $\sigma_v'=1.0$ atm için deterministik SPT tabanlı sıvılaşma sınır eğrileri ve ince dane düzeltmesi	47
Şekil 3.14 Deprem büyüklüğüyle orantılı süre düzeltme katsayısı	48
Şekil 3.15 DWF_M ve yoğunluk ($N_{1,60}$ değeri) ilişkisi	49
Şekil 3.16 K_σ önerisi (NCEER, 1997)	50
Şekil 3.17-a Çetin vd.ve NCEER çalışma grubu tarafından önerilen K_σ değerlerinin karşılaştırması	51
Şekil 3.17-b: Çetin vd., (2000) tarafından önerilen NCEER çalışma grubunca verilmiş K_σ değerleri	51
Şekil 3.18 $M_w=7.5$ ve $\sigma_v'=1.0$ atm. için olasılıksal SPT tabanlı sıvılaşma sınır eğrileri, ve temiz kumlar önerilen ilişki (Seed vd., 1984).....	52
Şekil 3.19 $M_w=7.5$ ve $\sigma_v'=1.0$ atm için deterministik SPT tabanlı sıvılaşma sınır eğrileri, ince dane düzeltmesi.....	53
Şekil 4.1 Ereğli balıkçı limanı ve Doğu Marmara depremi etki bölgesi (Yüksel vd.,2002)	55
Şekil 4.2 Ereğli balıkçı limanı planı	56
Şekil 4.3 Ereğli balıkçı limanı 1-1 en kesiti	57

Şekil 4.4 Farklı kesitlerdeki oturmalar ^(*) (Yüksel vd., 2001 b)	58
Şekil 4.5 Karamürsel-Ereğli balıkçı limanı deniz tarafı zemin profili (Dadaşbilge ve Mut, 1974)	59
Şekil 4.6 Dalgakıran yükü altında zeminde oluşan düşey gerilme dağılımı	62
Şekil 4.7 Ereğli Balıkçı Barınağı 1-1 en kesiti	64
Şekil 4.8 Basitleştirilmiş ölçeksiz en kesit	65
Şekil 4.9 Basitleştirilmiş ölçekli en kesit	65
Şekil 4.10 Dalgakıran sevi altında kalan bölgelerde dalgakıran yükü nedeni ile oluşan gerilmelerin hesabı	66
Şekil 4.11 Tane boyutu dağılımı (Sıvılaşma potansiyeli)	66
Şekil 4.12 Kritik N değerini azaltma faktörü.	73
Şekil 4.13 A Tipi zeminler için sıvılaşma grafiği (1GAL=981g)	79
Şekil 4.14 Durum “a” için sıvılaşma bölgeleri	80
Şekil 4.15 Durum “b1” için sıvılaşma bölgeleri	82
Şekil 4.16 Durum “b2” için sıvılaşma bölgeleri	84
Şekil 4.17 Durum “c” için sıvılaşma bölgeleri	86
Şekil 4.18 Durum “d” için sıvılaşma bölgeleri	88
Şekil 4.19 Doygun kumlardaki hacimsel şekil değiştirme tahmin grafiği (Kramer,1996)	90
Şekil 4.20 Durum “a” için hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri (Kramer,1996)	91
Şekil 4.21 Durum “a” için hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri (Kramer,1996)	109
Şekil 4.22 Durum "a" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı	125
Şekil 4.23 Durum "b1" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı	126
Şekil 4.24 Durum "b2" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı	127
Şekil 4.25 Durum "c" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı	128
Şekil 4.26 Durum "d" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı	129
Şekil 4.27 Durum “a” için hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri (Kramer,1996)	131

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Sıvılaşma olasılığı değerlendirme çizelgesi	25
Çizelge 3.2 Enerji verimi düzeltmesi	34
Çizelge 3.3 Sondaj deliği çapı düzeltmesi	34
Çizelge 3.4 Sondaj tij uzunluğu düzeltmesi	34
Çizelge 3.5 Numune alıcısı membran kullanım düzeltmesi	35
Çizelge 3.6 Deprem şiddeti düzeltme katsayısı araştırma sonuçları	38
Çizelge 3.7 Sondaj tij uzunluğu düzeltmesi	45
Çizelge 3.8 Sondaj deliği çapı düzeltmesi	45
Çizelge 3.9 Enerji verimi düzeltmesi	46
Çizelge 4.1 Dalgakıran çevresindeki zemin özellikleri (Dadaşbilge ve Mut, 1974)	59
Çizelge 4.2 Dalgakıran ortasındaki efektif düşey gerilmelerin hesabı	61
Çizelge 4.3 Kil tabakalardaki oturma miktarları	63
Çizelge 4.4 Durum "a" için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı	68
Çizelge 4.5 Durum "b1 / X=10m." için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı	69
Çizelge 4.6 Durum "b2 / X=5m." için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı	70
Çizelge 4.7 Durum "c" için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı	71
Çizelge 4.8 Durum "d" için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı	72
Çizelge 4.9 Durum "a" için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması	74
Çizelge 4.10 Durum "b1 / X=10m" için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması	75
Çizelge 4.11 Durum "b2 / X=5m" için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması	76
Çizelge 4.12 Durum "c" için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması	77
Çizelge 4.13 Durum "d" için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması	78
Çizelge 4.14 Durum "a" için sıvılaşma tahmini	81
Çizelge 4.15 Durum "b1" için sıvılaşma tahmini	83
Çizelge 4.16 Durum "b2" için sıvılaşma tahmini	85
Çizelge 4.17 Durum "c" için sıvılaşma tahmini	87
Çizelge 4.18 Durum "d" için sıvılaşma tahmini	89
Çizelge 4.19 Durum "a" için sıvılaşma oturması miktarı	91
Çizelge 4.20 Durum "a" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması	93
Çizelge 4.21 Durum "b1" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması	94
Çizelge 4.22 Durum "b2" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması	95
Çizelge 4.23 Durum "c" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması	96
Çizelge 4.24 Durum "d" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması	97
Çizelge 4.25 Durum "a" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının (CRR _{7.5}) bulunması	100
Çizelge 4.26 Durum "b1" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının (CRR _{7.5}) bulunması	101
Çizelge 4.27 Durum "b2" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının (CRR _{7.5})	

bulunması.....	102
Çizelge 4.28 Durum "c" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması.....	103
Çizelge 4.29 Durum "d" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması.....	104
Çizelge 4.30 Durum "a" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması.....	106
Çizelge 4.31 Durum "b1" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması.....	106
Çizelge 4.32 Durum "b2" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması.....	107
Çizelge 4.33 Durum "c" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması.....	107
Çizelge 4.34 Durum "d" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması.....	108
Çizelge 4.35 Durum "a" için sıvılaşma oturması miktarı.....	109
Çizelge 4.36 Durum "a" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması.....	111
Çizelge 4.37 Durum "b1" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması.....	112
Çizelge 4.38 Durum "b2" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması.....	113
Çizelge 4.39 Durum "c" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması.....	114
Çizelge 4.40 Durum "d" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması.....	115
Çizelge 4.41 Durum "a" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması.....	117
Çizelge 4.42 Durum "b1" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması.....	118
Çizelge 4.43 Durum "b2" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması.....	119
Çizelge 4.44 Durum "c" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması.....	120
Çizelge 4.45 Durum "d" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması.....	121
Çizelge 4.46 Durum "a" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması.....	123
Çizelge 4.47 Durum "b1" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması.....	123
Çizelge 4.48 Durum "b2" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması.....	124
Çizelge 4.49 Durum "c" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması.....	124
Çizelge 4.50 Durum "d" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması.....	125
Çizelge 4.51 Durum "a" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı.....	126
Çizelge 4.52 Durum "b1" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı.....	127
Çizelge 4.53 Durum "b2" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı.....	128
Çizelge 4.54 Durum "c" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı.....	129
Çizelge 4.55 Durum "d" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı.....	130
Çizelge 4.56 Durum "a" için sıvılaşma oturması miktarı.....	131
Çizelge 5.1 Durum "a" için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu.....	134
Çizelge 5.2 Durum "b1" için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu.....	134
Çizelge 5.3 Durum "b2" için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu.....	135
Çizelge 5.4 Durum "c" için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu.....	135
Çizelge 5.5 Durum "d" için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu.....	136
Çizelge 5.6 SPT N değerleri kıyas çizelgesi.....	136

ÖNSÖZ

Zemin sıvılaşması ve sıvılaşma sonucu oluşan yapısal hasarlar bugün pek çok kurum ve kişi için önemli bir araştırma konusudur. Geoteknik mühendisliği kapsamı altında gelişen ancak nedenselliği ve geniş etki alanı sebebiyle çok sayıda bilim dalı ile ortaklaşa çalışma içinde olan “Sıvılaşma Mühendisliği” artık bir uzmanlık dalı olarak kıyı mühendisliği için de önemli bir kaynak oluşturmaktadır.

Deprem etkisi ile zeminde oluşan sıvılaşmasının deniz yapılarına verdiği hasarlar yaygın olarak bilinmektedir. Son olarak 1999 Kocaeli Depremi oldukça büyük bir alanda sıvılaşmaya neden olmuş ve kara yapılarında olduğu kadar deniz yapılarında da yıkımlara yol açmıştır.

Dalgakıranlar, liman ve barınaklar, koruma duvarları, boru hatları gibi deniz yapılarının boyutlandırma hesaplarında kullanılan dalga yükü, aynı zamanda bu yapıların üzerinde bulunduğu zeminin sıvılaşarak taşıma kapasitesini yitirmesine neden olan önemli bir etmendir. Dalga etkisi ile oluşan zemin sıvılaşmasının yol açtığı hasarlara ilişkin çok sayıda kayıt bulunmaktadır.

Zemin koşullarına, sismik etkilerin ve dalga kuvvetlerinin dinamik özelliklerine ve fiziksel koşullara bağlı olarak ortaya çıkan zemin sıvılaşmasının önceden tahmin edilebilirliği her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Meydana gelen her afet boyutunda yıkımdan sonra bu konunun üzerine daha fazla gidilmiş, deneysel ve gerçek verilerle desteklenen birçok bağıntı bulunmuştur. Henüz gelişme aşamasında olan bu çalışmalar NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research) gibi uluslararası çalışma ve tartışma gruplarında değerlendirilmekte, güncellemeler yapılmakta ve daha iyi sonuç veren yaklaşımların bulunarak yayınlanmasına çalışılmaktadır. Ne var ki görüş birliğine varılamayarak öneriden öteye gitmeyen sonuç bildirelerine de sıkça rastlanmaktadır.

Halen pek çok belirsizlik içeren zemin sıvılaşması konusu bu çalışmada yaygın olarak kabul görmüş yöntemler ile uygulamalı bir örnek üzerinde yeniden değerlendirilmektedir. Bu alanla ilgili uygulama boyutunda karşılaşılan kavram karışıklıklarını azaltmak, yöntemler arası kıyaslama yapmak ve son gelişmeleri yansıtmak amaçlanmıştır.

Çatısı altında öğretim almaktan mutluluk ve onur duyduğum Y.T.Ü. Kıyı ve Liman Mühendisliği A.B.D.’da bana verdikleri çok büyük destekten dolayı başta Prof. Dr. Yalçın Yüksel’e, Doç. Dr. Esin Çevik’e ve diğer öğretim ve araştırma görevlilerine, Geoteknik A.B.D.’dan Yrd.Doç. Dr. Mehmet Berilgen’e, teze verdiği katkılardan dolayı DLH Yapım Genel Müdürü Oya Özgüven’e, desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen Alsim–Alarko Yapım Müdürü Coşkun Çalışkanoğlu’na ve bana güç veren eşim Nuray Togay’a gönülden teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

ÖZET

Deprem, dalga, şok ve benzeri etkilerle oluşan tekrarlı yüklerin zemin içerisindeki boşluk suyu basıncını arttırmaya başlaması ve efektif gerilmenin zamanla azalarak sıfıra inmesi sıvılaşma mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada deprem ve dalga etkisi ile oluşan zemin sıvılaşması ve hesaplama yöntemleri incelenmektedir.

Dalga etkisinde sıvılaşma temel olarak iki farklı mekanizmadan üretilmektedir. Bunlardan ilki boşluk suyu basıncı ile meydana gelen kalıcı sıvılaşma, diğeri ise dalga geçişi sırasında yukarı doğru yönelmiş düşey basınç gradyanı etkisi ile oluşan anlık sıvılaşmadır. Sıvılaşma mekanizmasını oluşturan ana öğeler; zeminde meydana gelen kayma gerilmeleri, boşluk suyu basıncı ve yeraltı suyu akımıdır. Bu büyüklükler bulunduğunda zeminin sıvılaşma potansiyeli hakkında bir karar verilebilmektedir.

Son 15 yıl içerisinde deprem mühendisliğinde yaşanan gelişmeler sayesinde yer hareketlerinin özellikleri daha iyi belirlenebilmekte ve tasarıma yönelik olarak kullanılabilir. Özellikle dinamik analiz hesap yöntemlerinin kullanılmasında ve sıvılaşma potansiyelinin tahmin edilmesinde önemli adımlar atılmıştır. Diğer taraftan sıvılaşabilir zemin kavramı veya sıvılaşabilir zemin tabakalarının incelenen zemin profilinde bulunup bulunmadığının belirlenmesi halen bir tartışma konusudur. Buna rağmen yaygın olarak kabul görmüş yöntemler kullanılarak deprem etkisi ile sıvılaşma potansiyeli hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada deprem etkisinde zemin sıvılaşması incelenirken; Japon tane çapı dağılımı-SPT N sayısı, Seed vd. (1984–1985), Çetin ve Seed (2000, 2001) yöntemleri kullanılmıştır. Arazide yapılan standart penetrasyon test sonuçları (N sayıları) her üç yöntemde de prosedür, efektif gerilme ve ince malzeme oranları için benzer ya da farklı bağıntılar kullanılarak düzeltilmektedir. Yine bu çalışmada 17 Ağustos 1999 Doğu Marmara Deprem’inde hasar görmüş olan Ereğli Balıkçı Limanı üzerindeki sıvılaşma etkisi üç ayrı yöntemle kıyaslamalı olarak incelenmektedir.

Anahtar sözcükler: Sıvılaşma mekanizması, dalgakıranlar, deniz yapıları, denizaltı boru hatları, boşluk suyu basıncı, kayma gerilmesi, efektif gerilme, yer ivmesi, ince malzeme oranı, prosedür düzeltmesi, deprem şiddeti düzeltme faktörü, yüksek efektif gerilme düzeltmesi, tekrarlı kayma gerilmesi oranı, tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranı, sıvılaşma olasılığı, sıvılaşabilir zemin, güvenlik faktörü.

ABSTRACT

Buildup of pore pressure induced by cyclic loads because of earthquake, wave or shocks then decreasing of effective stress and become zero is defined as liquefaction mechanism. In this study liquefaction of soil induced by earthquake and wave and calculation methods are examined.

Liquefaction induced by wave is generated mainly by two different mechanism. First one is residual liquefaction by the buildup pore pressure, second one is momentary liquefaction by the upward vertical pressure gradient in the soil during the passage of a wave trough. The wave-induced shear stresses in the soil, the pore pressure and the ground-water flow are essential components of the liquefaction process. It's possible to make a decision about liquefaction potential when these components are found.

By means of developments in earthquake engineering in last 15 years, the specification of ground motions can be defined better and used for design. Great progress has been got especially in using of dynamic analysis methods and prediction of liquefaction. On the other hand the concept of liquefiable soil or existence of liquefiable layers in the soil that is examined is still a discussion subject. However liquefaction potential induced by earthquake can be calculated by using methods that have been accepted commonly.

Japanese grain size distribution-SPT N number, Seed et.al (1984-1985), Cetin and Seed (200-2001) methods are used in this study for examining of liquefaction potential induced by earthquake. The standard penetration test results (N numbers) getting from site are corrected for procedure, effective stress and fine material content in each method by using same or different correlations. The liquefaction effect on Ereğli Fishery Port that has been suffered damage during 17th August, 1999 Earthquake is examined by comparing of three methods in this study also.

Key words: Liquefaction mechanism, wave breakers, sea structures, undersea pipelines, pore pressure, shearing stress, effective stress, ground acceleration, fine material content, correction for procedure, magnitude scaling factor, high overburden stress correction factor, cyclic stress ratio, cyclic resistance ratio, probability of liquefaction, liquefiable soil, safety factor.

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği terminolojisinde sıvılaşma, zemin taneleri arasındaki efektif gerilmenin ortadan kalkması ve su-katı karışımının bir sıvı gibi hareket etmeye başlaması olarak tanımlanır. Bu şartlar altındaki zemin taşıma kapasitesini yitirir ve üzerindeki yapılar çöker.

Afet boyutlarına ulaşarak çok büyük hasarlara yol açabilen zemindeki bu davranış biçiminin ve doğurduğu sonuçların anlaşılmasına yönelik çalışmalar 1964 Niigata-Japonya ve 1964 Büyük Alaska-A.B.D. depremleri sonrası hızlanmıştır. Sıvılaşma mekanizmasının meydana geliş biçimi, nedenleri, önceden tahmin edilebilirliği ve alınabilecek önlemler üzerine yapılan araştırmalar sonucunda bugün zemin-sıvılaşma mühendisliği yarı olgunlaşmış, pek çok uzmanlık alanının iç içe geçtiği, kendi özel uygulamaları olan bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bugün çok sayıda deneysel yöntem kullanılarak elde edilmiş pek çok bağıntı ile gerçek arazi verileri karşılaştırılmakta ve belli kabuller içerisinde sıvılaşma potansiyeli tespit edilebilmektedir. Ancak bu çalışmaları çoğu zaman uzman yardımı almadan yürütmek, uygun yöntem ve bağıntıları bulmak, kavramak ve sonuca ulaşmak uygulama mühendisleri, proje mühendisleri ve hatta akademisyenler için bile zorlu bir uğraş gerektirmektedir.

Bu çalışmada basitçe amaçlanan; sıvılaşma potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılan ve yaygın olarak kabul görmüş yöntemleri şematik bir yapı altında toplamak, yararlandıkları kaynakları bir araya getirerek kullanım kolaylığı sağlamak ve 1999 Kocaeli depremi sonrası sıvılaşma nedeni ile hasar görmüş bir dalgakıran yapısı üzerinde kıyaslamalı bir örnek oluşturmaktır.

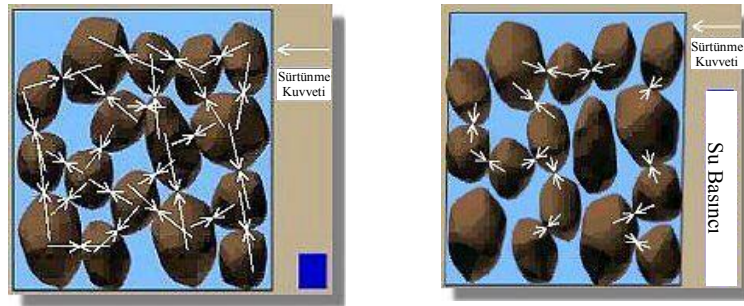
Kıyı ve liman mühendisliği ile zemin mühendisliği ara kesitinde kalan çalışmada sıvılaşma mekanizmasını tetikleyen iki farklı etki, deprem ve dalga etkisi ayrı ayrı ele alınmaktadır. Dalga etkisinde sıvılaşma potansiyelinin hesabına ilişkin genel bir bilgi verilmekte, nedenselliğine kısaca değinilmektedir. Deprem etkisi altında sıvılaşma potansiyelinin incelenmesinde ise 3 farklı yöntem ayrıntılı olarak incelenmektedir. Bu yöntemler;

- Liman ve barınaklar için geliştirilen Japon Standartları “tane çapı dağılımı-standart penetrasyon (N) sayısı yöntemi”.
- Seed vd., (1984, 1985) tarafından geliştirilmiş deterministik bağıntı.
- Çetin ve Seed (2000, 2001) tarafından geliştirilen yeni SPT tabanlı sıvılaşma bağıntıları ve kullanma yöntemidir.

2. SIVILAŞMA

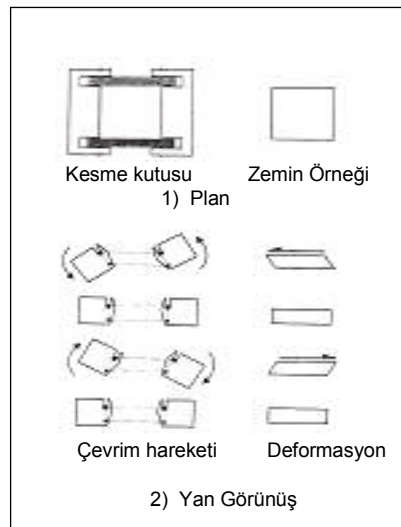
2.1 Sıvılaşma Mekanizması

Geçirimsiz ortamda kalan sıvılaşabilir bir zeminde tekrarlı yüklerin (deprem, dalga etkisi, şoklar v.b.) boşluk suyu basıncını arttırmaya başlaması ve efektif gerilmenin zamanla azalarak sıfıra inmesi “sıvılaşma mekanizması” olarak tanımlanan davranış biçimini oluşturmaktadır (Şekil 2.1).



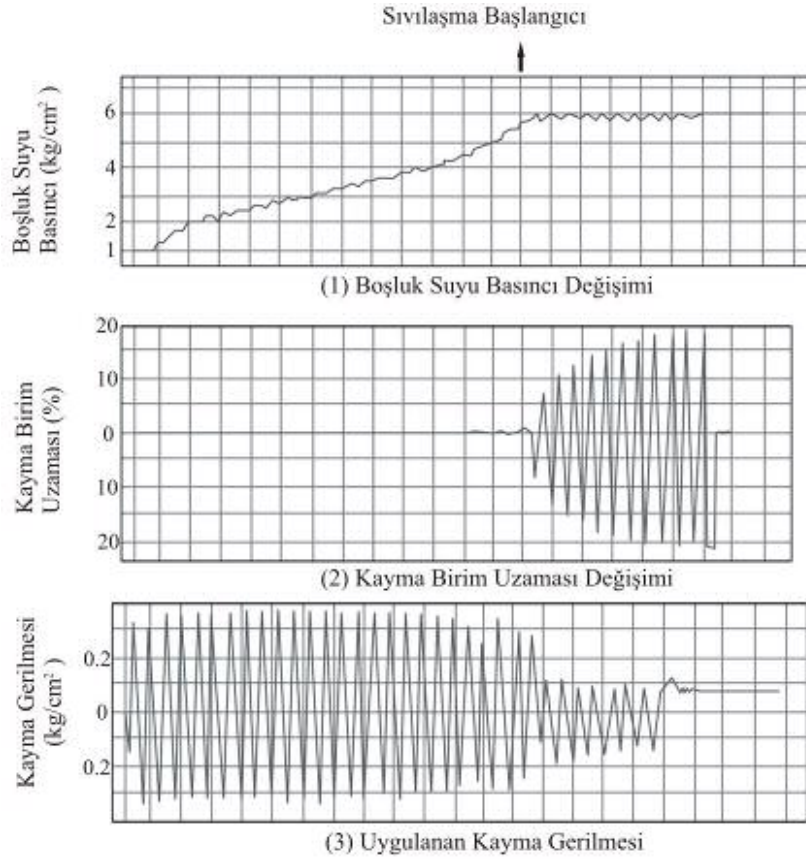
Şekil 2.1 Boşluk suyu basıncı etkisi ile zemin taneleri arasındaki efektif gerilmenin ortadan kalkması, (www.liquefaction.com, 2004)

Genel olarak kil/silt gibi düşük geçirimsizlikteki zeminler tarafından su kaçışının engellendiği ya da çok aza indirildiği tabaka oluşumları ile düşük plastisiteli kil/silt gibi boşluk suyu basıncının, zeminin kendi yapısından dolayı, düşmesinin engellendiği yapılar “geçirimsiz ortam” olarak adlandırılabilir. “Sıvılaşabilir zemin” tanımına ise hangi zemin sınıflarının girdiği halen bir araştırma ve tartışma konusudur, bununla beraber kumların sıvılaşabilirliği genel bir kabul görmüştür.



Şekil 2.2 Basit kesme kutusu deneyi, (Peacock ve Seed, 1968)

Peacock ve Seed (1968) tarafından geçirimsizliği sağlanan “doygun kum örnek” üzerinde yapılan basit kesme kutusu deneyinde sıvılaşma mekanizmasının oluşumu gözlenmiştir (Şekil 2.2). Bu deneyde kullanılan zemin örneğini başlangıçta bir arada tutan çevresel basınç zemin ve doygun zemin içerisinde bulunan su tarafından taşınmaktadır (efektif gerilme σ'_0 ve boşluk suyu basıncı p). Uygulanan tekrarlı kayma gerilmeleri ilave boşluk suyu basıncı üretmekte ve tekrarlı yük devam ettikçe bu basınç gelişmektedir.



Şekil 2.3 Boşluk suyu basıncı, kayma birim uzaması ve kayma gerilmelerinin zamana bağlı değişimleri, (Peacock ve Seed, 1968)

Şekil 2.3’de yer alan grafiklerden üstteki boşluk suyu basıncının, ortadaki kayma birim uzamasının, alttaki ise uygulanan kayma gerilmesinin zamanla değişimini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi zemin örneğine uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi ilave bir boşluk suyu basıncı üretmekte (p) ve bu basınç tekrarlı yük devam ettikçe gelişmektedir. Boşluk suyu basıncının gelişimi başlangıç efektif gerilme değerine ulaşıldığında son bulmaktadır ($\sigma'_0 = p$). Başka bir deyişle artık toplam yük yalnızca su tarafından taşınmaktadır ve efektif gerilme değeri sıfırdır. Zemin taşıma kapasitesini yitirmiş yani “sıvılaşma” oluşmuştur. Zeminde meydana gelen çökme sıvılaşma ile aynı anda gerçekleşmekte yani sıvılaşma tek başına

çökmeye neden olmaktadır. Deneylerde bu duruma 24 adet çevrimden sonra ulaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde sıvılaşma mekanizmasının oluşabilmesi için temel olarak;

- Zeminin küçük geçirgenliğe sahip olması gerektiği bu sayede boşluk suyu basıncının gelişebildiği,
- Boşluk suyu basıncının ancak yeteri kadar yüksek frekansa sahip tekrarlı yükleme durumlarında gelişebildiği, frekans düşükse toplanmaya çalışan boşluk suyu basıncının hızla dağılarak etkisinin kalmadığı,
- Tekrar sayısının, zemine etkileyen kayma gerilmelerinin şiddetine ve zeminin rölatif yoğunluğuna bağlı olarak, sıvılaşmaya doğrudan etkisi olduğuna dikkat çekilmektedir.

Daha sonraki bölümlerde dalga ve deprem etkisi ile harekete geçen sıvılaşma mekanizması detaylı olarak incelenmekte neden ve sonuçları değerlendirilmektedir.

2.2 Dalga Etkisinde Sıvılaşma

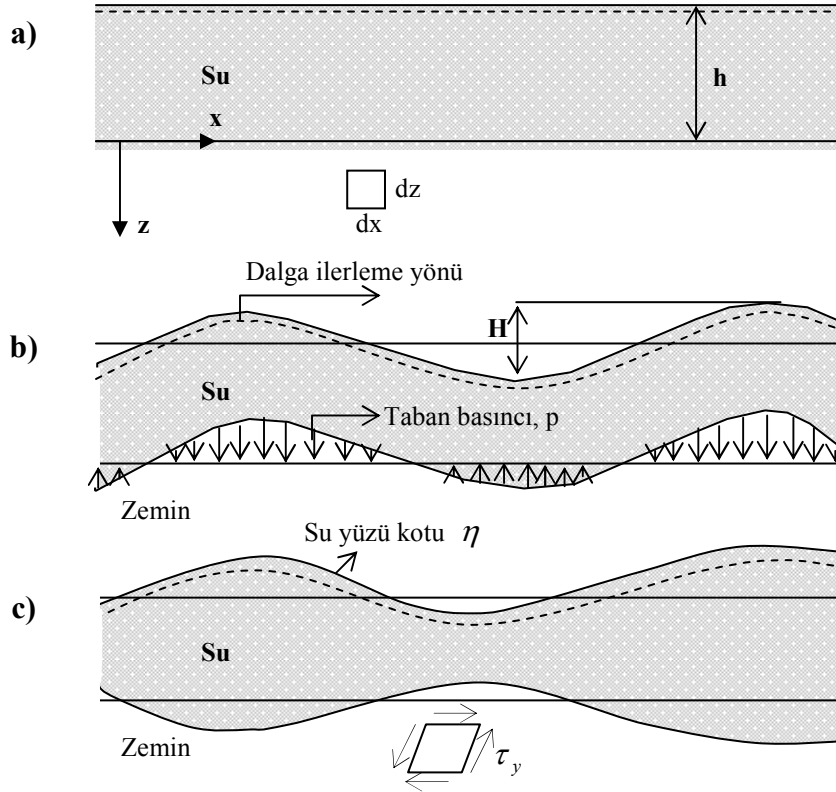
Dalga etkisinde sıvılaşmaya ilişkin olarak literatürde pek çok gözlem özetlenmiştir. Örneğin fırtınalar sırasında deniz tabanında hareket ederek yukarı doğru çıkan veya aşağı doğru batan boru hatları, dalgakıran/sahil duvarı gibi yapılarda oluşmuş oturmalar ve çökmeler, çeşitli ölçüm cihazlarının deniz ya da göl tabanlarında gömülerek yok olması gibi yurdumuzda da örneklerine rastladığımız vakalar mevcuttur.

Dalga etkisinde sıvılaşma temel olarak iki farklı mekanizmadan üretilmektedir;

- 1) Boşluk suyu basıncının oluşması ile (kalıcı sıvılaşma),
- 2) Dalganın geçişi sırasında zeminde oluşan yukarı doğru yönelmiş düşey basınç gradyanının etkisi ile (anlık sıvılaşma).

2.2.1 Boşluk Suyu Basıncının Oluşması ile Meydana Gelen Sıvılaşma (Kalıcı Sıvılaşma)

Şekil 2.4’de ilerleyen dalgaların düz bir taban üzerinde periyodik olarak basınç dağılımını nasıl değiştirdiği görülmektedir. Dalga tepesi altındaki bölgede basınç artmakta, dalga çukuru altında ise tam tersi bir etki görülmektedir. Başka bir deyişle zemin bu gerilmeler altında sıkışmakta ve genleşmektedir. Bu durum tabanda kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır.



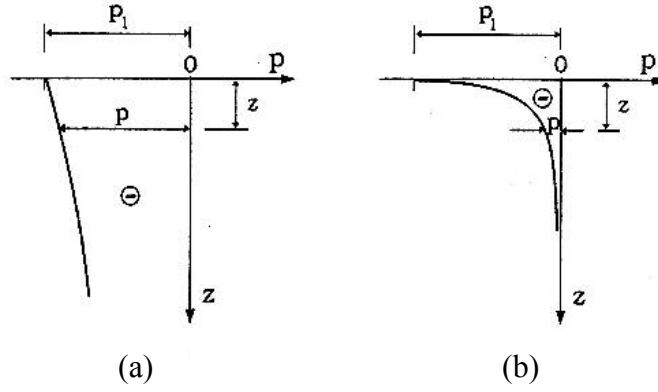
Şekil 2.4 Dalga etkisi altındaki zeminde oluşan elastik deformasyonlar, (Sümer ve diğ., 2002)

Kayma gerilmesi kayma hareketinden dolayı zaman içerisinde periyodik olarak değişmektedir. Başlangıçta bir arada bulunan zemin taneleri periyodik olarak etkiyen kayma gerilmeleri ve bunun sonucunda oluşan kayma deformasyonlarının etkisiyle birbirinden uzaklaşmakta ve aralarındaki boşluk miktarı artmaktadır. Basınç etkisiyle boşluklardan içeriye giren su, şayet zemin silt gibi geçirimsiz bir yapıdaysa boşluk suyu basıncını artırmaktadır. Artan boşluk suyu basıncı bir süre sonra tanelerin batık ağırlığını aşacak seviyelere gelebilmekte ve tanelerin birbirinden kopmasına, tamamen serbest kalarak bir sıvı gibi hareket etmesine neden olmaktadır. Bu durum “*kalıcı sıvılaşma*” olarak tanımlanmaktadır.

2.2.2 Yukarı Doğru Yönelmiş Düşey Basınç Gradyanı Etkisi ile Oluşan Sıvılaşma (Anlık Sıvılaşma)

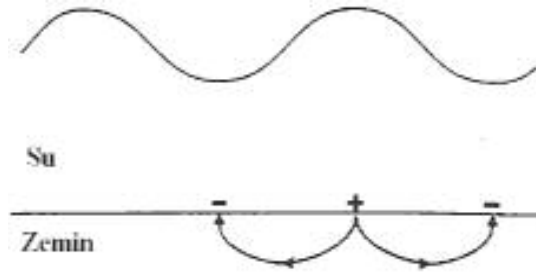
Sıvılaşma ile ilgili başka bir mekanizma dalga çukurunun geçmesi sırasında oluşmaktadır. Dalga çukuru altındaki boşluk suyu basıncı negatiftir ve basıncın aşağıya doğru dağılımı tamamen doymuş zeminler ve doymuş olmayan zeminler için Şekil 2.5’de verildiği gibi farklıdır. Doymuş hal için basınç gradyanındaki değişimin büyük olmadığı görülmektedir. Doymuş olmayan halde ise zemin hava/gaz karışımı içerdiğinden çok kısa bir mesafede basınç aniden kaybolmakta, değişim çok büyük seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum dalga çukurunun

geçişi sırasında deniz tabanının üst tabakasında oldukça güçlü bir kaldırma kuvvetinin oluşabileceğini göstermektedir. Bu kaldırma kuvveti tanelerin batık ağırlığını geçtiği takdirde taneler hareketlenecek ve sıvı gibi hareket edecektir. Bu tip sıvılaşmaya “*anlık sıvılaşma*” adı verilmektedir.



Şekil 2.5 Dalganın geçişi sırasında boşluk suyu basıncının tipik dağılımı (Hidrostatik basıncın aşılması durumu), (a) Doygun zemin, (b) Doygun olmayan zemin, (Sümer ve diğ., 2002)

Buradaki sıvılaşma dalga çukurunun geçmesi sırasında kısa süreli olarak oluştuğundan dalga periyodunun geri kalan kısmında sıvılaşma oluşturmeyen bir rejim hakimdir. Dalga çukuru altındaki zeminde oluşan akım, taneleri yukarıya doğru sürüklemeye çalışacağından bu durum anlık sıvılaşma etkisini arttıracaktır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Dalga etkisi altında deniz tabanında oluşan akıntı, (Sümer ve diğ., 2002)

2.2.3 Dalga Etkisi Altında Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması

- İlerleyen dalga etkisi altında sıvılaşma mekanizmasını oluşturan ana öğeler;
- Dalganın zeminde neden olduğu kayma gerilmeleri,
- Boşluk suyu basıncı

- Yeraltı suyu akımıdır.

Sıvılaşma mekanizmasını tanımlamak için zeminde gelişen kayma gerilmelerini ve boşluk suyu basıncını bulmak gerekmektedir. Temel olarak bu büyüklükler poro-elastik zemin kabulüne dayanan BIOT konsolidasyon denklemleri yardımı ile çözülmektedir (Elastik bir yapıda boşlukları su ile doldurulmuş lastik sünger bu kabule iyi bir örnektir, Terzaghi, 1948 ve Biot, 1941).

Çözüm denklemlerine ulaşabilmek için sırasıyla;

- ✓ Bir gerilme alanı için denge şartları,
- ✓ Poro-elastik zemin için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (Hooke kanunları),
- ✓ Poro-elastik zemin için denge denklemleri,
- ✓ Darcy Kanunu (Boşluk suyu basıncındaki değişim zemin içindeki akımı yönlendirdiğinden akımın hızı doğrudan basınç gradyanına bağlıdır ve bu bağıntı Darcy Kanunu ile ifade edilmektedir),
- ✓ Süreklilik denklemi (Boşluk suyu kütlesinin korunumundan elde edilen “*depolama denklemi*”)

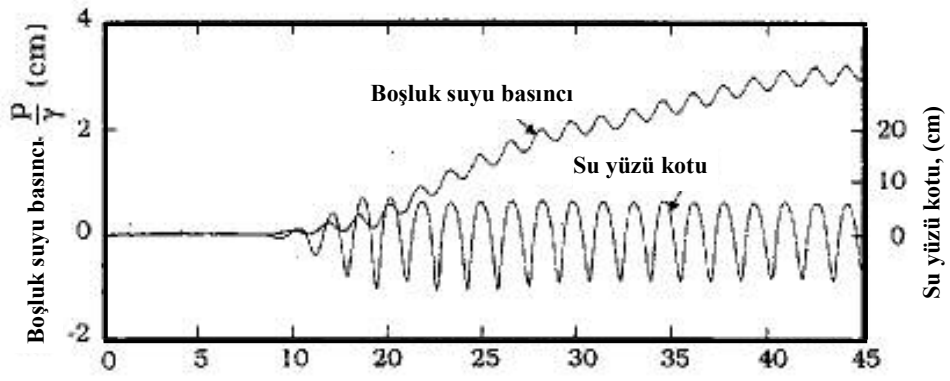
incelenmekte ve gerekli sınır şartları altında çözüm denklemleri türetilmektedir.

2.2.4 Kalıcı Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması

2.2.4.1 Genel Yaklaşım

Deprem sırasında boşluk suyu basıncının oluşma biçimi Peacock ve Seed (1968) tarafından basit kesme kutusu deneyi ile laboratuvar şartlarında örneklenmiştir (Bknz. Bölüm 1). Dalga etkisinde bir zemine etkiyen kayma gerilmeleri ve bunun sonucunda gelişen boşluk suyu basıncı deprem sırasında meydana gelen durum ile benzer özellikler taşımaktadır.

Şekil 2.7’de siltli bir taban üzerinde hareket eden dalgaların meydana getirdiği boşluk suyu basıncının zamana göre değişimi ve dalga hareketinin başlamasıyla boşluk suyu basıncındaki artış açıkça görülmektedir (Sümer vd., 2002).

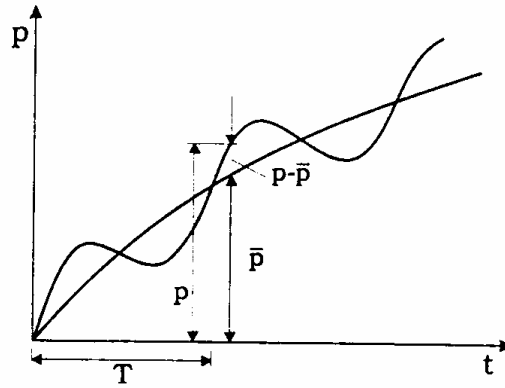


Şekil 2.7 Boşluk suyu basıncı ve dalga hareketinin zamana göre değişimi; $h=42$ cm, $H=10$ cm, $z=16.5$ cm., $d=17$ cm., $T=1.6$ cm., (Sümer vd., 2002)

2.2.4.2 Periyot-Ortalama Boşluk Suyu Basıncı Denklemi

Biot konsolidasyon denklemlerinden ortalama boşluk suyu basıncının zamana göre değişimi konsolidasyon katsayısı C_v ve kaynak terim olarak adlandırılan f 'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial z^2} + f \quad (2.1)$$



Şekil 2.8 Boşluk suyu basıncının iki bileşeni olan kalıcı bileşen $\bar{p}$ ve salınım yapan bileşen, $p - \bar{p}$ 'i gösteren karakterize edilmiş çizim, (Sümer ve diğ., 2002)

C_v , Konsolidasyon katsayısı

Boşluk suyu basıncının oluşumunu çözen denklem difüzyon denklemini destekler niteliktedir ve konsolidasyon katsayısı, difüzyon katsayısı gibi rol oynamaktadır.

$$C_v = \frac{G_k}{\gamma} \frac{2-2\nu}{(1-2\nu) + (2-2\nu) \frac{nG}{K'}} \quad (2.2)$$

Burada;

G, kayma modülü;

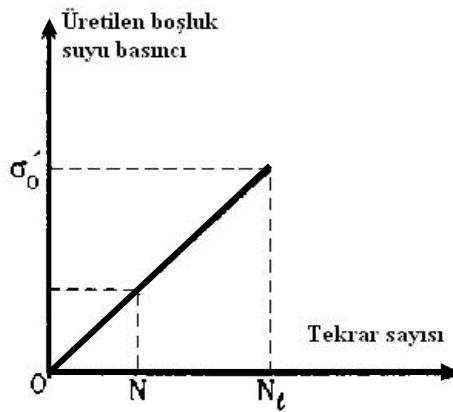
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.3)$$

K' , suyun gerçek hacimsel elastiklik modülü;

$$\frac{1}{K'} = \frac{1}{K} + \frac{1-S_r}{p_o} \quad (2.4)$$

***f*, Kaynak terim**

Birim zamanda ve birim hacimde üretilen boşluk suyu basıncının toplam miktarını veren f büyüklüğü genellikle boşluk (z) ve zamanın (t) fonksiyonu olarak ele alınmaktadır (McDougal vd., 1989). Boşluk suyu basıncının gelişimi doğrudan zeminde meydana gelen tekrarlı kayma gerilmelerine bağlıdır. Bu durum Şekil 2.9'da en basit hali ile lineer biçimde ifade edilmektedir.



Şekil 2.9 Tekrar sayısına göre boşluk suyu basıncındaki artışı gösteren basit lineer model, (Sümer ve diğ., 2002)

$$\text{Üretilen Basınc} = \sigma'_o \frac{N}{N_e} \quad (2.5)$$

Burada N tekrar sayısıdır ve NT periyodundaki zaman aralığında üretilen basıncı vermektedir. Birim zamanda ve hacimde üretilen basınç (yani f büyüklüğü) ise;

$$f = \frac{\sigma'_o \frac{N}{N_e}}{NT} \quad \text{veya} \quad f = \frac{\sigma'_o}{N_e T} \quad (2.6)$$

Burada σ' başlangıçtaki efektif gerilme, yani aşırı basınç değeridir ve aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\sigma'_o = \frac{1}{3}(\gamma'z + k_o\gamma'z + k_o\gamma'z) = \gamma'z \frac{1+2k_o}{3} \quad (2.7)$$

Burada z çamur tabandan aşağı doğru olan mesafedir, k_o yanıl toprak basınç katsayısı ve γ' toprağın batık özgül ağırlığıdır. N_l büyüklüğü sıvılaşmaya neden olan tekrar sayısıdır ve Peacock ve Seed (1968) tarafından yapılan tekrarlı kayma gerilmesi testindeki gibi ele alınmaktadır.

$$N_e = \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\tau}{\sigma'_o} \right)^{1/\beta} \quad (2.8)$$

Burada τ , dalga hareketi etkisi altında zeminde oluşan kayma gerilmelerinin şiddetini ifade etmektedir.

2.2.4.3 Boşluk Suyu Basıncı Denkleminin Sınırsız Derinlikte Bir Zemin için Çözümü

Sınır şartları;

- Başlangıç anında boşluk suyu basıncı oluşmamıştır.

$$T = 0 : \bar{p} = 0$$

- Çamur tabaka üzerinde boşluk suyu basıncı her zaman kaybolmaktadır.

$$Z = 0 : \bar{p} = 0$$

Çözüm Denklemi:

$$\bar{p}(z, t) = \frac{2}{\pi} \int_{t'=0}^t dt' \int_{\xi=0}^{\infty} \exp[-C_v \xi^2 (t - t')] \sin(\xi z) \left[\int_{z'=0}^{\infty} f(z') \sin(\xi z') dz' \right] d\xi \quad (2.9)$$

2.2.4.4 Boşluk Suyu Basıncı Denkleminin Sınırlı Derinlikte Bir Zemin için Çözümü

Sınır şartları:

Geçirimsiz tabaka üzerinde basınç değişimi sıfır olmalıdır.

$$z = d : \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = 0$$

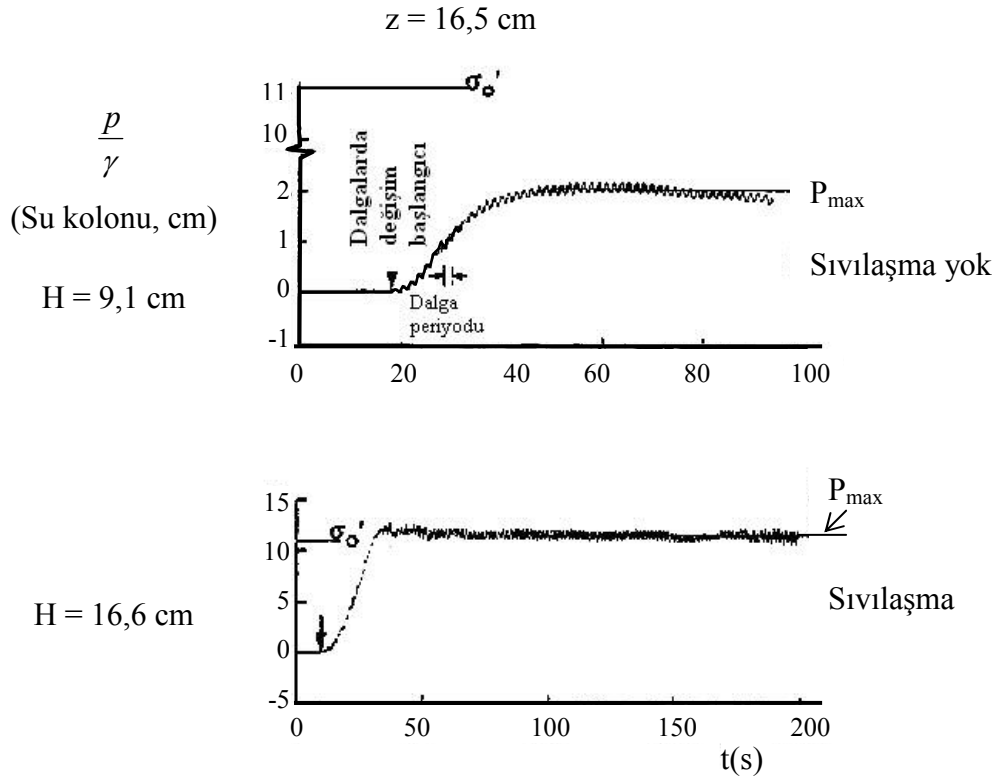
Çözüm Denklemleri:

$$\begin{aligned} \bar{p}(z, t) = & \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{d} z \right] \\ & \times \int_{t'=0}^{t C_v \left(\frac{\pi}{d} \right)^2} dt' \\ & \times \int_{\xi=0}^{\pi} \exp \left[-\frac{1}{4} (2m-1)^2 \left[C_v \left(\frac{\pi}{d} \right)^2 t - t' \right] \right] \sin \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \xi \right] g(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.2.4.5 Sıvılaşma Olan ve Olmayan Rejimler

Şekil 2.10’da iki farklı durum için laboratuvarda yapılan çalışmalarda boşluk suyu basıncının zamana göre değişimi görülmektedir (Sumer vd., 2002). Üstteki değişimde dalga yüksekliği $H=9.1$ cm, alttaki değişimde $H=16.6$ cm olup her iki durum için derinlik $z = 16.5$ cm’dir. Zemin silt olup $d_{50}=0.045$ mm, dalga periyodu $T=1.6$ sn, su derinliği $h=0.42$ m ve zemin derinliği $z=17$ cm’dir.

Şekilden de görülebileceği gibi dalga yüksekliği $H=9.1$ cm için $\bar{p}$ aşırı basınç değerine ulaşmamaktadır ($p_{\max} \sigma_b$ ’den daha küçük kalmaktadır), yani bu durumda sıvılaşma oluşmamaktadır (sıvılaşma olmayan rejim). Ancak $H=16.6$ cm olduğunda σ_0 ’ değerine ulaşılmakta ve hatta hafifçe bu değer aşılmaktadır, bunun anlamı sıvılaşmanın oluştuğudur (sıvılaşma rejimi). Sıvılaşma rejiminin oluşabilmesi için 10.2 cm olarak verilen kritik dalga yüksekliğinin aşılması gerektiği vurgulanmıştır (Sumer vd., 2002).



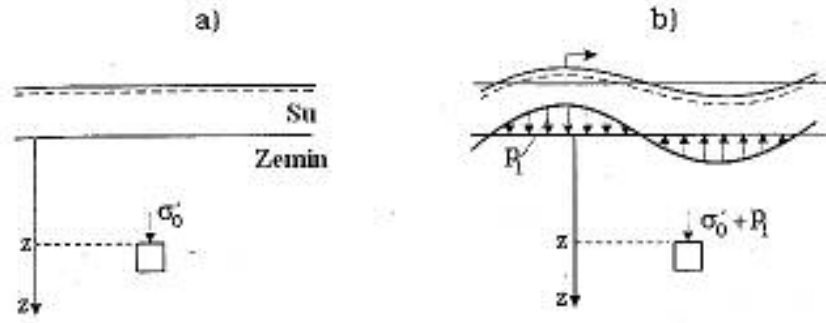
Şekil 2.10 Sıvılaşmanın oluştuğu ve oluşmadığı rejimler, (Sümer ve diğ., 2002)

2.2.5 Anlık Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması

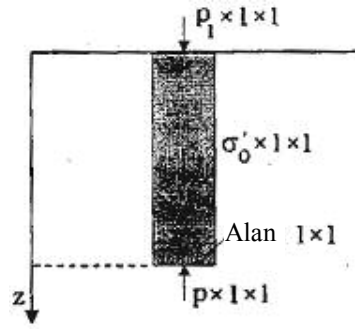
2.2.5.1 Genel Yaklaşım

Anlık sıvılaşma rejimi ve bu rejimin deniz yapıları üzerindeki etkileri hala araştırma konusudur. Örneğin koruma duvarları ve benzeri yapıların anlık sıvılaşma nedeni ile çöktüğü yaygın bir şekilde kabul edildiği halde bu problemi laboratuvar/arazi koşulları altında sistematik bir şekilde araştıran bir çalışma henüz yapılamamıştır.

Sıvılaşma derinliği doygunluk, porozite, permeabilite, kayma modülü, zeminin Poisson oranı, su derinliği, dalga yüksekliği, dalga periyodu gibi pek çok değişkene hassas bir şekilde bağlı olup aşağıda belirtilen hesaplama yöntemlerinden yararlanılabilmektedir. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de dalga geçişi sırasında zeminde oluşan gerilmeler görülmektedir.



Şekil 2.11 Tanımlayıcı çizim, (Sümer ve diğ., 2002)



Şekil 2.12 (1x1xz) boyutlarındaki zemin elemanı üzerindeki kuvvetler, (Sümer ve diğ., 2002)

Burada;

σ'_0 : Dalgalar üretilmeden önce toplam normal gerilmenin zemin tarafından karşılanan gerilme

p : Aynı zaman ve derinlikte su tarafından karşılanan normal gerilmeler

$\sigma'_0 + p_1$: Dalgalar üretilmeye başlandığında z derinliğinde ve $t=0$ anında normal gerilme

p_1 : Deniz tabanında dalgadan dolayı oluşan basınç

$$p_1 = p_b \exp[i(\lambda x + wt)] \quad (2.12)$$

p_b : Taban basıncının maksimum değeridir

Zemin elemanı üzerine etkiyen kuvvetlerin eşitliğinden;

$$\sigma' + p_1 = \sigma' + p \text{ yani } \sigma'_o - (p - p_1) = 0 \quad (2.13)$$

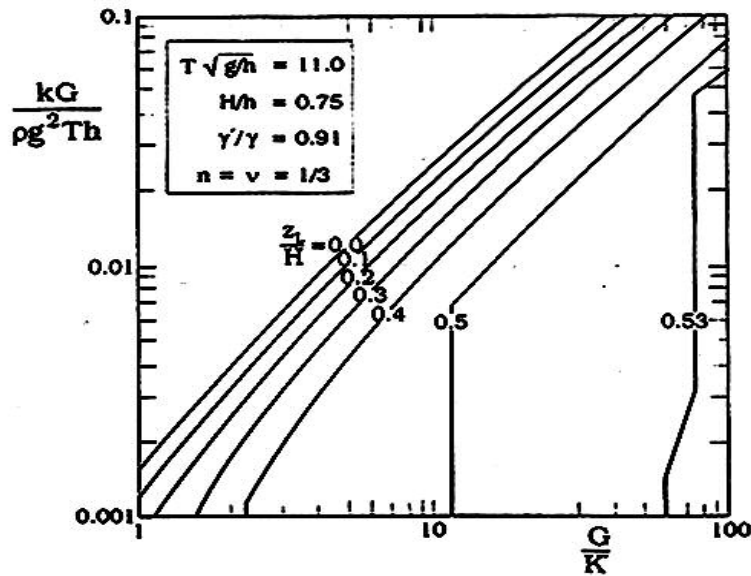
Denklemin sol tarafında kalan ikinci terim, yani $(p - p_1)$, Şekil 2.12'de gösterilen zemin kolonuna etki eden kaldırma kuvvetidir ve bu kuvvet batık zemin ağırlığına yani σ'_o 'a eşit olduğunda zemin çökecektir yani sıvılaşacaktır.

2.2.5.2 Boşluk Suyu Basıncı Denkleminin Tamamen Doygun Zemin Durumu için Çözümü

Biot denklemlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde normal şartlar altında efektif gerilmenin pozitif kaldığı yani anlık sıvılaşmanın oluşmadığı görülmektedir.

2.2.5.3 Boşluk Suyu Basıncı Denkleminin Doygun Olmayan Zemin Durumu için Çözümü

Çeşitli araştırmacıların sınırsız derinlikte doymayan bir zeminde oluşan gerilmelere ilişkin araştırmaları yayınlanmıştır. Şekil 2.13'de Sakai vd., (1992) tarafından anlık sıvılaşma derinliğini veren sonuçlar çizimler ile ifade edilmektedir (bu çalışma sonuçları Law, 1993 tarafından doğrulanmıştır).



Şekil 2.13 Anlık sıvılaşma derinliği, (Sakai vd., 1992)

Sakai vd., 1992;

$$p = p_b \frac{1}{1+m} \exp(-\lambda z) \cos(\lambda x - \omega t) + p_b \frac{m}{1+m} \exp\left(\frac{-z}{\sqrt{2}\delta}\right) \cos\left(\lambda x - \omega t + \frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \quad (2.14)$$

$$m = \frac{n}{(1-2\nu)} \frac{G}{K'} \quad \delta = \left[\frac{(k/\gamma)G}{\omega} \right]^{1/2} \left[n \frac{G}{K'} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right]^{-1/2} \quad (2.15)$$

Sonuç olarak;

- Boşluk suyu basıncı, p, denklem 2.14'den hesaplanabilir.
- Önceki denklemden bulunan p ile Denklem 2.12'den elde edilecek taban basıncı p_1 , Denklem 2.13'de yerine konularak efektif kayma gerilmesi σ_0' bulunabilir.
- Eğer $\sigma_0' \leq 0$ ise anlık sıvılaşma kriteridir.
- $\sigma_0' \leq 0$ için z derinliği bulunur. Bu bize anlık sıvılaşmanın olduğu zemin derinliğini vermektedir.

2.3 Deprem Etkisinde Sıvılaşma

Deniz kenarlarında, körfez çamurları ile kıyı düzlüklerinde, özellikle menderes yapan akarsuların taşkın düzlüklerinde ve gölsel çökellerde deprem etkisi altında yaygın olarak sıvılaşma gözlenmektedir. 1964 Nigaata (Japonya), 1967 Mudurnu Vadisi, 1970 Gediz, 1989 Lorna Prieta (Kaliforniya), 1995 Kobe (Japonya), 1998 Ceyhan/ Misis ve 1999 İzmit körfezi depremleri sıvılaşmanın olduğu çarpıcı örneklerdir.

Son 15 yıl içerisinde deprem mühendisliğinde yaşanan gelişmeler sayesinde artık yer hareketlerinin özellikleri daha iyi belirlenebilmekte ve tasarıma yönelik olarak kullanılabilir. Özellikle dinamik analiz hesap yöntemlerinde, sıvılaşma potansiyel ile kalıcı sıvılaşma dayanımının tahminine yönelik metotlarda ve sismik risk analizi çalışmalarında önemli adımlar atılmıştır.

2.3.1 Yer Hareketleri ve Tasarım Yer Hareketinin Seçimi (W.D.L. Finn, 2000)

Yer hareketlerinin özellikleri hareketi oluşturan sismik etkilerin ortaya çıkış biçimlerinden ve geoteknik koşullardan belirgin bir şekilde etkilenmektedir. Sismik analiz için model oluştururken ele alınması gereken önemli konular aşağıda özetlenmektedir.

i. Tektonik Ortam

Modelleme için temel olarak üç adet önemli tektonik hareket, yani levha hareketi bulunmaktadır;

- 1) Tektonik olarak aktif bölgelerdeki yüzeysel depremler,
- 2) Tektonik olarak stabil bölgelerdeki yüzeysel depremler,
- 3) Bölgesel depremler.

ii. Hareket Etme Süresine Bağlı Olarak Yer Hareketinin Türü

- 1) Ters atımlı fay hareketi
- 2) Verev atımlı hareketi
- 3) Normal atımlı fay hareketi
- 4) Doğrultu atımlı fay hareketi

iii. Fay Hareketlerine Göre Bulunulan Konum (Yön)

Özellikle fay hattına yakın bölgeler ve $T > 0.5$ sn periyotlu depremler söz konusu ise, fayın hareket etme yönüne dik ve paralel yer hareketi bileşenlerinde (yer ivmesi bileşenlerinde) büyük farklılıklar gözlenmektedir.

2.3.2 Sismik Faktörlerin Hesaplamalarda Ele Alınış Biçimleri

Bazı önemli sismik faktörlerin modelleme sırasında ele alınış biçimleri aşağıdaki gibidir (Summary Report From The 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, 2000);

1. Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan gevşek kum zeminler üzerinde aynı şiddette fakat frekansları farklı olan depremlerin etkileri arasında çok az fark görülmektedir. Yüksek frekans bu tür zeminlerde çok çabuk sönümlenmekte ve frekansı düşük olan ile kısa sürede eşitlenmektedir. Bu yüzden sıvılaşma hesaplarında frekans farkı ihmal edilebilmektedir.
2. Depremi oluş nedeninin sıvılaşmaya olan etkisini hesaplamak ve çözüm getirmek oldukça zor olduğundan hesaplamalarda kullanılmamaktadır.
3. Deprem merkezine olan mesafe hesaplamalarda 2.dereceden önem taşımaktadır.
4. Sıvılaşma hesabı için şiddet-oluş süresi arasındaki ilişki birinci dereceden önem taşımaktadır. Sıvılaşma hesabında anlık deprem şiddeti M_w kullanılmalıdır. Bu şiddet

birimi depremin türü, mesafesi, topografya gibi etkilerden bağımsızdır (yer hareketinin zamanı ile ölçülmektedir).

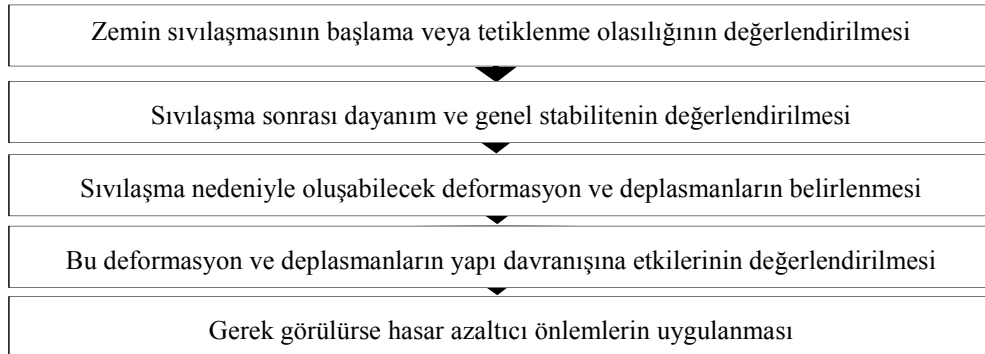
2.3.3 Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi (Çetin, 2002)

Zemin sıvılaşması binyılın son depremlerinde de (Adapazarı, Düzce, Türkiye; Chi-Chi, Taiwan, 1999) görüldüğü gibi önemli hasar sebepleri arasında kalmaya devam etmektedir. Sıvılaşmanın mekanizması ve doğurduğu sonuçların anlaşılmasına yönelik çalışmalar 1964 yılında meydana gelen ve sismik sıvılaşma nedenli yıkıcı hasara sebep olan Niigata-Japonya, Büyük Alaska-A.B.D. depremleri sonrası hızlanmıştır. Son kırk yılda bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Başlangıçta, bu ilerleme kumların sıvılaşma davranışının anlaşılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu süreç içinde meydana gelen depremler bizlere yeni dersler ve de veriler sunmaya devam etmiş buna paralel kumların sıvılaşma davranış mekanizmasına ek olarak;

- i) Siltli ve/veya çakıllı zeminlerin sıvılaşma potansiyeli,
- ii) Sıvılaşma sonrası zemin dayanımı ve gerilme – deformasyon davranışı

gibi konular üzerinde de çalışılmaya başlanmıştır.

Zemin sıvılaşma tetkikinde ilk adım zeminin sıvılaşma potansiyeli ya da riskinin belirlenmesidir. Zemin sıvılaşmasının önemli bir potansiyel risk ya da hasar sebebi olabileceği belirlendikten sonraki aşama, sıvılaşma sonuçlarının belirlenmesidir (Şekil 2.14). Bu aşama sıvılaşma sonrası zemin dayanımının belirlenmesine ek olarak sıvılaşma sonrası genel stabilitenin (arazinin ve/veya yapının) incelenmesini de içermektedir. Eğer sıvılaşma sonrası stabilite sağlanamazsa, deformasyonlar potansiyel olarak büyük olmakta, sıvılaşmayı önleyici ya da deformasyonları sınırlayıcı önlemler gerektirmektedir.



Şekil 2.14 Sıvılaşma değerlendirme aşamaları, (Çetin, 2002)

Eğer sıvılaşma sonrası genel stabilite kabul edilebilir seviyelerde ise bir sonraki aşama deformasyonların belirlenmesidir. Bu aşama uygulamanın yumuşak karnı olmaya devam

etmekte ve yeni mühendislik metotlarının geliştirilmesi ve kalibre edilmesine ihtiyaç duymaktadır. Benzer olarak sıvılaşma sonucunda oluşan temel deformasyonların yapı davranışına etkisi ve kabul edilebilir deformasyon ile davranış kriterleri konularında da genel görüş birliği oluşmamıştır.

Son olarak mühendislik tasarımlarında kabul edilebilir zemin ve/veya yapı davranışının mevcut koşullar altında garanti edilemediği durumlarda zemin ve/veya yapı iyileştirmeleri gerekmektedir. Bu alan da oldukça hızlı ilerleyen ancak henüz genel görüş birliğinin oluşmadığı bir konumdur. Gelişmekte olan zemin iyileştirme yöntemleri sismik zemin sıvılaşmasına yönelik zengin mühendislik çözümler demeti sunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin bazılarının uygulanabilirliği ve güvenilirliği kısıtlıdır.

2.3.4 Sıvılaşabilir Zeminler (Çetin, 2002)

Zemin sıvılaşma analizinin ilk adımı potansiyel olarak sıvılaşabilir zemin tabakalarının söz konusu zemin profilinde bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. Bu hangi zeminlerin sıvılaşabilir olduğu gibi önemli bir soruyu doğurmaktadır. Temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşabilirliği uzun zamandan beri bilinmemektedir. Ancak siltli ya da siltli killi kumlar ile çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliği konusunda görüş birliği olmadığı gibi bu konularda bir karmaşa da mevcuttur.

İri taneli ve çakıllı zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilirler. Çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliğini gösteren, iyi dökümente edilmiş örnekler mevcuttur (Evans, 1987; Harder, 1988; Hynes, 1988; Andrus, 1994). Ancak bu tip zeminler (daha ince taneli kumlu zeminlere göre) davranış olarak iki önemli farklılık gösterir: (1) Daha geçirimli olduklarından sismik yükleme sırasında oluşan tekrarlı boşluk suyu basıncı daha çabuk dağılabilmektedir ve (2) oluşumları sırasında iri tanelerinden dolayı ağır kütleleri çok nadiren gevşek depositlenme karakteri göstermekte ve dolayısıyla doğada gevşek olarak sıkça rastlanmamaktadır. Kumlu zeminlere gevşek halde sıklıkla rastlanmalarına karşın, çakıllı iri taneli zeminlere fazla rastlanılmamaktadır. Çakıllı zeminlerin bilinen yüksek geçirimlilik avantajları; daha az geçirimli tabakalar arasında sıkıştıklarında, ince taneli malzemelerin çakıllı tanelerin boşluklarını doldurduğu durumlarda, çakıllı tabakanın oldukça kalın, buna bağlı olarak drenaj mesafesinin uzun olduğu ve deprem yükü gibi ani yükler uygulandığında bozulabilmektedir. Bu gibi durumlarda iri taneli malzemelerin de sıvılaşabileceği bilinmeli ve gerekli sıvılaşma hesapları yapılmalıdır.

İnce taneli kohezyonlu silt ve kil karışımlarının sıvılaşp sıvılaşmayacağı birçok ulusal ve

uluslararası toplantıda tartışılmış ve tartışılmaya devam edilmektedir. Son beş yılda, yaklaşık yirmi uzmanın (NCEER çalışma grubu) sıvılaşma potansiyelinin incelenmesi konusunda oluşturdukları görüş birliği “National Science Foundation” (NSF) tarafından finanse edilen çalışma grubu özet raporunda sunulmuştur (NCEER, 1997). Bu raporun özet bildirisi ayrıca “ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering”de (Youd ve Idriss, 2001) basılmıştır. NCEER çalışma grubu bu konuya değinmiş ve ince taneli kohezyonlu malzemelerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik olarak “Geliştirilmiş Çin Kriterleri” (Finn vd., 1994) tartışılmış fakat metodun tahmin kalitesi konusunda bir görüş birliği oluşmamıştır.

Hem laboratuvar çalışmalarından hem de gerçek arazi davranışlarından anlaşıldığı üzere belli bir miktarın üzerindeki siltli ($\leq 0.074\text{mm}$; 200 No.lu eleği geçen malzeme miktarı) malzemenin varlığı, genel zemin davranışının bu ince taneli malzemelerin özellikleri tarafından belirlenmesi sonucunu doğurmuştur. Bu sınır, siltli malzemenin % 12-30’dan fazla olduğu durumlar olarak tanımlanabilir. Daha net bir aralığın tanımlanabilmesi malzeme tane çap dağılımı ve tane özelliklerine bağlı olmaktadır.

İyi derecelenmiş zeminler, üniform derecelenmiş veya ayrık tane dağılımlı zeminlerle karşılaştırıldığında daha az boşluk oranına sahip olduklarından, iri taneleri birbirinden ayırmak için daha az siltli killi malzeme gerekmektedir. Yine benzer olarak killi malzemelerin boşluk oranı siltli malzemelere nazaran daha fazla olduğu için, az miktarda killi malzeme ile daha fazla iri taneli ($>0.074\text{m}$) malzeme boşluğu doldurulabilmektedir.

İnce taneli (siltli ve killi) zemin parçacıklarının iri taneleri birbirlerinden ayıracak ya da genel zemin davranışını kontrol edebilecek miktarlarda olduğu durumlarda, bu tür malzemelerin sıvılaşması, ince taneli siltli ya da killi malzemenin plastik olmadığı ya da düşük plastisiteli olduğu ($PI \leq 10 - 2\%$) durumlarda gerçekleşebilmektedir. Aslında düşük plastisiteli silt ve siltli kumlar hem sıvılaşabilir olmaları hem de boşluk suyu basıncının düşmesini engelleyebilecek kadar düşük geçirimsizlik göstermeleri sebebiyle en tehlikeli zemin türleridir. Siltli killi malzeme oranı %15’ten fazla olan ancak bu ince taneli malzemelerin “orta” plastisiteli ($\%8 < PI < \%15$) olduğu durumlar da kesin bir hüküm vermek güçtür. Ancak bu tür zeminlerin “örselenmemiş” olarak örneklenip, laboratuvar da test edilmesi mümkündür. Yine bu tür kohezyonlu malzemeler için “sensitivite” incelemesi de yapılmalıdır. Tüm belirtilen kriterlere ek olarak sıvılaşmanın olabilmesi için; malzeme doymuş (ya da doymuşa çok yakın) olmalıdır ve yük hızlı uygulanmalıdır (drenajsız).

3. AMPİRİK YÖNTEMLERLE SIVILAŞMA ANALİZİ

Sıvılaşma olasılığının belirlenmesi için başlıca üç yöntem üzerinde durulacaktır. Birincisi limanlar için geliştirilmiş olan Japon teknik standartlarıdır. Burada tane boyutlarına ve elek analizlerinden elde edilen dağılım verilerine göre sınıflandırılan zeminler için değişik risk bölgeleri tayin edilmektedir. Her risk bölgesi bize sıvılaşma potansiyeli hakkında bilgi vermektedir.

İkinci yöntem Seed ve Idriss tarafından ilk kez 1971 yılında yayınlanmış olan ve günümüze kadar pek çok kez incelemeye tabi tutularak geliştirilmiş ve üzerine eklemeler yapılmış olan en yaygın deterministik bağıntıdır.

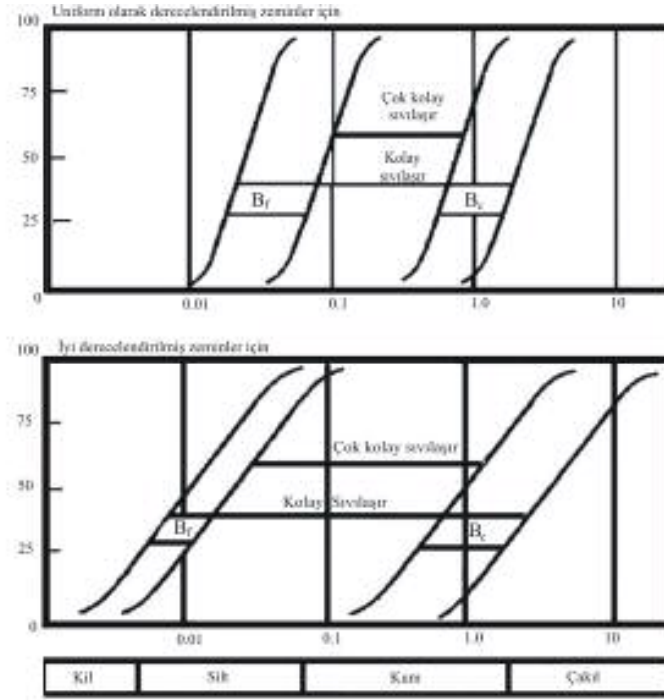
Üçüncü yöntem yeni geliştirilen sıvılaşma bağıntılarının kullanılarak daha önceki çalışmalara kıyasla sıvılaşma tahminlerinde daha az belirsizlikle sonucun tahmin edilebildiği, Çetin ve Seed, (2000;2001) tarafından geliştirilen yeni SPT tabanlı sıvılaşma bağıntılarını kullanan yöntemdir.

3.1 Japon “Tane Çapı Dağılımı - Standart Penetrasyon (N) Sayısı” Yöntemi

Liman ve barınak bölgelerinde yapılacak araştırmalar için uygun bir yöntemdir. Sıvılaşma tahmini aşağıdaki işlem sırası takip edilerek bulunmaktadır:

3.1.1 Sıvılaşma Risk Bölgesinin Tespiti

İlk olarak tane boyutu dağılımı çıkarılan zeminin Şekil 3.1 üzerinde hangi aralıkta kaldığı bulunur (A , B_c veya B_f). Bu dağılım aşağıda da görülebileceği gibi zeminin üniform ya da iyi derecelenmiş olması durumlarına göre değişmektedir (Bkz. tane çapı dağılımının zemin davranışına olan etkileri, kıvam limitleri ve ince malzeme etkisi için Ek 1).



Şekil 3.1 Tane boyutu dağılımı – Sıvılaşma Potansiyeli, (Japan International cooperation Agency, 1994)

A, B_c ve B_f tane boyutu dağılımına göre sıvılaşma potansiyeli olan bölgeleri göstermektedir.

A: Çok kolay sıvılaşabilir zemin sınıfını,

B_c: Kolayca sıvılaşabilir kaba zemin sınıfını,

(B_f): Kolayca sıvılaşabilir ince zemin sınıfını tanımlamaktadır.

Üniform Dağılım: Tanelerin büyük bir çoğunluğunun belirli bir çap aralığında kaldığı dağılım şeklidir.

İyi Derecelenmiş Dağılım: Her boyuttaki taneden yaklaşık olarak eşit miktarda bulunmaktadır.

3.1.2 Eşdeğer N Sayısının Bulunması

Standart penetrasyon testinden elde edilen N sayısı Denklem 3.1 kullanılarak düzeltilir ve eşdeğer N sayısı bulunur. Japon teknik standartları delgi işleminin “rotary drilling” yöntemi kullanılarak yapılmasını tavsiye etmekte ve düzeltmeler bu yönde iyi sonuç vermektedir.

$$(N)_{0.66} = (N - 1.828(\sigma_v' - 0.66) / (0.399 (\sigma_v' - 0.66) + 1)) \quad (3.1)$$

σ_v' : Efektif basınç (kPa)

Denklem 3.1’de SPT N okumaları yüksek efektif gerilme değerleri altında aşağı çekilmekte, düşük efektif gerilme değerleri altında ise yukarı çekilmektedir. Başka bir deyişle derinlere inildikçe artan SPT N sayısı belli bir oranda azaltılmaktadır.

Bilindiği gibi efektif basınç; zemin içinde verilen bir nokta üzerinde etkiyen toplam asal gerilmeler ile hidrostatik su basıncı arasındaki farka eşit asal gerilmelerdir. Pratikte doğrudan ölçülemeyen efektif gerilme, kolaylıkla ölçülebilen toplam gerilme ile boşluk suyu basıncı arasındaki fark alınarak hesaplanmaktadır. Zemin yüzeyinden belli bir derinlikte herhangi bir noktaya etkiyen toplam düşey basınç, derinliğe ve zeminin birim hacim ağırlığına bağlı olarak, boşluk suyu basıncı ise yeraltı su seviyesinden ölçülen derinliğe bağlı olarak değişmektedir (Özaydın, 1989).

3.1.3 Maksimum Kayma Gerilmesinin (τ_{mak}) Bulunması

Sismik analiz yöntemleri ile (örneğin EERA) maksimum kayma gerilmeleri (τ_{mak}) her derinlik için bulunur. Deprem yüklerinin dinamik olarak hesaplandığı sismik analiz yöntemlerinde; zeminin dinamik kayma modülü (G), dinamik Young modülü (E) ve sönümlenme oranına (h) bağlı olarak şekil değiştirmeler ve gerilmeler elde edilmektedir. Yerinde yapılan arazi deneylerinde zemine aktarılan sismik dalga hızlarının ölçülmesi ile ya da dinamik laboratuvar testleri yardımıyla kayma modülü tespit edilebilmektedir. Daha sonra Poisson oranından elastiklik modülü (E) bulunmaktadır.

3.1.4 Eşdeğer Yer İvmelerinin Bulunması

Aşağıda yazılı bağıntı kullanılarak maksimum kayma gerilmelerinden eşdeğer yer ivmeleri elde edilir.

$$a_{eq} = 0.7 (\tau_{mak} / \sigma_v') .g \quad (3.2)$$

g: yerçekimi ivmesi

3.1.5 Sıvılaşma Riskinin Tayin Edilmesi

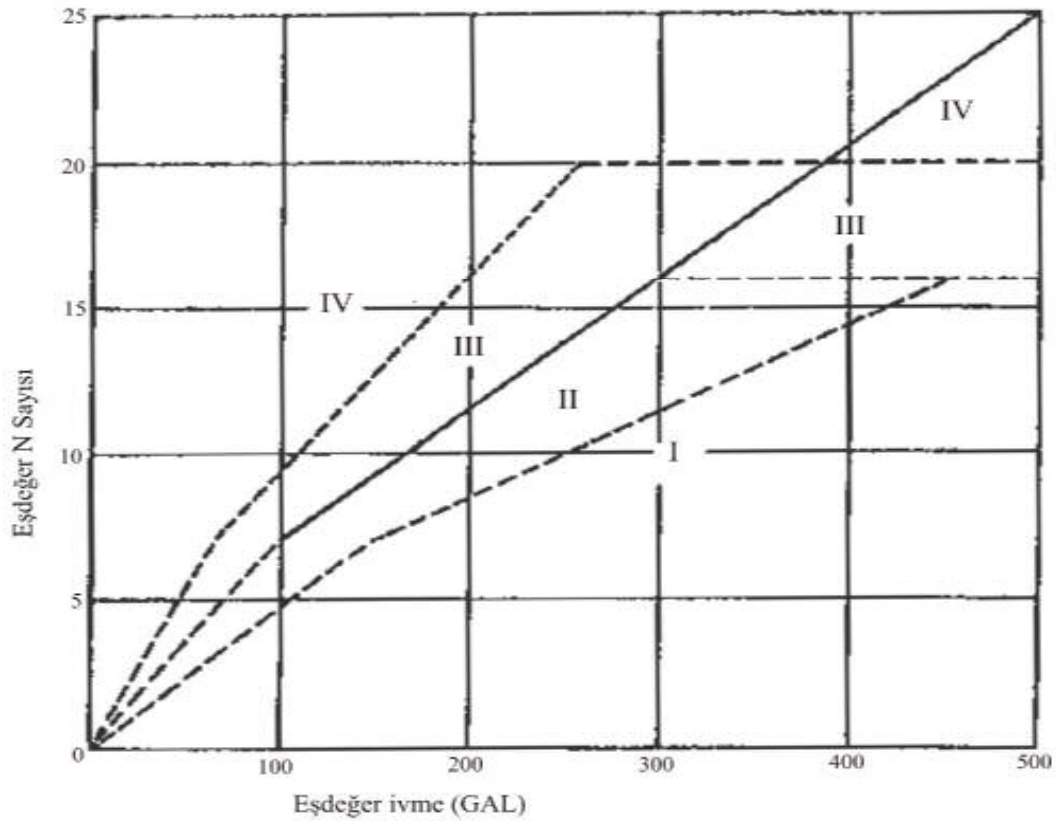
Zemin sınıfına göre aşağıdaki Çizelgeler kullanılarak sıvılaşma riski tayin edilir;

a) A Tipi zemin, başka bir deyişle tane boyutu dağılım çizelgelerinden “çok kolay

sıvılaşabilir” olarak tanımlanan zemin sınıfı için, Şekil 3.2’de verilen sıvılaşma grafiği kullanılarak sıvılaşma riski tayin edilir.

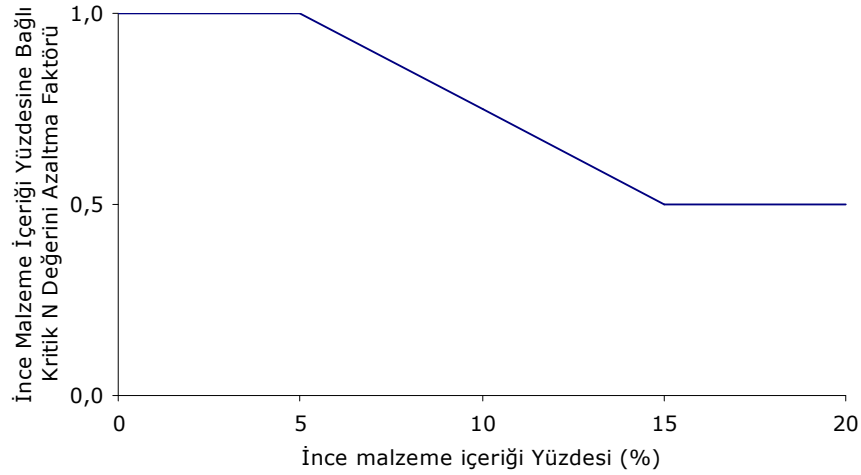
Bu grafikte düzeltme işlemi uygulanmış eşdeğer N sayısı ile hesaplamalar sonucu bulunan eşdeğer yerçekimi ivmesine bağlı olarak tanımlanmış bölgeler yer almaktadır. Her bölge farklı sıvılaşma riskini temsil etmektedir;

- I :Sıvılaşır
- II :Büyük olasılıkla sıvılaşır
- III :Sıvılaşma olasılığı yok
- IV :Sıvılaşmaz



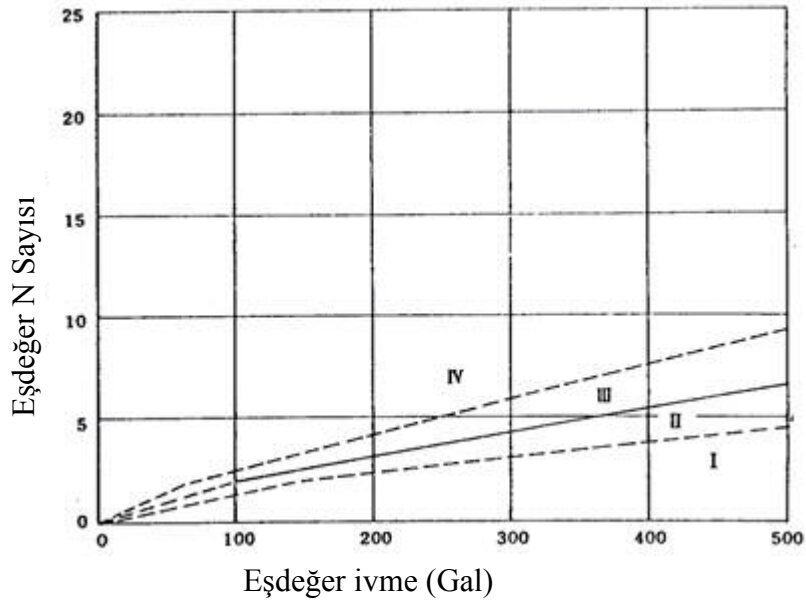
Şekil 3.2 A Tipi zeminler için sıvılaşma grafiği (1GAL=981g),
(Japan International Cooperation Agency, 1994)

Şayet **A Tipi** zeminlerde ince malzeme oranı %5’den fazla ise kritik N değeri Şekil 3.3 kullanılarak azaltılır. Japon Teknik Standartları sıvılaşma olasılığı yüksek olan silt ve kum karışımı zeminler için ince malzeme oranı arttıkça sıvılaşma dayanımını düşürmeyi öngörmektedir. Bu tip zeminler hem geçirimsiz olmaları hem de sıvılaşabilir olmaları nedeniyle çok büyük sıvılaşma riski taşımaktadır.



Şekil 3.3 Kritik N değerini azaltma faktörü,
(Japan International Cooperation Agency, 1994)

b) B_f ve B_c Tipi başka bir deyişle tane boyutu dağılım Çizelgelerinden “kolayca sıvılaşabilir ince ve kaba zemin” olarak tanımlanan zemin sınıfları için, Şekil 3.4’de verilen sıvılaşma grafiği kullanılarak sıvılaşma riski tayin edilir. Bu grafikte de düzeltme işlemi uygulanmış eşdeğer N sayısı ile hesaplamalar sonucu bulunan eşdeğer yer ivmesine bağlı olarak tanımlanmış bölgeler yer almaktadır. Her bölgenin temsil ettiği sıvılaşma riski yukarıda tanımlandığı gibidir.



Şekil 3.4 B_f ve B_c Tipi zeminler için sıvılaşma grafiği (1GAL=981g),
(Japan International Cooperation Agency, 1994)

B_c tipi zemin tabakalarının üzerinde şayet silt gibi geçirimsiz bir tabaka bulunuyorsa bu takdirde, sıvılaşma tahmini için A Tipi zeminler için geçerli olan yöntem takip edilir.

3.1.6 Sıvılaşma Olasılığı için Karar Verilmesi

Çizelge 3.1 kullanılarak sıvılaşmanın oluşup oluşmayacağına karar verilir.

Çizelge 3.1 Sıvılaşma olasılığı değerlendirme çizelgesi,
(Japan International Cooperation Agency, 1994)

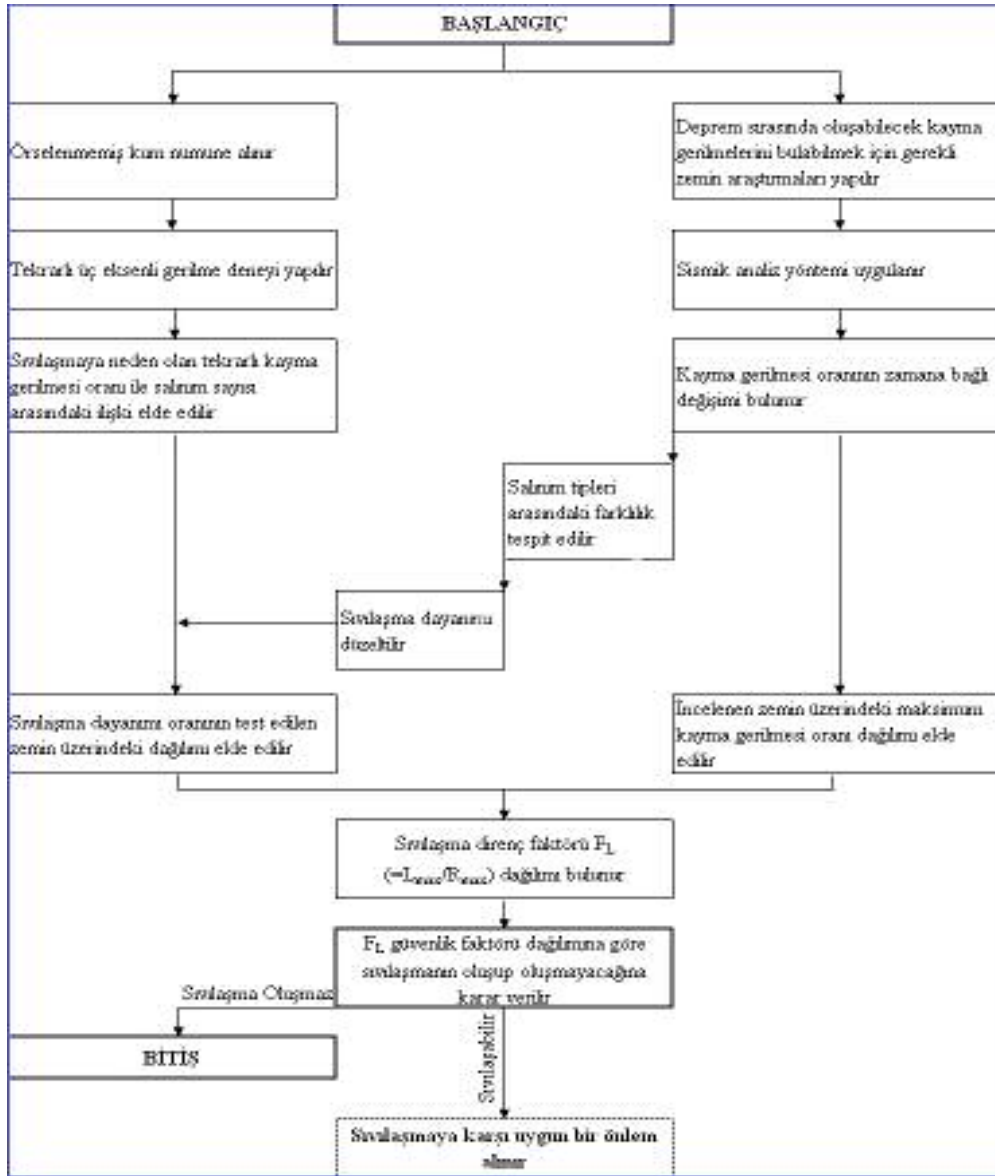
Şekil 3.2 veya 3.4'den Sıvılaşmanın Derecesi	Tane Çapı - N Sayısı yöntemine göre sıvılaşma için TAHMİN	Tane Çapı - N Sayısı yöntemine göre sıvılaşma için KARAR
I	Sıvılaşır	Sıvılaşır
II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Sıvılaşır olarak karar verilir ya da son karardan önce üç eksenli vibrasyon testi yapılır.
III	Sıvılaşma olasılığı yok	Sıvılaşmaz olarak karar verilir ya da son karardan önce üç eksenli vibrasyon testi yapılır.
IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz

3.1.7 Sıvılaşma Derecesi II ve III için Üç Eksenli Tekrarlı Gerilme Deneyi ile Sıvılaşma Olasılığının Bulunması

Tane çapı dağılımı ve N sayısına göre sıvılaşma olasılığı net bir şekilde tahmin edilemediği zaman, örselenmemiş numuneler üzerinde tekrarlı üç eksenli gerilme deneyi yapılarak sonuçlar doğrulanmalıdır. (Bkz. sıvılaşma potansiyelinin sayısal yöntemler ve arazi deney yöntemleri ile belirlenmesine yönelik ilave bilgi için Ek 2).

Bu deneyde elde edilen sıvılaşma dayanımı, sismik analiz yöntemiyle elde edilen kayma gerilmeleri ile mukayese edilmektedir (mukayese için Seed vd.'nin önerdiği yaklaşımı baz alınmaktadır).

Tekrarlı üç eksenli gerilme deneyini kullanarak sıvılaşma tahmininin yapılabilmesi için izlenmesi gereken işlem sırası Şekil 3.5'deki şemada gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Sıvılaşma tahmininin yapılabilmesi için izlenmesi gereken işlem sırası, (Japan International Cooperation Agency, 1994)

Şekil 3.5’de verilen sıraya göre sıvılaşma tahmini hesabı şu şekilde yapılmaktadır:

- Sismik analiz yöntemi ile zamana bağlı olarak zeminde oluşan kayma gerilmeleri bulunur,
- Zamana bağlı dağılım içerisinde efektif basınca bağlı olarak maksimum kayma gerilmesi oranı L_{mak} elde edilir.

$$L_{mak} = \frac{\tau_{mak}}{\sigma_{v'}} \quad (3.3)$$

Burada τ_{mak} maksimum kayma gerilmesi, σ_v ise efektif basınç değeridir. Maksimum kayma gerilmesi oranı seçilen her derinlik için hesaplanır. Hesaplanan bu değerler her zaman aynı anda oluşmasa da gerilme dağılımı derinliğe bağlı olarak çizilir.

c) Örselenmemiş zemin numunesi tekrarlı üç eksenli gerilme deneyine tabi tutulur ve sıvılaşmaya neden olan tekrarlı kayma gerilmesi oranı ile tekrar sayısı arasındaki ilişki bulunur. Burada, N_1 salınım (dalga) sayısı sonucunda sıvılaşmayı oluşturan tekrarlı kayma gerilmesi τ_1 , deney sırasındaki efektif çevre basıncına bölünerek tekrarlı kayma gerilmesi oranı elde edilir.

Sıvılaşmayı deneyler ile tespit etmek için iki farklı yöntem kullanılır, bunlar; aşırı boşluk suyu basıncı ölçümü ve şekil değiştirme deformasyonunun ölçümüdür. Bunlardan ikincisinin uygulaması daha kolay olduğu için tercih edilmektedir. Bu deneylerde belirlenen bir şekil değiştirme oranına ulaşan numune sıvılaşmış kabul edilmektedir.

Ancak laboratuarda yapılan bu deneyler gerçek arazi şartlarından bazı farklılıklar içermektedir:

i) Deneyler izotropik gerilme koşulları altında yapılmaktadır, oysa gerçekte tamamen anizotropik bir gerilme durumu söz konusudur.

ii) Numuneye uygulanan gerilmenin yönü sabittir, oysa deprem sırasında yön değişkendir.

iii) Numuneye düzenli bir salınım etkisi verilmektedir, oysa deprem dalgaları düzensizdir.

Bu nedenlerden dolayı elde edilen deney sonuçları üzerinde aşağıdaki düzeltmeler yapılmaktadır.

d) Deneyler sırasında numuneye uygulanan yatay ve düşey gerilme oranı (çevre basıncı, izotropik gerilme şartları) genellikle 0.5 olmaktadır;

$K_0 = \text{yatay gerilme} / \text{düşey gerilme}$

Anizotropik gerilme durumunu sağlamak için gerilme oranı τ_1 / σ_c ; $(1+2K_0)/3$ ile çarpılarak düzeltilir.

e) Sıvılaşmaya neden olan tekrarlı gerilme oranı; uygulanan gerilme yönü tek olduğundan çok yönlü (deprem şartları) duruma göre daha düşük olmaktadır. Bu yüzden gerilme oranı τ_c / σ_c ; **0,9** ile çarpılarak düzeltilir.

f) Sıvılaşmaya neden olan kayma gerilmesi oranına bir standart getirebilmek için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar 20 tekrar sonrası meydana gelecek sıvılaşma miktarına eşitlenmektedir, $(\tau_1 / \sigma_{c'})_{N1-20}$

Düzensiz salınım (sarsıntı) etkisini hesaplayabilmek için iki farklı deprem dalgası modeli esas alınır; şok dalgaları ve titreşim dalgaları. Sismik kayıtlarda şayet en büyük kayma gerilmesinin %60 veya daha fazlasına sahip şiddette en fazla 2 dalga tepesi kaydı varsa, bu dalga tipi şok deprem dalgası olarak kabul edilir. Şayet 3 veya daha fazla dalga tepesi kaydı varsa bu durumda dalga tipi titreşim olarak adlandırılır.

Şok tipi deprem dalgası için düzeltme katsayısı $C_k = 0.55$,

Titreşim tipi deprem dalgası için düzeltme katsayısı $C_k = 0.70$ olarak hesaplanır.

g) Sıvılaşma dayanımı oranı R_{mak} bulunur;

$$R_{mak} = \frac{0.9}{C_k} \frac{(1 + 2K_0)}{3} (\tau_1 / \sigma_{c'})_{N1-20} \quad (3.4)$$

Burada;

K_0 : Yatay gerilme ve düşey gerilme oranı,

C_k : Deprem dalgası tipi düzeltme katsayısı,

$(\tau_1 / \sigma_{c'})_{N1-20}$: 20 salınıma denk sıvılaşmaya neden olan kayma gerilmesi oranıdır.

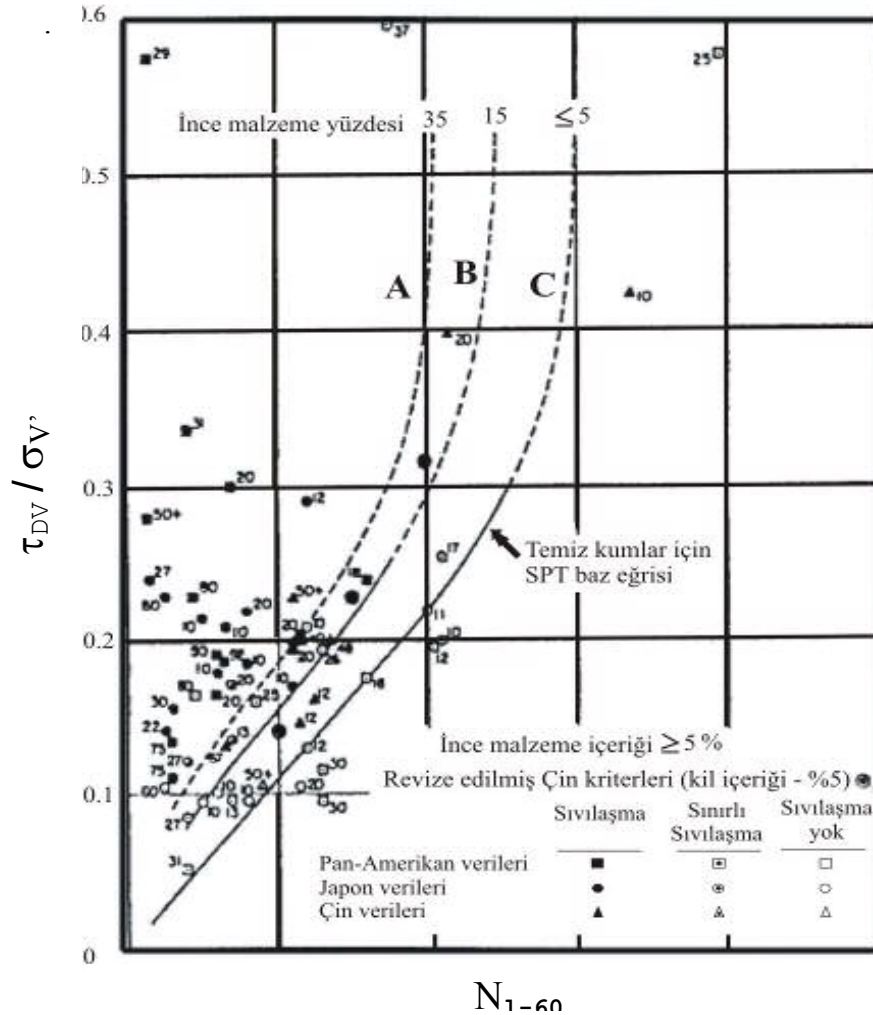
h) Sıvılaşmanın oluşup oluşmayacağına karar verilmesi için sıvılaşma dayanım oranı, kayma gerilmesi oranına bölünerek, sıvılaşma direnç faktörü F_L bulunur;

$$F_L = R_{mak} / L_{mak} \quad (3.5)$$

- ✓ Şayet oran 1 veya 1'den büyükse sıvılaşma oluşmayacaktır.
- ✓ Şayet oran 1'den küçük ise sıvılaşma oluşacaktır.

3.2 Seed vd. (1984,1985) Tarafından Geliştirilmiş Olan Yaklaşım

NCEER çalışma grubunca (NCEER, 1997) özetlendiği üzere, en yaygın kabul gören ve kullanılan deterministik bağıntı Seed vd., (1984, 1985) tarafından önerilen bağıntıdır. Şekil 3.6 bu çalışmanın, NCEER çalışma grubu tarafından düşük CSR değerleri için yapılan düzeltmeyi de içeren sürümünü göstermektedir. Bu bağıntı düşey efektif gerilme, enerji, ekipman ve prosedür düzeltmeleri yapılmış SPT “N” değeri (N_{1-60}) ile deprem süresi için düzeltilmiş üniform tekrarlı sismik yükün (CSR) karşılaştırılması ile elde edilmiştir. Şekil 3.6’da değişen ince dane oranı ve 7.5’tan büyük deprem moment büyüklük değerleri için eşdeğer üniform tekrarlı gerilme oranı (CSR_N) ile $SPTN_{1-60}$ vuruş sayısı arasındaki bağıntı görülmektedir.



Şekil 3.6 Eşdeğer üniform tekrarlı gerilme oranı (CSR_N) ile SPT $N_{1,60}$ vuruş sayısı arasındaki bağıntı, (1996 NCEER ve 1998 NCEER/NSF Özet Raporu)

Şekil 3.6 gösterilen bağıntı 1984 sonrası meydana gelmiş 7.5 şiddetinden büyük depremlerden elde edilmiş arazi inceleme sonuçlarından geliştirilmiştir ve buradaki bağıntıya düşük tekrarlı gerilme oranı değerleri için NCEER çalışma grubunun önerdiği düzeltme eklenmiştir.

Zeminin sıvılaşma dayanımını değerlendirebilmek için iki farklı değişkenin hesaplanması veya tahmin edilebilmesi gerekmektedir;

- ✓ **CSR (Cyclic Stress Ratio) – Tekrarlı kayma gerilmesi oranı:** Sismik hareketin zemin katmanları üzerindeki etkisini göstermektedir.
- ✓ **CRR (Cyclic Resistance Ratio) – Tekrarlı kayma gerilmesi dayanım oranı:** Zeminin sıvılaşmaya karşı dayanma kapasitesini göstermektedir.

SPT ile sıvılaşma dayanımı aşağıdaki işlem sırası takip edilerek bulunmaktadır:

3.2.1 Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranı (CSR)’nin Bulunması

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı istenilen derinlikler için bulunur. Seed ve Idriss (1971)’in geliştirdiği basitleştirilmiş yönteme göre;

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma_v') = 0.65 (a_{mak} / g) (\sigma_v / \sigma_v') r_d \quad (3.6)$$

Burada;

- τ_{av} :Ortalama kayma gerilmesi
- a_{mak} :Maksimum yatay yer ivmesi
- g :Yeryüzü ivmesi
- σ_v :Toplam düşey gerilme
- σ_v' :Efektif düşey gerilme
- r_d :Gerilme düzeltme katsayısı

Yukarıda görüldüğü gibi tekrarlı kayma gerilmesi oranı “üniform”a denk CSR olarak tanımlanan maksimum değer %65’ine eşit olan değerdir ($CSR_{denk} = 0.65 CSR_{mak}$).

a) Sismik analiz programlarından (örneğin EERA) maksimum yer ivmeleri derinliğe bağlı olarak bulunur. Yer ivmelerinin bulunması sırasında zemini oluşturan katmanların yapılarına, zemin özelliklerine ve derinliklerine bağlı olarak sismik etkiler sonucu oluşan;

- Maksimum şekil değiştirme miktarları,
- Maksimum şekil değiştirme süreleri,
- Kayma modülleri,
- Sönümlenme yüzdeleri,
- Maksimum gerilmeler,
- Son olarak maksimum yer ivmeleri bulunur.

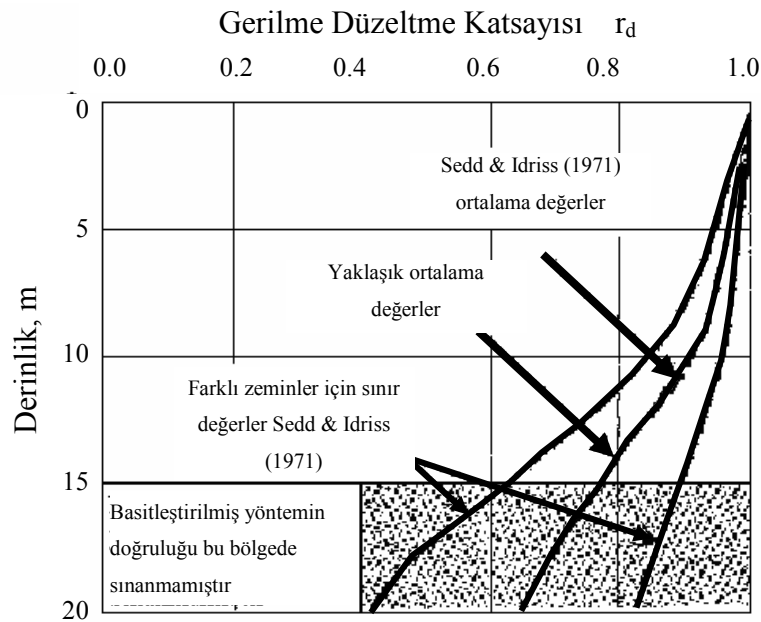
Son olarak maksimum yer ivmeleri a_{mak} bulunur (Bkz. maksimum yatay yer ivmesinin “ a_{mak} ” bulunması ve dinamik analiz metotları için Ek 3).

b) σ_v , yani toplam düşey gerilmeler derinliğe bağlı olarak hesaplanır.

c) σ_v' , yani toplam efektif düşey gerilmeler derinliğe bağlı olarak hesaplanır.

d) r_d , yani gerilme düzeltme katsayısı tayin edilir.

Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilmiş olan ve derinliğe göre zemin içindeki gerilme dağılımının ortalama ve sınır değerlerini gösteren çalışma Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7 Düzeltme katsayısı, (Youd ve Idriss, 2000)

Bu çalışma sıradan mühendislik uygulamaları için uygun ve pratiktir. Ancak son yıllarda deprem şiddeti, arazi rijitlik deneyleri gibi faktörleri de hesaba katan değişik arazi davranış analizleri yapılmış ve daha gelişmiş bağıntılar verilmiştir (Çetin ve Seed, 2000, 2001). NCEER Summary Report from 1996 and 1998’de Liao ve Whitman (1986) tarafından derinliğe bağlı olarak önerilen iki denklemin sıradan mühendislik uygulamalarında kullanılması uygun görünmektedir. Aşağıda verilen bu bağıntılara göre r_d katsayısı tayin edilir:

$$r_d = 1.0 - 0.00765 z \quad (z \leq 9.15m) \quad (3.7)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 z \quad (9.15m \leq z \leq 23m) \quad (3.8)$$

3.2.1 Sıvılaşma Dayanımı ya da Tekrarlı Kayma Gerilmesi Dayanma Oranının (CRR) Bulunması

Arazi deneylerinden elde edilen sonuçlar zaman içerisinde değişik araştırmacılar tarafından yenilenerek farklı ampirik bağıntılar içerisinde kullanılmış ve bu sayede zeminin sıvılaşma direnci hesaplanmaya çalışılmıştır. İncelediğimiz yöntemde ilk olarak SPT’den elde edilen N sayısının prosedür düzeltmeleri yapılmakta ve $(N)_{1-60}$ tayin edilmektedir.

$$(N)_{1-60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (3.9)$$

N_m :SPT (N) sayısı

C_N :Efektif basınç düzeltmesi

C_E :Çekiç enerji verimi düzeltmesi

C_B :Sondaj çapı düzeltmesi

C_R :Kısa tij düzeltmesi

C_S :Standart olmayan numune alıcısı düzeltmesi

1) N_m yerinde arazi deneyi sırasında ölçülen SPT N sayısı olup kaydedilmektedir.

2) Bilindiği gibi SPT (N) sayısı, aynı CSR altında artan efektif basınç değeri ile birlikte artmaktadır. Bu etkiyi hesaplamak için sıradan mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere “*basitleştirilmiş yöntem*” geliştirilmiştir (zemin cinsi, granülmetrik yapı, konsolidasyon etkisi, v.b. göz önüne alınmamıştır).

Bu yöntemde; efektif basınç, Seed vd.’nin sıvılaşma sınır eğrilerini belirlerken baz aldıkları 1 atmosferlik referans basınca göre, bir C_N katsayısı ile çarpılarak normalize edilmektedir.

Lio ve Whitman (1986a) tarafından C_N şu şekilde ifade edilmiştir;

$$C_N = \left(Pa / \sigma_v' \right)^{0.5} \quad (3.10)$$

Burada;

P_a : 1atm. (100 kPa)

σ_v' : Arazide kritik tabakanın orta noktasındaki mevcut efektif düşey gerilmenin atmosfer biriminden değeridir.

Kayen vd. (1992), Seed ve Idriss (1982) tarafından verilen orijinal eğriye daha iyi uyum sağlayan başka bir denklem önermiştir;

$$C_N = 2.2 / (1.2 + \sigma_v' / P_a) \quad (3.11)$$

Castro (1995) değişik kum zeminler üzerinde laboratuvar ve arazi testleri uygulayarak C_N katsayısının efektif basınç ile değişimini gözlemlemiştir. Deney sonuçlarına göre;

$\sigma_v' < 200$ kPa ise Denklem (3.10) kullanılmalıdır.

$200 \text{ kPa} < \sigma_v' < 300$ kPa ise Denklem (3.11) kullanılmalıdır.

300 kPa ve üzeri yüksek basınç değerleri söz konusu ise uzman görüşünün alındığı başka yöntemler ile tahminde bulunulmalıdır.

Tüm hesaplamalarda; C_N için üst sınır değer 1.7 olarak tanımlanmıştır.

3) Çekiç Enerji Verimi Düzeltmesi

SPT numunesi üzerine test sırasında düşürülen çekiçten numuneye transfer edilen enerji miktarı C_E katsayısı ile düzeltilmektedir. Transfer edilen enerjinin oranı çekicinin türüne, kaldırma mekanizmasına ve çekicinin bırakılış biçimine göre değişmektedir. Amerika'da yapılan testlerde ve genel olarak tüm dünyada bu oran %60 civarındadır. Değişik tipte çekiçler ve mekanizmalar için değişim Çizelge 3.2'den bulunur;

Çizelge 3.2 Enerji verimi düzeltmesi

C_E	SPT çekicinden numune alıcıya iletilen enerjinin yüzde cinsinden oranı	
	Donut Şahmerdan*	0.50 - 1.00
	Safety Şahmerdan*	0.70 - 1.20
	Automatic-Trip-Donut Şahmerdan	0.80 - 1.30
* Halatlı makara sistemi; halat makara etrafında iki tur atar, normal düşürme işlemi uygulanır, halat ıslak veya aşırı yıpranmış değildir (Japonların “atma” yönteminden farklıdır).		

4) Sondaj Çapı Düzeltmesi

SPT için kullanılan sondaj aletinin çapına göre C_B düzeltme katsayısı Çizelge 3.3’den bulunur;

Çizelge 3.3 Sondaj deliği çapı düzeltmesi

C_B	Sondaj deliği çapı düzeltme faktörü	
	65 - 115 mm	1.00
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15

5) Kısa Tij Düzeltmesi

Sondaj tij uzunluğuna göre C_R düzeltme katsayısı Çizelge 3.4’den alınır;

Çizelge 3.4 Sondaj tij uzunluğu düzeltmesi

C_R	Tij uzunluğu düzeltme faktörü	
	<3 m.	0.75
	3 - 4 m.	0.80
	4 - 6 m.	0.85
	6 - 10 m.	0.95
	10 - 30 m.	1.00

6) Standart Olmayan Numune Alıcısı Düzeltmesi

C_S düzeltme katsayısı standart olmayan SPT numune alıcısının kullanıldığı durumlarda ki bu duruma sıklıkla rastlanmaktadır, uygulanmıştır. Daha açık bir ifade ile SPT numune alıcısında membran öngörülüyorsa ve sondaj sırasında numune alıcının membran boşluğuna membran yerleştirilmediyse bu düzeltme gerekmektedir. Bu boşluk numune alıcı çapını artırmakta dolayısı ile dar bir açıklıktan geçen malzemenin daha geniş açıklıklı içi havzaya

ulaşmasıyla gevşeyerek numune alıcı ile arasındaki sürtünmenin azalmasına bu sebeple de daha düşük standart penetrasyon değerinin kaydedilmesine neden olmaktadır (Seed vd., 1984, 1985). SPT değerindeki düşme gevşek malzemeler ($N_1 < 10$) için % 10, sıkı malzemeler için ise % 30 seviyelerinde olmaktadır. C_s katsayısı Çizelge 3.5’den alınır.

Çizelge 3.5 Numune alıcısı membran kullanım düzeltmesi

C_s	Numune alıcısında membran kullanılıp kullanılmama durumuna göre düzeltme faktörü	
	Standart alıcı	1.00
	Membransız alıcı	1.10 - 1.30

7) İnce Malzeme Düzeltmesi

Şekil 3.6’da içerdikleri ince malzeme oranlarına göre zeminlerdeki $(N)_{1-60}$ ile CRR değişimi farklı eğriler ile gösterilmektedir. İnce malzeme (boyutu < 0.074 mm) oranı arttıkça tekrarlı gerilme dayanma oranının (CRR) artışı görülmektedir (bu artışın dayanımdaki artıştan mı, yoksa zemin içerisine sızan suyun miktarında meydana gelen azalmadan mı kaynaklandığı tam olarak bilinmemektedir).

Prosedür düzeltmeleri sonucunda elde edilen $(N)_{1-60}$ değeri, ince malzeme oranına göre aşağıdaki katsayılar ile çarpılarak yeniden düzeltilmektedir. Bunun nedeni; tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranını veren denklemin (bknz. Bölüm 2.3.3), %5 ince malzeme içeriğini gösteren eğriye göre düzenlenmiş olmasındandır (Seed ve Idriss, 1982).

$$(N)_{1-60CS} = \alpha + \beta (N)_{1-60} \quad (CS: \text{Clean Sand} - \text{Temiz Kum}) \quad (3.12)$$

Şayet ince malzeme oranı;

$$FC \leq \%5 \quad \text{ise} \quad \alpha = 0, \quad \beta = 1$$

$$\%5 < FC < 35 \quad \text{ise} \quad \alpha = \exp \left((1.76 - 190 / FC^2) \right), \quad \beta = (0.99 + (FC^{1.5} / 1000))$$

$$FC \geq \%35 \quad \text{ise} \quad \alpha = 5, \quad \beta = 1.2 \text{ alınmaktadır.}$$

Bu düzeltme katsayıları temiz kum zeminlerin yalnızca granülmetrik yapılarına bakılarak düzenlenmiştir. Özellikle ince dane oranı yüksek zeminlerde davranışı birinci dereceden kontrol eden plastisite kavramı ele alınmamış olup, dikkatli bir mühendislik yaklaşımı sergilenmelidir.

3.2.2 Eşdeğer Tekrarlı Kayma Gerilmesi Dayanma Oranının (CRR_{7.5}) Bulunması

Tüm düzeltmeler yapıldıktan sonra elde edilen (N)_{1-60CS}, Şekil 3.6'da %5 ince malzeme içeriği için tanımlanan eğrinin denkleminde yerine konulur ve eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranı (CRR_{7.5}) bulunur. Bu dayanım değeri 7.5 şiddetinde bir sismik hareketi öngörmektedir.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_l)_{60}} + \frac{(N_l)_{60}}{135} + \frac{50}{(10(N_l)_{60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3.13)$$

Bu denklem (N)₁₋₆₀ (N < 30 için geçerlidir çünkü (N)₁₋₆₀ ≥ 30 olduğunda artık granüller zemin taneleri çok sıkı bir yapıdadır ve bu yapı sıvılaşmaz olarak kabul edilmektedir.

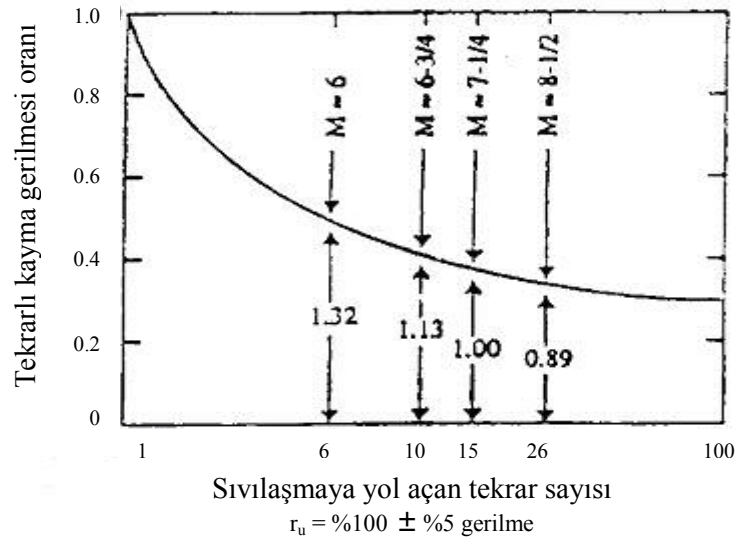
3.2.3 Deprem Şiddeti Düzeltme Katsayısının (MSF) Bulunması

Şekil 3.6'da temiz kum zeminler için 7.5 şiddetindeki depremlerin baz alındığı (incelenemediği) CRR eğrileri tanımlanmıştır. 7.5 şiddetinden küçük ya da büyük sismik etkiler söz konusu olduğunda, tanımlanacak bir bağıntı ile eğriler aşağı veya yukarı çekilerek *Deprem Şiddeti Etkisi* hesaplamalara yansıtılmaktadır. MSF (Magnitude Scaling Factor) olarak tanımlanan bu düzeltme katsayısı, CRR ve CSR arasında kurulan oransal büyüklüğe aşağıdaki gibi etkide bulunmaktadır.

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) MSF \quad (3.14)$$

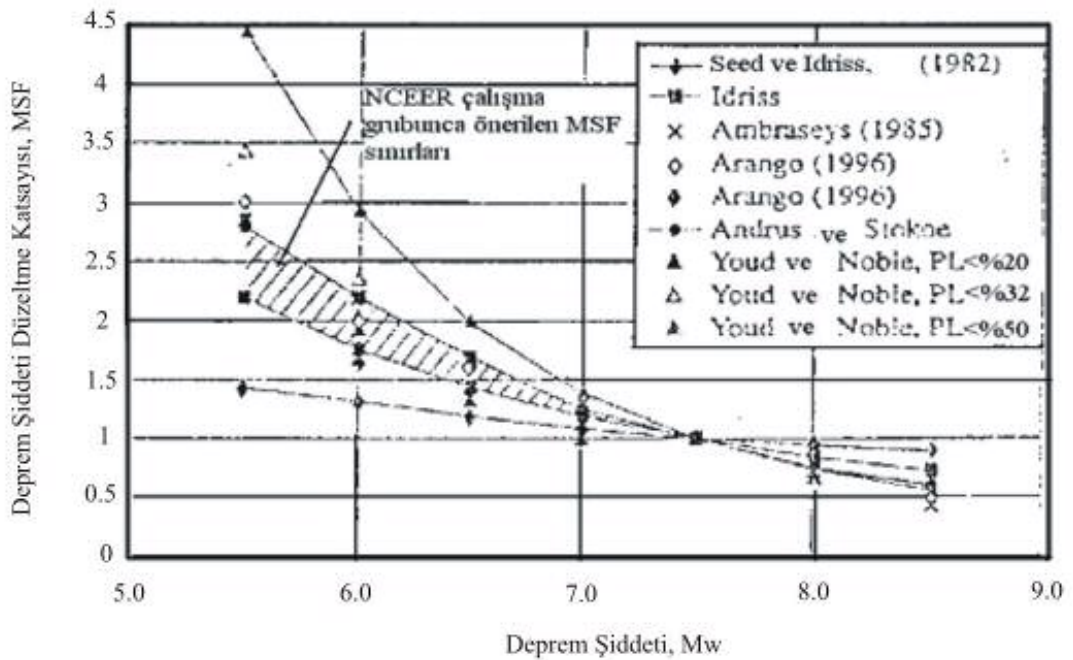
(FS: Factor of Safety, Güvenlik Faktörü)

Değişik araştırmacılar farklı zamanlarda deprem şiddeti etkisini inceleyebilmek için çalışmalar yapmıştır. Seed ve Idriss (1982) tarafından ortalama tekrarlı yükleme sayısı ile deprem şiddeti arasında bir bağıntı kurulmuş, bu bağıntı daha sonra Idriss tarafından revize edilmiştir. Bu bağıntı, laboratuvarda yapılan tekrarlı basit kayma gerilmesi deney sonuçlarına ve şiddetli yer sarsıntısı kayıtlarından elde edilen *Denk Tekrar Sayısı* hesaplamalarına dayanmaktadır.



Şekil 3.8 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR) ile sıvılaşma yol açan tekrar sayısı arasındaki ilişki, (Youd ve Idriss, 2001)

Verilen bir CSR değeri için sıvılaşmayı başlatacak tekrar sayısı laboratuvarda ölçülmüş ve değişik şiddetteki depremler için ortalama tekrar sayıları işlenmiştir (Şekil 3.8). Şekil 3.8’de görüldüğü gibi 15 tekrar sayısı 7.5 şiddetindeki bir depreme eşdeğer alınmaktadır. Birçok araştırmacı laboratuvar deneyleri ve/veya arazide tespit edilen davranış biçimleri üzerinde farklı yöntemler kullanarak değişik sonuçlara ulaşmıştır. Bu önerilerin tümü aşağıda verilen Şekil 3.9 ve Çizelge 3.6’da özetlenmektedir.



Şekil 3.9 MSF grafiği, (Youd ve Noble, 1997)

Çizelge 3.6 Deprem şiddeti düzeltme katsayısı araştırma sonuçları,
(Youd ve İdriss, 2001)

Deprem Şiddeti (M)	Seed ve Idriss (1982)	Idriss	Ambraseys (1988)	Arango (1996)		Andrus ve Stokoe (1997)	Youd ve Noble (1997b)		
				Distance Based	Energy Based		$P_L < 20\%$	$P_L < 32\%$	$P_L < 50\%$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
5.5	1.43	2.20	2.86	3.00	2.20	2.80	2.86	3.42	4.44
6.0	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
7.0	1.08	1.19	1.30	1.25	1.10	1.25	1.00	1.20	1.00
7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-	0.73(*)
8.0	0.94	0.84	0.67	0.75	0.85	0.8?	-	-	0.56(*)
8.5	0.89	0.72	0.44	-	-	0.65?	-	-	

“NCEER 1996, 1998 Summary Report” kararlar kısmında mühendislik uygulamalarında kullanılması tavsiye edilen MSF Çizelge değerleri şunlardır:

Deprem şiddeti < 7.5 ise; (3) no’lu kolonda Idriss tarafından revize edilmiş yeni MSF değerleri ile (7) no’lu kolonda Andrus ve Stokoe tarafından verilmiş olan değerler, alt ve üst sınır değerler olarak kullanılmalıdır.

Deprem şiddeti > 7.5 ise; yüksek şiddeti baz alan deprem incelemelerindeki güvenilirlik nedeni ile (3) no’lu kolondaki Idriss tarafından revize edilmiş yeni MSF değerleri kullanılmalıdır.

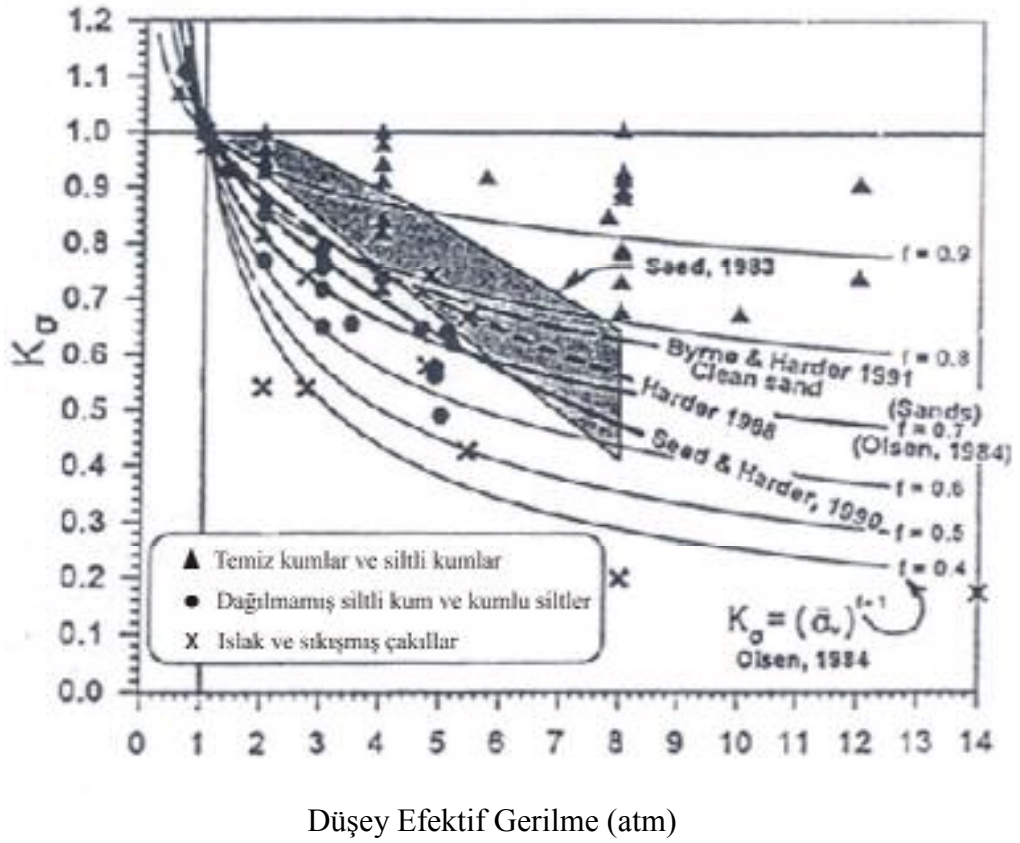
3.2.4 Yüksek Efektif Basınç Değerleri için Düzeltme Faktörünün Bulunması (K_σ)

Daha önce söz edildiği gibi (madde 3.2.2/2); efektif gerilmenin 1 atmosferlik referans basınç cinsinden normalize edilmesinde kullanılan “*Basitleştirilmiş Yöntem*” ancak düşük basınç değerlerinde (15 m’den daha az derinliklerde) geçerliliğini korumaktadır.

Efektif basınç değerinin artması ile yükselen CRR değeri arasındaki lineer olmayan ilişki, efektif basıncın 1 atmosferden (100 kPa) büyük olduğu durumlar için tanımlanan bir düzeltme faktörü (K_σ) ile hesaplanmaya çalışılmıştır.

Seed (1983) K_σ için bir eğri tanımlamış, daha sonra araştırmacılar bu çalışmayı eklentiler yaparak geliştirmişlerdir. Bunlardan Seed ve Harder (1990) tarafından temiz-kumlar için geliştirilen K_σ eğrisinin kullanımı “NCEER 1996, 1998 Summary Report” kararlar kısmında tavsiye edilmektedir.

* çok belirsiz değerler



Düşey Efektif Gerilme (atm)

Şekil 3.10 Derlenmiş K_σ eğrileri, (Youd ve İdriss, 2001)

K_σ eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan temel denklem aşağıdaki gibidir;

$$K_\sigma = (\sigma'_v / P_a)^{(f-1)} \quad (3.15)$$

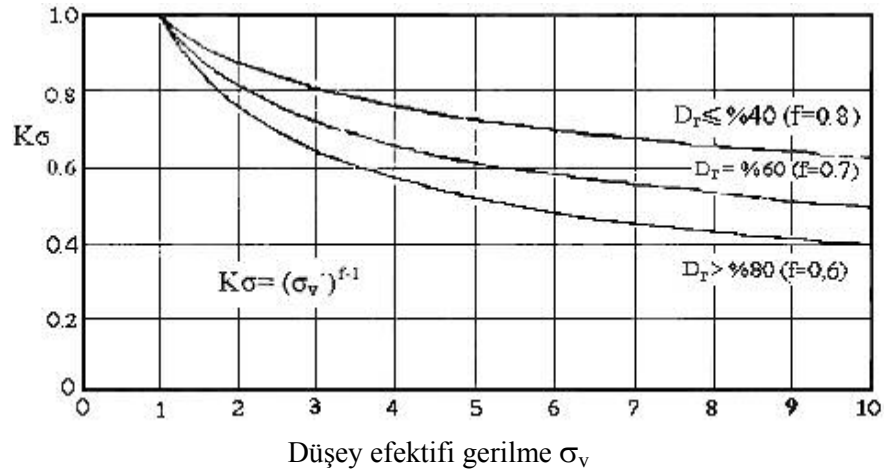
Burada;

σ'_v : Atmosfer basıncı cinsinden efektif basınç

P_a : 1 atmosfer

f: Rölatif yoğunluk (D_r) ve konsolidasyon yaşı gibi etkilere bağlı olarak arazi şartlarını temsil eden üstel sayıdır.

NCEER çalışma grubunun önerdiği ve K_σ düzeltme faktörünün, rölatif yoğunluğa bağlı olarak efektif basınçla olan değişimi Şekil 3.11'de özetlenmektedir.



Şekil 3.11 $K\sigma$ - σ_v ' değişimi, (Youd ve Idriss, 2001)

1 atmosferden yüksek efektif basınç değerleri için Şekil 3.11 kullanılarak rölatif yoğunluğa bağlı olarak $K\sigma$ yüksek efektif basınç düzeltme katsayısı tayin edilmektedir.

3.2.5 Sonuç

İncelenen zemindeki sıvılaşma potansiyeli temel olarak; sıvılaşma dayanımının, sıvılaşmaya yol açacak sismik etkiye oranı şeklinde bir güvenlik faktörü (FS: Factor of Safety) ile tanımlanmaktadır. MSF ve $K\sigma$ bu orana aşağıdaki gibi girmektedir:

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) MSF \cdot K\sigma \quad (3.16)$$

CSR : Tekrarlı kayma gerilmesi oranı

$CRR_{7.5}$: Eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranı

MSF : Deprem şiddetini düzeltme faktörü

$K\sigma$: Yüksek efektif basınç değerleri için düzeltme faktörü

Sonuç olarak elde edilen oransal sayı ≤ 1 ise Sıvılaşma oluşacaktır

> 1 ise Sıvılaşma oluşmayacaktır.

3.3 Yeni SPT Tabanlı Sıvılaşma Bağlılıları ve Kullanma Yöntemi (Çetin ve Seed, 2000, 2001)

Burada Çetin vd., (2000) ile Seed vd., (2001) tarafından yeni geliştirilen sıvılaşma yöntemi anlatılmıştır. Bu yeni yöntemde verilen bağıntılar sayesinde daha önceki çalışmalara kıyasla sıvılaşma tahminlerinde daha az belirsizlikle sonuç tahmin edilebilmektedir.

Seed vd., (1984, 1985) tarafından önerilen deterministik bağıntı mühendislik uygulamalarında

sıkça kullanılsa da, 1984 sonrası meydana gelmiş depremlerden elde edilmiş arazi inceleme sonuçlarından ve yeni teorik çalışmalardan öğrendiklerimizi içermemesi bakımından eskimiştir. Bu bağıntının geliştirildiği yıllarda, son zamanlarda deprem hesaplamalarında kullanılmaya başlanan yüksek sarsıntı değerlerine sahip ($CSR_N > 0.25$) çok az sayıda örnek bulunmaktaydı. Dolayısı ile veri tabanı zayıf olan bu çalışma daha çok mühendislik kanısı kullanılarak geliştirilmiştir.

Çetin vd., (2000) mevcut veri tabanına kalite standartlarını sağlayan arazi veri örnekleri eklemişlerdir. Yeni çalışmanın diğer çalışmalardan temel farkı şu şekilde özetlenebilir:

- Genişletilmiş bir deprem sonrası arazi davranış örnekleri veri tabanı oluşturulmuştur.
- SPT verisini etkileyecek faktörlerin anlaşılmasına yönelik yeni bilgiler kullanılmıştır (düzeltme faktörleri yenilenmiştir).
- Araziye özel dinamik zemin davranışının anlaşılmasına yönelik yeni bilgi ve yöntemler çalışmaya dahil edilmiştir (örneğin deprem fay kırılma yönü, dinamik arazi davranış analizleri, v.b).
- Tekrarlı arazi kayma gerilme oranının bulunmasında geliştirilmiş yeni yöntemler kullanılmıştır (yeni r_d kütle kayma katsayısının kullanılması gibi).
- Geliştirilen bir veri kalitesini belirleme yöntemi ile veri kalitesi hesaplanmış ve iyi çalışılmamış belirsiz örnekler veri tabanından çıkarılmıştır.
- Baye'in parametre güncelleştirme yöntemi kullanılarak bu sayede; a) sıvılaşma problemini tanımlayan daha çok sayıda değişken kullanılabilmiş, b) değişik belirsizlik kaynaklarının modellenmesine olanak tanınmıştır.

Bu çalışma aynı zamanda;

- ✓ Deprem şiddetine bağlı süre düzeltme faktörü,
- ✓ İnce daneli malzeme içeriğinin sıvılaşma direncine etkisi,
- ✓ Kayma direncinin efektif gerilme ile doğrusal olmayan bağıntısı gibi bazı tartışmalı konulara da açıklamalar getirmektedir.

3.3.1 Arazi Denk Üniform Tekrarlı Gerilme Oranının (CSR_{denk}) Hesaplanması

Temel olarak yaklaşımlarda; fay atım yönünün etkisi, arazi özelliklerinin davranışa olan etkisi, geliştirilmiş sönümlenme bağıntıları ve yeni depremlerden elde edilen kuvvetli yer hareketi kayıtları gibi yeni gelişmeler kullanılmaktadır (Kullanılan veriler sıvılaşma olasılığının tahmin edilmesinde kullanılan temel yaklaşımdan (Seed vd., 1984, 1985)

bağımsız olarak her yöntemde kullanılabilir kaynaklardır ve temel yaklaşıma katkı niteliğindedir). Bilindiği gibi Seed ve Idriss (1971) tarafından tekrarlı kayma gerilmesi oranı aşağıdaki basitleştirilmiş yöntem ile verilmiştir:

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma_v') = 0.65 (a_{mak} / g) (\sigma_v / \sigma_v') r_d \quad (3.17)$$

Yeterli zemin verisi ve kuvvetli yer hareketi kaydı varsa denk doğrusal yöntem kullanılarak (Shake, 1990; Idriss ve Sun, 1992) CSR_{denk} değerleri elde edilebilir. Ancak bunun mümkün olmadığı durumlarda üniforma denk tekrarlı gerilme oranı;

$$CSR_{denk} = 0.65 \cdot CSR_{mak} \quad (3.18)$$

denklemini aynen kullanılarak elde edilmelidir.

Yeni yöntemdeki temel farklılık r_d gerilme düzeltme katsayısının (veya doğrusal olmayan kütle kayma katsayısının) bulunmasına yöneliktir. Önerilen çalışma biçimi hem yeni r_d değerlerini hem de arazi ve sarsıntıya özel sismik davranış analizlerinin kullanılmasıdır. O halde tekrarlı kayma gerilme oranının tayini için işlem sırası şöyle olabilir:

- 1) Arazi ve sarsıntı özelliklerine uygun sismik analiz yöntemleri ile her derinlik için maksimum yatay yer ivmesi bulunur (a_{mak}).
- 2) Yeni r_d değerleri; derinliğe (d), deprem büyüklüğüne (M_w), sarsıntı şiddetine, maksimum yer inmesine (a_{mak}) ve arazi rijitliğine ($V_{s, 40'}$: 40 feet'teki yani 12 metredeki zemin ortalama kayma dalga hızının feet/saniye biriminden ifadesi) bağlı olarak aşağıdaki Denklem 3.19'dan veya bu değişkenlere göre 12 alt gruba ayrılmış Şekil 3.12'den bulunur.

$d < 65$ ft

$$r_d(d, M_w, a_{mak}, V_{s, 40'}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{mak} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s, 40'}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104 \cdot (-d + 0.0785 \cdot V_{s, 40'}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{mak} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s, 40'}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104 \cdot (0.0785 \cdot V_{s, 40'}^* + 24.888)}} \right]} \pm \sigma_{\varepsilon r_d} \quad (3.19)$$

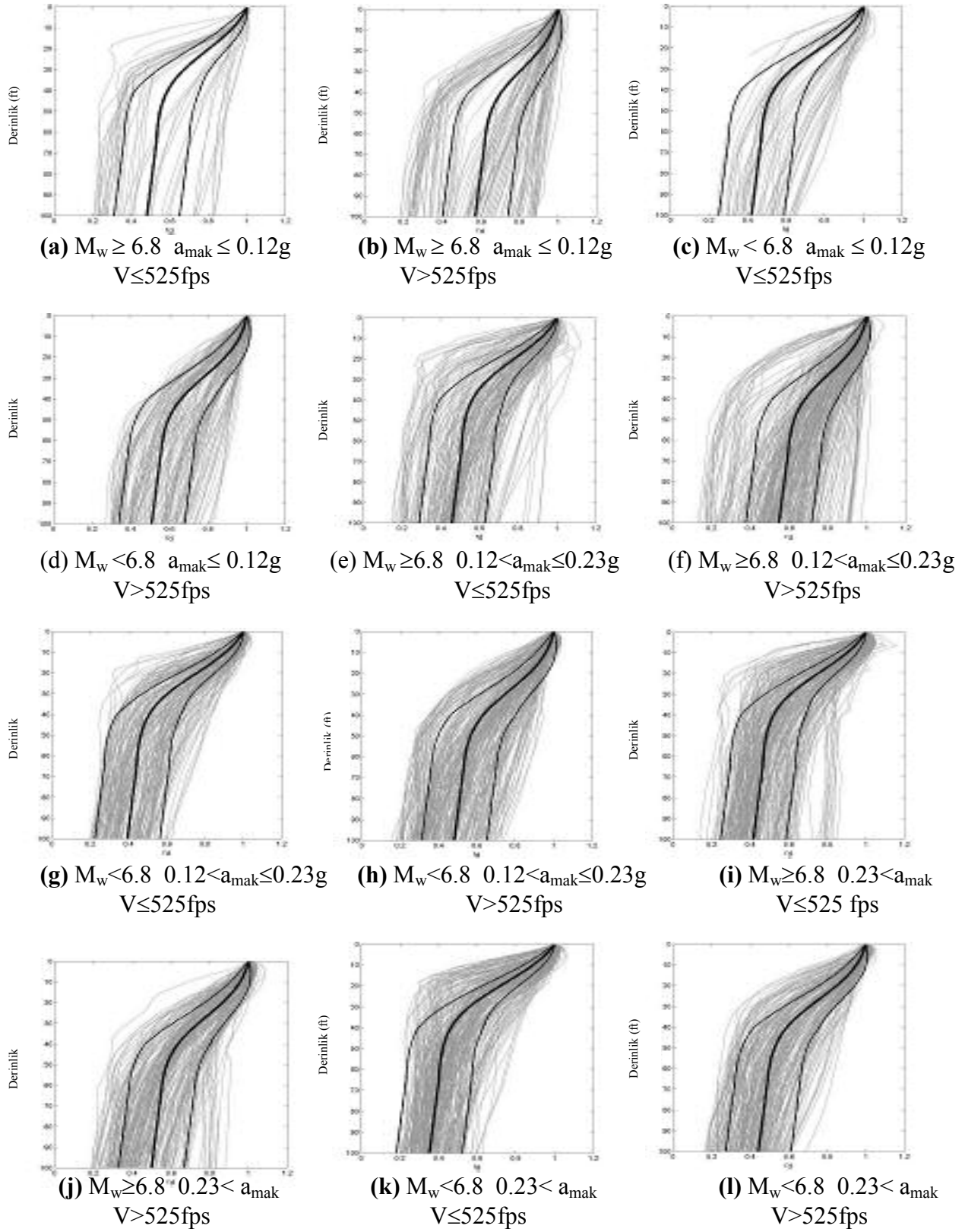
$d > 65$ ft

$$r_d(d, M_w, a_{mak}, V_{s, 40'}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{mak} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s, 40'}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104 \cdot (-65 + 0.0785 \cdot V_{s, 40'}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{mak} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s, 40'}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104 \cdot (0.0785 \cdot V_{s, 40'}^* + 24.888)}} \right]} - 0.0014 \cdot (d - 65) \pm \sigma_{\varepsilon r_d}$$

$d < 40$ ft

$$\sigma_{\varepsilon r_d}(d) = d^{0.850} \cdot 0.0072$$

$$d \geq 40 \text{ ft} \quad \sigma_{\varepsilon_{r_d}}(d) = 40^{0.850} \cdot 0.0072$$



Şekil 3.12 r_d gerilme dağılımı düzeltme katsayısı, (Çetin ve Seed, 2004)

3) Bulunan yeni r_d değerleri aşağıdaki denklemde yerine konularak her derinlik için CSR_{mak} elde edilir.

$$CSR_{mak} = (a_{mak} / g) (\sigma_v / \sigma_v') r_d \quad (3.20)$$

4) Bulunan CSR_{mak} değerleri aşağıdaki denklemde yerine konularak her derinlik için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranı CSR_{denk} bulunur.

$$CSR_{denk} = 0.65 CSR_{mak} \quad (3.21)$$

3.3.2 Tekrarlı Kayma Gerilmesi Dayanımının Bulunması (CRR)

Bu çalışmada; yeni bir veri tabanı oluştururken yapılan arazi deneylerinde her örnek için kritik tabaka olarak adlandırılan, sıvılaşmaya en uygun tabaka tespit edilmeye çalışılmaktadır. Kritik tabakalarda kaydedilen N değerleri düşey gerilme, enerji, ekipman ve prosedür farklılıkları için düzeltilerek $(N)_{1-60}$ değerleri elde edilmektedir. Birçok durumda kritik tabaka içinde bir alt tabakada ölçülen N değeri diğerlerinden bariz şekilde düşük çıktığından, bu durumlarda zemin tabakasının tamamı değil belirlenen alt tabaka kritik tabaka olarak seçilmektedir. Tabakayı açıkça temsil etmediği görülen ve anormal olarak algılanan yüksek $(N)_{1-60}$ değerleri elenmekte, geriye kalan düzeltilmiş $(N)_{1-60}$ değerleri kullanılarak kritik tabakayı temsil edecek bir ortalama $(N)_{1-60}$ değeri ile standart sapma hesaplanmaktadır.

1. Düşey efektif gerilme düzeltmesi

Daha önce belirtildiği üzere tüm N değerleri düşey gerilme durumları için düzeltilmekte ve 1 atm'lık efektif düşey gerilme altında ölçüleceği varsayılan N_1 değerine aşağıdaki denklem kullanılarak çevrilmektedir:

$$N_1 = N \cdot C_N \quad (3.22)$$

C_N : Liao ve Whitman (1986) tarafından önerilen düzeltme katsayısı olup;

$$C_N = (P_a / \sigma_v')^{0.5} \quad (3.23)$$

denkleminde bulunmaktadır. Burada σ_v' ; arazide kritik tabakanın orta noktasındaki mevcut düşey efektif gerilmenin atmosfer cinsinden birimidir.

2. Kısa tij düzeltmesi (C_R)

Bu çalışmada kullanılan düzeltme katsayıları aşağıdaki Çizelge 3.7'de özetlenmektedir.

Çizelge 3.7 Sondaj tij uzunluğu düzeltmesi, (Çetin, 2002)

C_R	Tij uzunluğu düzeltme faktörü	
	3 - 4 m.	0.75
	4 - 6 m.	0.85
	6 - 10 m.	0.95
	10 - 30 m.	1.00
	> 30 m.	< 1.00

3. Standart olmayan numune alıcı düzeltmesi (C_S)

Numune alıcıda membran boşluğunun öngörüldüğü ancak membranın yerleştirilmediği durumlarda düzeltme gerekmektedir (yerleştirildiyse $C_S=1$). Membransız numune alıcılarda, SPT değerindeki düşme gevşek malzemeler ($N_1 < 10$) için %10, sıkı malzemeler için ise %30 seviyelerinde olmaktadır ve C_S katsayısı 1.1 ile 1.3 arasında değişmektedir. Bu değer aşağıdaki ifadeden hesaplanmaktadır;

$$C_S = 1 + N_{160}/10 \quad (3.24)$$

4. Sondaj çap düzeltmesi (C_B)

Sondaj çap düzeltme katsayısı C_B , NCEER çalışma grubu önerilerinde olduğu gibi kullanılmaktadır. Buna göre aşağıdaki Çizelge 3.8'den tespit edilmektedir.

Çizelge 3.8 Sondaj deliği çapı düzeltmesi, (Çetin, 2002)

C_B	Sondaj deliği çapı düzeltme faktörü	
	65 - 115 mm	1.00
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15

5. Tokmak enerji verim düzeltmesi (C_E)

Tokmak enerji düzeltme katsayısı çoğu durumda oldukça önemli farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada bu katsayı NCEER çalışma grubu önerileri paralelinde kullanılmakta, ancak tokmak sistemi özel enerji verisi elde edilebildiği yani; SPT numune alıcısına aktarılan enerjinin ölçüldüğü veya tokmak kaldırma ve bırakma sisteminin belli olduğu ya da kalibre edildiği durumlarda, elde edilen değerler tercih edilmektedir. Bu değerler Çizelge 3.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 3.9 Enerji verimi düzeltmesi, (Çetin, 2002)

C_E	E_R (Enerji oranı) SPT çekicinden numune alıcıya iletilen enerjinin yüzde cinsinden oranı En iyi yaklaşım her darbede iletilen enerjiyi doğrudan ölçmektir. Mümkün olduğu yerde doğrudan ölçümler yapılmıştır. Bir sonraki yaklaşım daha önceden doğrudan enerji ölçümlerine göre kalibre edilmiş bir çekiç ve mekanik çekiç kaldırma sistemi kullanmaktır. Aksi halde E_R tahmin edilmeli. İyi arazi uygulaması, ekipman ve izleme koşullarında aşağıdaki ölçütler kullanılabilir: <table><tr><td><u>Ekipman</u></td><td><u>Tahmini E_R (***)</u></td><td><u>C_E (***)</u></td></tr><tr><td>-Safety Şahmerdan^(*)</td><td>0.4 – 0.75</td><td>0.7 – 1.2</td></tr><tr><td>-Donut Şahmerdan^(*)</td><td>0.3 – 0.6</td><td>0.5 – 1.0</td></tr><tr><td>-Donut Şahmerdan^(**)</td><td>0.7 – 0.85</td><td>1.1 – 1.4</td></tr><tr><td>-Automatic-Trip Şahmerdan (Donut veya Safety)</td><td>0.5 – 0.8</td><td>0.8 – 1.4</td></tr></table> Daha düşük kalitede arazi çalışması(düzensiz çekiç düşme mesafesi, çekicinin çubuk üzerinde aşırı sürtünmesi, kedi kafasına bağlı ıslak veya yıpranmış halat v.b.) olduğu durumlarda ayarlamalar yapılmalıdır.	<u>Ekipman</u>	<u>Tahmini E_R (***)</u>	<u>C_E (***)</u>	-Safety Şahmerdan ^(*)	0.4 – 0.75	0.7 – 1.2	-Donut Şahmerdan ^(*)	0.3 – 0.6	0.5 – 1.0	-Donut Şahmerdan ^(**)	0.7 – 0.85	1.1 – 1.4	-Automatic-Trip Şahmerdan (Donut veya Safety)	0.5 – 0.8	0.8 – 1.4
<u>Ekipman</u>	<u>Tahmini E_R (***)</u>	<u>C_E (***)</u>														
-Safety Şahmerdan ^(*)	0.4 – 0.75	0.7 – 1.2														
-Donut Şahmerdan ^(*)	0.3 – 0.6	0.5 – 1.0														
-Donut Şahmerdan ^(**)	0.7 – 0.85	1.1 – 1.4														
-Automatic-Trip Şahmerdan (Donut veya Safety)	0.5 – 0.8	0.8 – 1.4														

* Halatlı makara sistemi, halat, makara etrafında iki tur atar, normal düşürme (Japonların “atma” yöntemi değil), halat ıslak veya aşırı yıpranmış değil.

** Özel Japon “atma” düşürmeli yöntemi, halatlı makara sistemi. (****’e bakınız.)

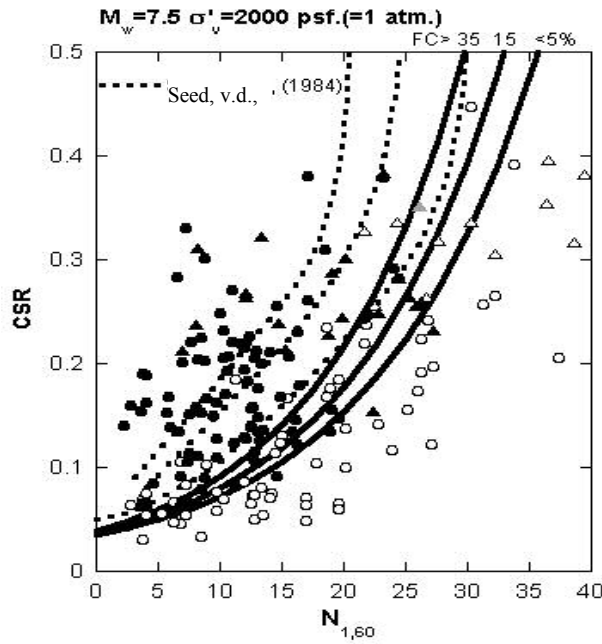
*** Gösterilen aralık için, aralığın üçte birinin ortasına düşen değerler diğerlerinden daha yaygındır, fakat eğer ki ekipman ve/veya izleme metotları iyi değilse E_R ve C_E gösterilen aralıktan daha fazla değişebilir.

**** Yaygın Japon SPT uygulaması, delik çapı ve SPT vuruş sıklığı için ilave düzeltmeler gerektirir. Tipik Japon halatlı makara sistemi, donut şahmerdanı ve Japon “atma” düşürme yöntemi için toplam $C_B \times C_E$ çarpımı 1.0 ile 1.3 değerleri arasındadır.

3.3.3 İnce Taneli (Siltli-Killi) Malzemeler için Düzeltmeler

Enerji, prosedür ve düşey gerilme düzeltmeleri uygulanmış N değerleri; ince daneli (siltli-killi) malzemelerin hem ölçülen N değerine hem de sıvılaşma direncine etkilerini hesaba katmak ve temiz kumda ölçüleceği varsayılan değere ($N_{C_{1,60,CS}}$) normalize etmek amacına yönelik olarak “ince dane – oran” düzeltmesi uygulanmaktadır.

$$N_{1,60,CS} = N_{1,60} C_{ince-dane} \quad (3.25)$$



Şekil 3.13 $M_w=7.5$ ve $\sigma'_v=1.0$ atm için deterministik SPT tabanlı sıvılaşma sınır eğrileri ve ince dane düzeltmesi, (Çetin ve Seed, 2004)

Önerilmekte olan “ince-dane” düzeltmesi Baye parametre yenileme analiz sonuçlarına dayandırılmaktadır. Buna göre ince dane düzeltme katsayısı silt ve daha ince malzeme oranı %5’den daha az olduğu durumlarda 1 değerini almakta, %35 ve daha fazla olduğu durumlarda ise maksimum değerine ulaşmaktadır. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi en yüksek ince dane düzeltmesi N_{160} değeri +6 tokmak/30 cm artırımına karşılık gelmektedir ($FC \geq \%35$ ve CSR’ın yüksek değerlerinde). Yine Şekil 3.13’de vurgulandığı üzere önerilen en yüksek ince dane düzeltmesi, Seed vd., (1984) önerdiği en yüksek değer olan +9.5’den daha küçüktür. Önerilen $C_{ince-dane}$ düzeltme değeri aşağıda verilen denklemden bulunmaktadır.

$$C_{ince-dane} = (1 + 0.004.FC) + 0.05\left(\frac{FC}{N_{1,60}}\right) \quad (3.26)$$

limit $FC \leq 35\%$, $N_{1,60}$ 'nin birimi tokmak/30cm

Bu bağıntıda FC, 0.074 mm çaptan daha küçük malzemenin kuru ağırlığının yüzdesel ifadesidir ve de tamsayı olarak kullanılmaktadır (örneğin %15 ince dane oranı için, 15 olarak denkleme girilmektedir).

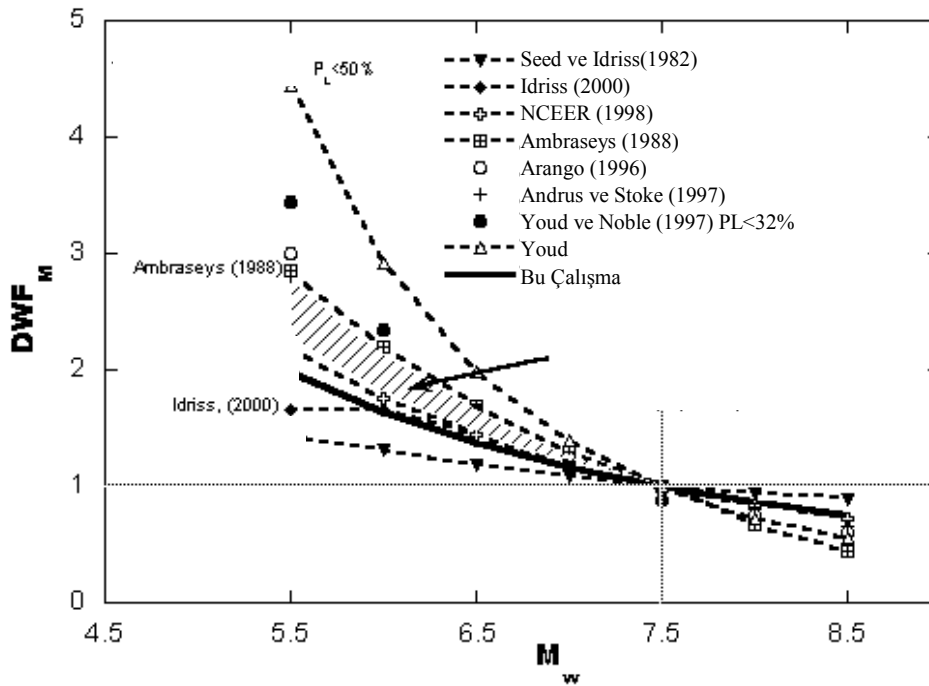
3.3.4 Deprem Büyüklüğü Bağıntılı Süre Düzeltmesi

Deprem büyüklüğüne bağlı olarak CSR değerlerinin 7.5 şiddetindeki bir depremin üreteceği ortalama süreye çevrilmesi (CSR_N, denk üniform tekrarlı gerilme oranının ya da denk tekrar sayısının bulunması) şeklinde aşağıdaki bağıntıdan bulunmaktadır.

$$CSR_N = CSR_{\text{denk}, M=7.5} = CSR_{\text{denk}} / DWF_M \quad (3.27)$$

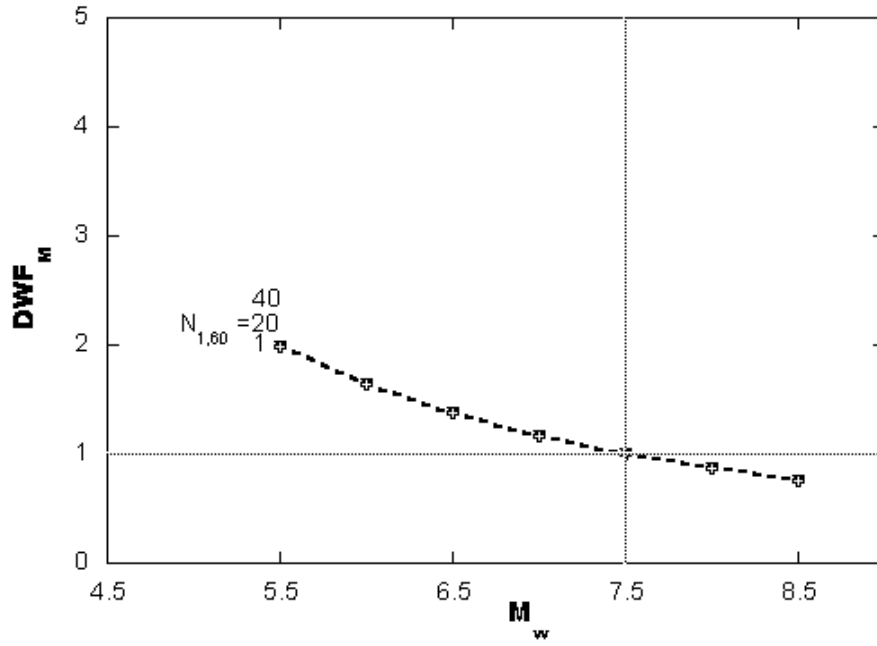
$CSR_{\text{denk}, M=7.5}$; Daha önce hesaplanan arazi denk üniform tekrarlı gerilme oranı

DWF_M ; Deprem şiddeti ile bağıntılı süre düzeltme katsayısı (Şekil 3.14'den bulunmaktadır)



Şekil 3.14 Deprem büyüklüğüyle orantılı süre düzeltme katsayısı, (Çetin ve Seed, 2004)

Çetin vd., tarafından bu çalışmalarda süre düzeltme katsayısı Baye'in yenileme analiz yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Ayrıca bu katsayının yoğunlukla ($N_{1,60}$ değeri ile) olan bağıntısı sorgulanmış ancak değişimin göreceli olarak önemsiz olduğu saptanmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 DWF_M ve yoğunluk ($N_{1,60}$ değeri) ilişkisi, (Çetin ve Seed, 2004)

Şekil 3.14’de bu çalışmada özetlenen süre düzeltme katsayısının deprem şiddeti ile değişimi görülmektedir. Koyu çizgi ile ifade edilmiş bu değerler NCEER çalışma grubunca önerilen değerlerden bir parça düşük, Idriss (2000) tarafından önerilen değerlerden çok az fazladır.

3.3.5 Efektif Gerilme Düzeltmesi

Seed vd., tarafından verilen sıvılaşma sınır eğrileri her ne kadar $\sigma_v' = 1$ atm için önerilmekteyse de, bu değere bir normalizasyon yapılmamakta, sadece arazi davranış örneklerinin sığ derinlikleri temsil ettiği şeklinde bir açıklama sunulmaktadır. Ancak kullanılan veri tabanındaki örneklerin σ_v' ortalaması 0.65 atm olup bu değere karşılık gelen sıvılaşma sınır eğrilerinin 1 atm için önerilmesi emniyetsiz sonuçlar vermektedir.

Çetin vd., tarafından yapılan bu çalışmada; daha önce $N_I = N.C_N$ denklemi ile yapılan normalizasyon işlemi ek bir işlem olarak önerilmekte olup yukarıda belirtilen sorundan kaçınmak için efektif gerilmenin 1 atm’dan küçük ya da büyük olduğuna bakılmaksızın, tüm gerilmeler aşağıdaki denklem kullanılarak 1 atm efektif gerilme durumuna normalize edilmektedir.

$$CSR_{denk,M=7.5 \text{ 1atm}} = CSR_{denk,M=7.5} / K_\sigma \quad (3.28)$$

$$K_\sigma = (\sigma_v')^{f-1} \quad (3.29)$$

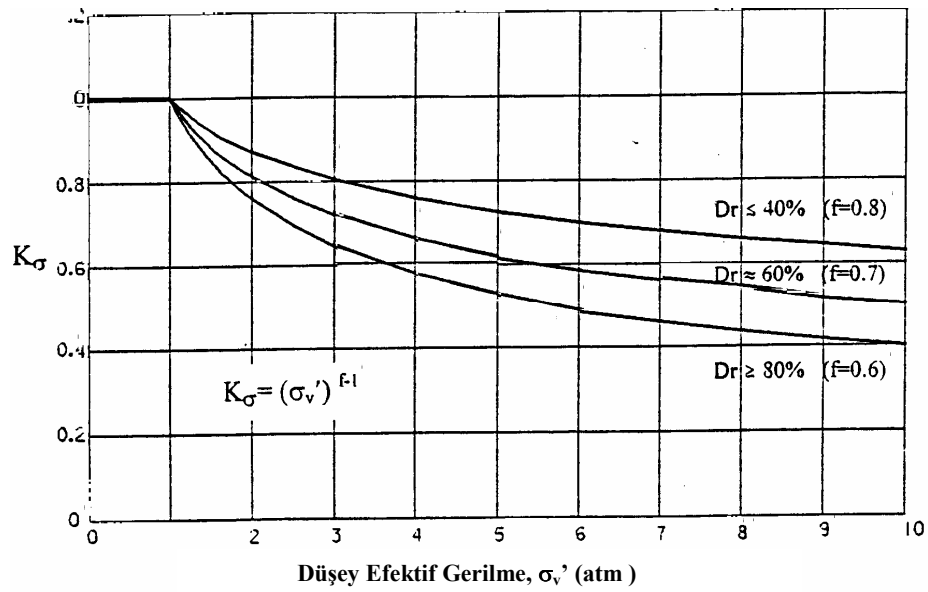
Denklem 3.29'da $f = 0.6 - 0.8$ arasında değişmektedir. Çalışmalar dahilinde önerilen K_σ düzeltme katsayısı $0.3 - 1.5$ atm aralığında geçerli olduğundan bu katsayının tayini için;

$\sigma_v' \leq 2$ atm için;

Denklem 3.29 (K_σ üst sınır değeri 1.5'tir)

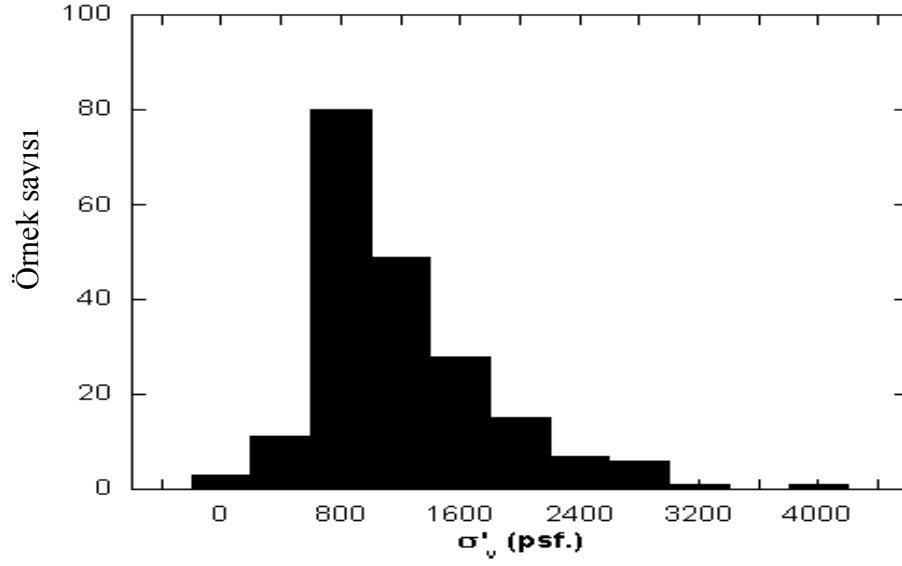
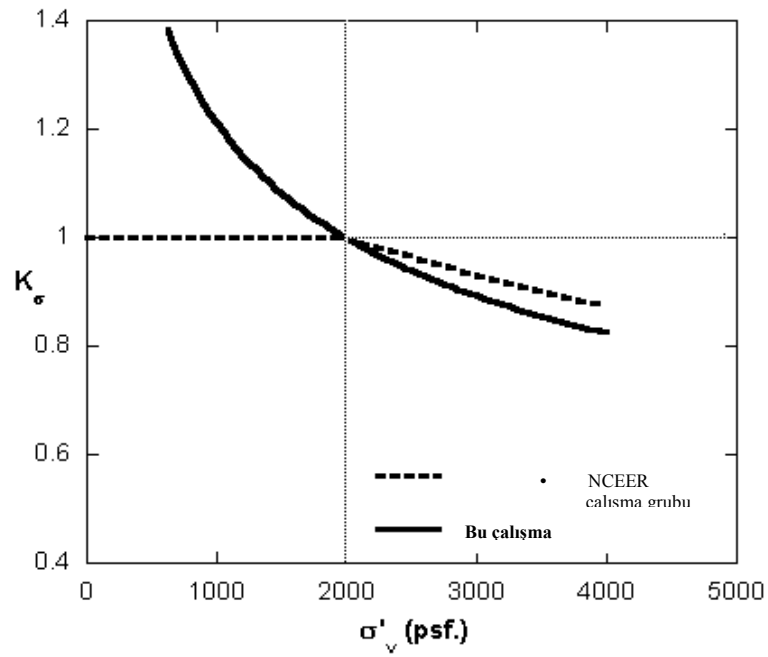
$\sigma_v' > 2$ atm için;

NCEER çalışma grubu tarafından önerilen biçimi ile Şekil 3.16'dan bulunmalıdır.



Şekil 3.16 K_σ önerisi (NCEER, 1997)

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.17 a-b) Çetin ve diğerleri tarafından önerilen K_σ değerlerinin NCEER çalışma grubu tarafından önerilen değerler ile karşılaştırması görülmektedir ($n=0.7$ ve $D_R \approx \%60$ için).

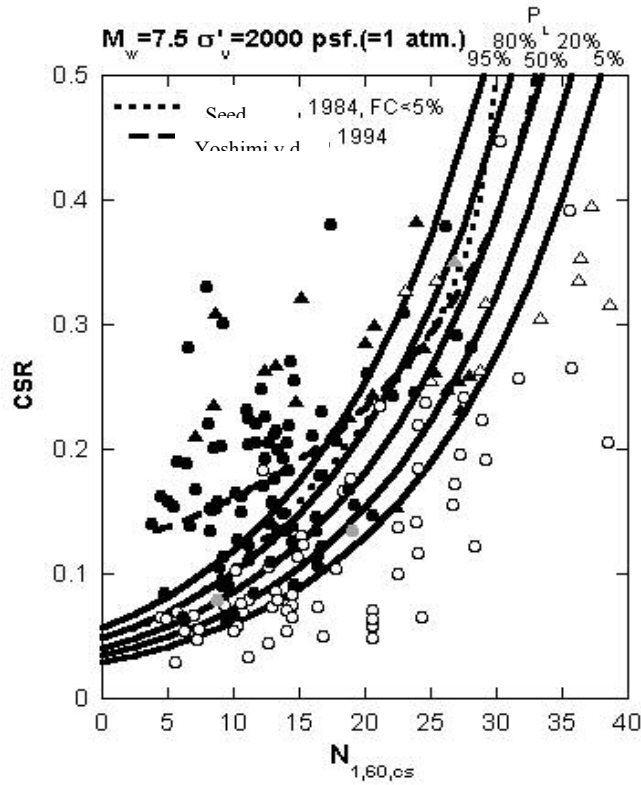
a) K_σ değerlerinin karşılaştırması

b) Çetin ve diğ., (2000) tarafından önerilen NCEER çalışma grubunca verilmiş K_σ değerleri
 Şekil 3.17 Çetin ve diğ., (2000) ve NCEER çalışma grubu karşılaştırması, $n = 0.7$, $D_R \approx 60\%$,
 (Çetin, 2002)

Yukarıdaki şekilde Çetin vd.'nin önerilen K_σ değerlerinin $\sigma'_v < 1$ atm için sabit=1 değerini almadığı görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi NCEER çalışma grubu K_σ efektif gerilme düzeltmesini $\sigma'_v > 1$ atm olduğunda kullanılmasını tavsiye etmektedir.

3.3.6 Yeni Bağıntıları Kullanarak Sıvılaşma Riskinin Olasılıksal Olarak Bulunması

Baye parametre yenileme analizi BUMP (Geykens vd.,1993) programı kullanılarak bu çalışmada hesaplanan CSR ve $N_{1,60}$ değerleri noktasal değerler olarak değil bir istatistiksel dağılım olarak modellenmekte ve bu değişkenlerdeki belirsizlikler de aynı anda modellemeye katılabilmektedir. Bu değişkenlere ek olarak silt ve kil muhtevası, deprem şiddeti ve düşey efektif gerilme de modelin diğer değişkenleri olarak seçilmektedir.



Şekil 3.18 $M_w=7.5$ ve $\sigma'_v=1.0$ atm. için olasılıksal SPT tabanlı sıvılaşma sınır eğrileri, ve temiz kumlar önerilen ilişki (Seed ve diğ., 1984)

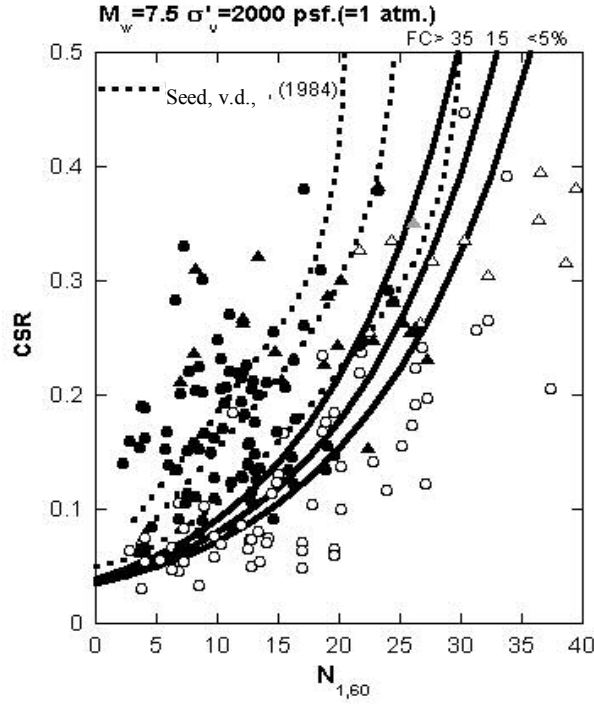
Daha önce ince dane düzeltmesi dahil tüm düzeltmeleri yapılmış olan penetrasyon direnci $N_{160,CS}$ ile, daha önce deprem şiddeti için süre düzeltmesi ve efektif gerilme düzeltmesi yapılmış olan CSR değeri Şekil 3.18'de yerine konularak sıvılaşma riski olasılıksal olarak bulunmaktadır.

$$CSR_{denk, M=7.5} = CSR_{denk} / DWF_M \quad (3.30)$$

$$CSR = CSR_{denk, M=7.5 \text{ 1atm}} = CSR_{denk, M=7.5} / K_\sigma \quad (3.31)$$

3.3.7 Yeni Bağıntıları Kullanarak Sıvılaşma Direncinin Deterministik Olarak Bulunması

İnce dane düzeltmesi hariç diğer tüm düzeltmeleri yapılmış olan penetrasyon direnci N_{160} ile deprem süresi ve efektif gerilme düzeltmesi uygulanmış $CSR = CSR_{denk, M=7.5, 1atm}$ değeri Şekil 3.19’da yerine konularak sıvılaşma direnci bulunmaktadır.



Şekil 3.19 $M_w=7.5$ ve $\sigma_v'=1.0$ atm için deterministik SPT tabanlı sıvılaşma sınır eğrileri, ince dane düzeltmesi, (Çetin, 2002)

Yukarıdaki şekilde ince malzeme içeriğine göre çizilmiş olan sıvılaşma sınır eğrileri, bir önceki Şekil 3.18’de %20 sıvılaşma riskine karşılık gelmektedir.

3.3.8 Yeni Bağıntıların Bütün Olarak Sunulduğu Denklemler Yardımı ile Sıvılaşma Riski ve Direncinin Bulunması

$$P_L(N_{1,60}, CSR, M_w, \sigma_v', FC) = \Phi \left(\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma_v') + 0.05 \cdot FC + 44.97 \right)}{2.70} \right) \quad (3.32)$$

Burada P_L ondalık sayı olarak (0.3–0.4 gibi) sıvılaşma olma olasılığı ve Φ standart kümülatif normal dağılımdır. Denklem 3.32’de, FC ondalık sayı (5.35 gibi) ve σ_v' psf birimindedir. Bilinen bir sıvılaşma olasılığı için tekrarlı dayanım oranı şu şekilde ifade edilmektedir:

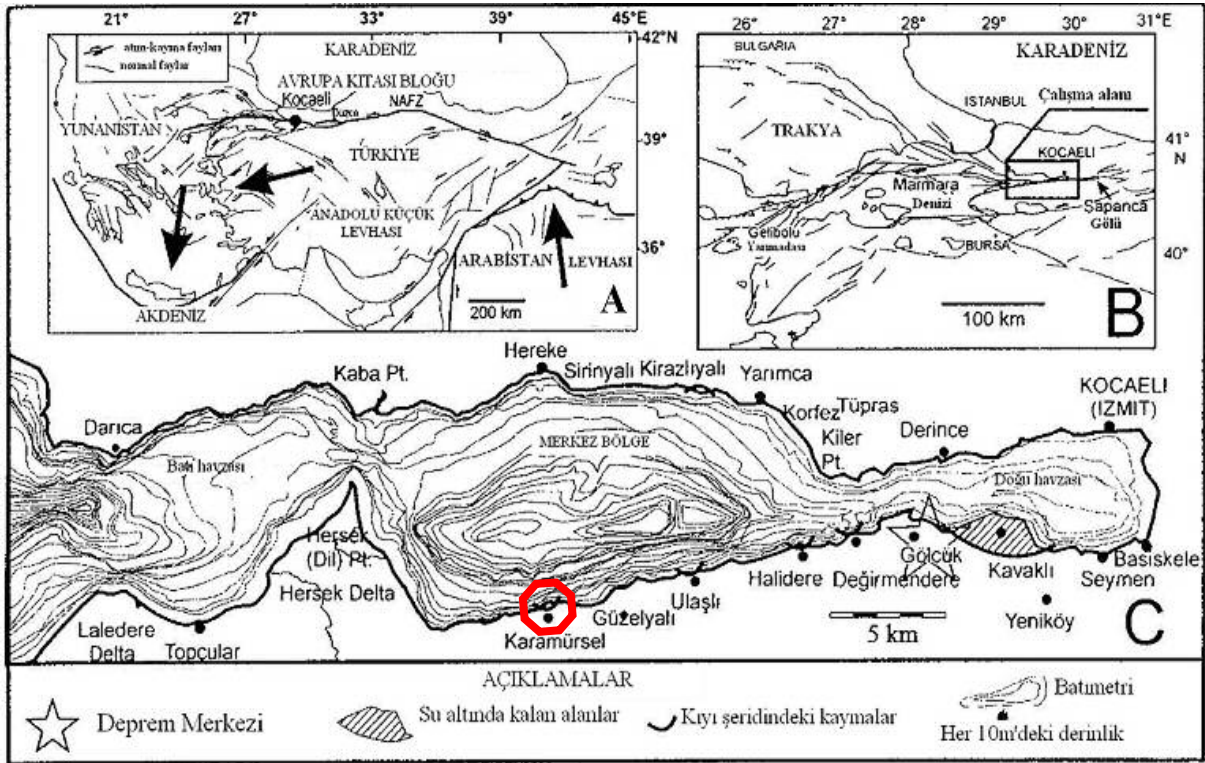
$$CRR(N_{1,60}, M_w, \sigma_v', FC, P_L) = \exp \left[\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) \right) - 3.70 \cdot \ln(\sigma_v') + 0.05 \cdot FC + 44.97 + 2.70 \cdot \Phi^{-1}(P_L)}{13.32} \right] \quad (3.33)$$

Bu denklemde $\Phi^{-1}(P_L)$ standart kümülatif normal dağılımın tersidir. (ortalama=0 ve standart sapma=1). Microsoft Excel’de bu fonksiyon “NORMINV(PL,0,1)” formülü ile elde edilmektedir.

4. UYGULAMA

4.1 Ereğli Balıkçı Limanı

Şekil 4.1’de görülen İzmit Körfezi’nin güney sahilinde yer alan Ereğli Balıkçı Limanı 1974 yılında inşa edilmiştir. 50 adet balıkçı teknesi demirleme kapasitesine sahiptir. Liman 210 metre uzunluğunda olan taş dolgu dalgakıranı, 75 metrelik bir rıhtıma ve 3.50 metre liman içi su derinliğine sahiptir (Şekil 4.2).



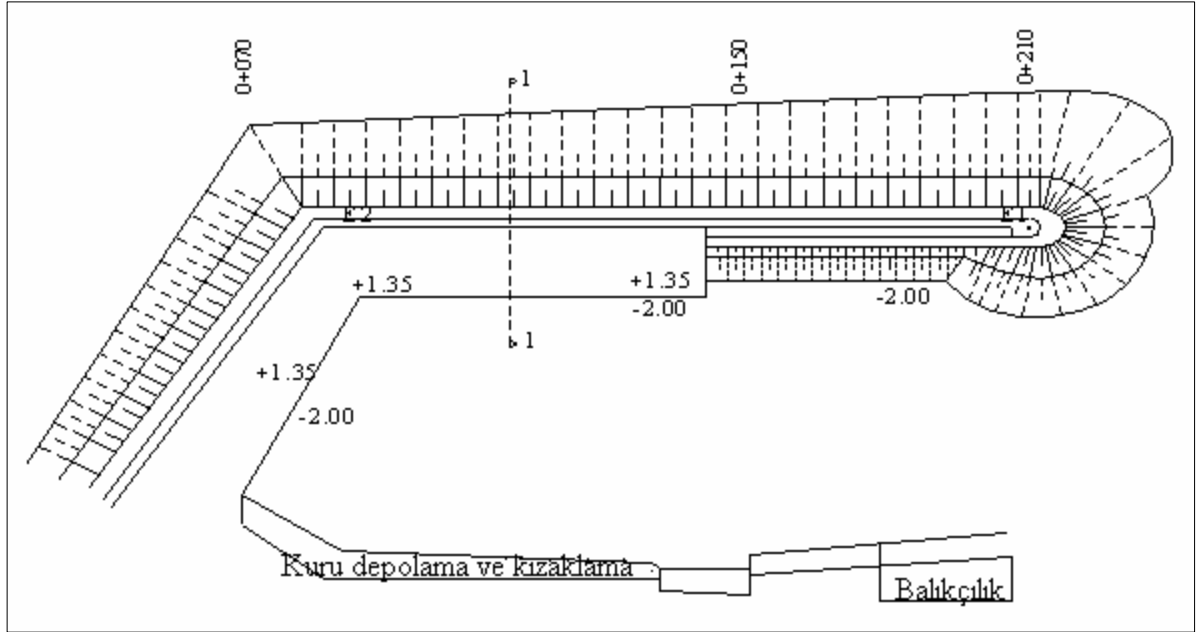
Şekil 4.1 Ereğli balıkçı limanı ve Doğu Marmara depremi etki bölgesi (Yüksel ve diğ.,2002)

Ocak taşının kullanıldığı dalgakıran, kaplama tabakası ve çekirdekten oluşmaktadır. Kaplama tabakası; %50 oranında 2-6 ton, %50 oranında 0.4-2 ton ağırlığında taşlardan meydana gelmektedir. Çekirdek ise; 0.05-0.2 ton arasında taşlar yer almaktadır (Şekil 4.3).

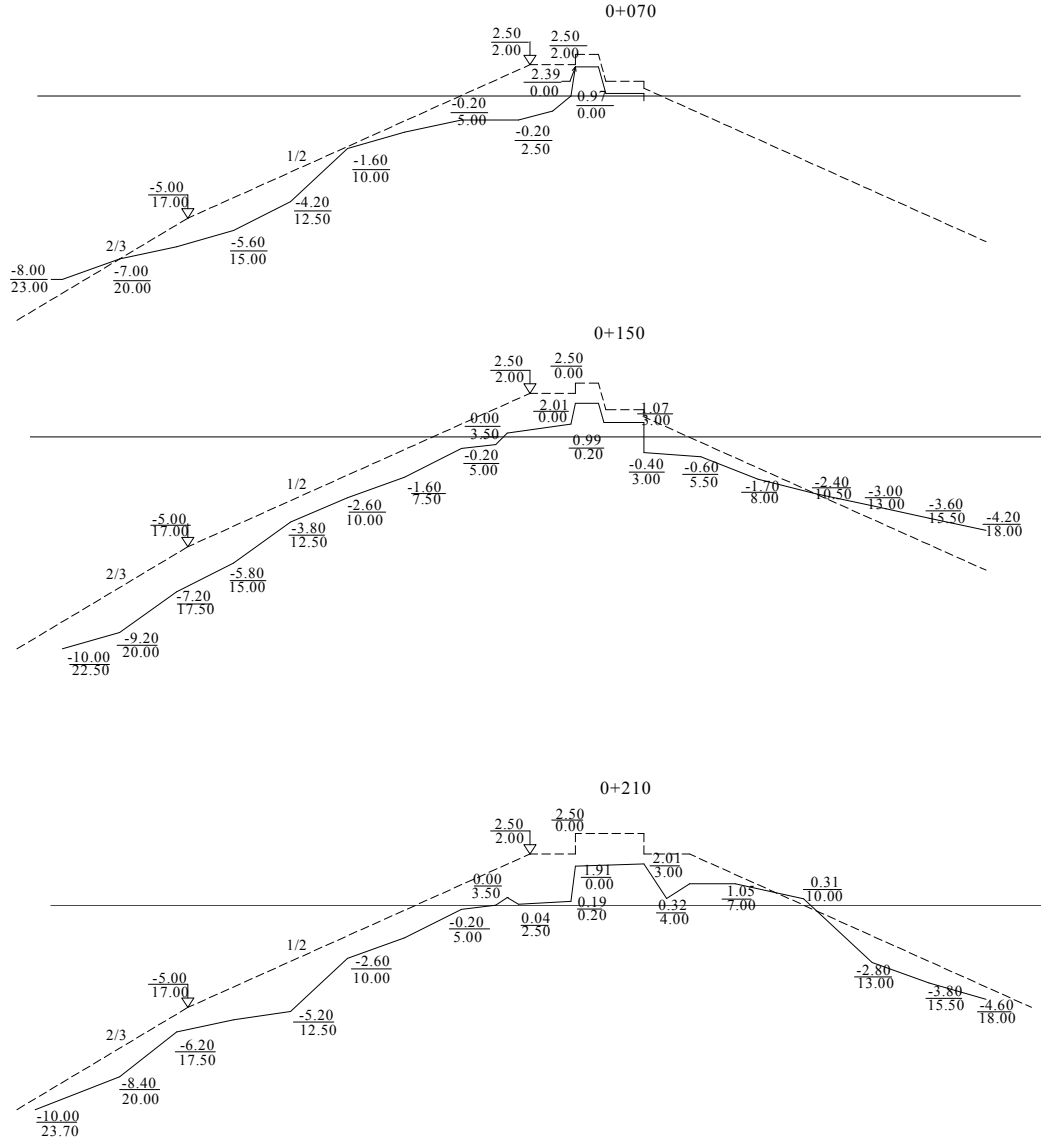
1500 kilometrelik Kuzey Anadolu fay hattının 177 kilometrelik Doğu Marmara Bölgesi’nde, 17 Ağustos 1999 yılında meydana gelen deprem sonrası balıkçı limanı ağır hasar görmüştür. En büyük makrosismik belirtinin, yani epicenter’in Gölçük yakınlarında 17 km. derinlikte görüldüğü ve 0.4g yer ivmesinin tespit edildiği depremde 2.5-3.0 metre, kimi yerlerde 4 metre civarında yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Limanın deprem merkezine olan mesafesi 13.5 kilometre olup fay hattına çok yakın bir bölgededir. Deprem sonrası tespit edilen başlıca

hasarlar (Şekil 4.4);

- 1.50 metre civarında bir oturma.
- Deprem sonrası 3860.25 m³ hacim kaybı.
- Kesit yassılaşması, şev kayması ve alt tabakalarındaki malzemelerin gevşek kumun içine batarak kaybolmasıdır.



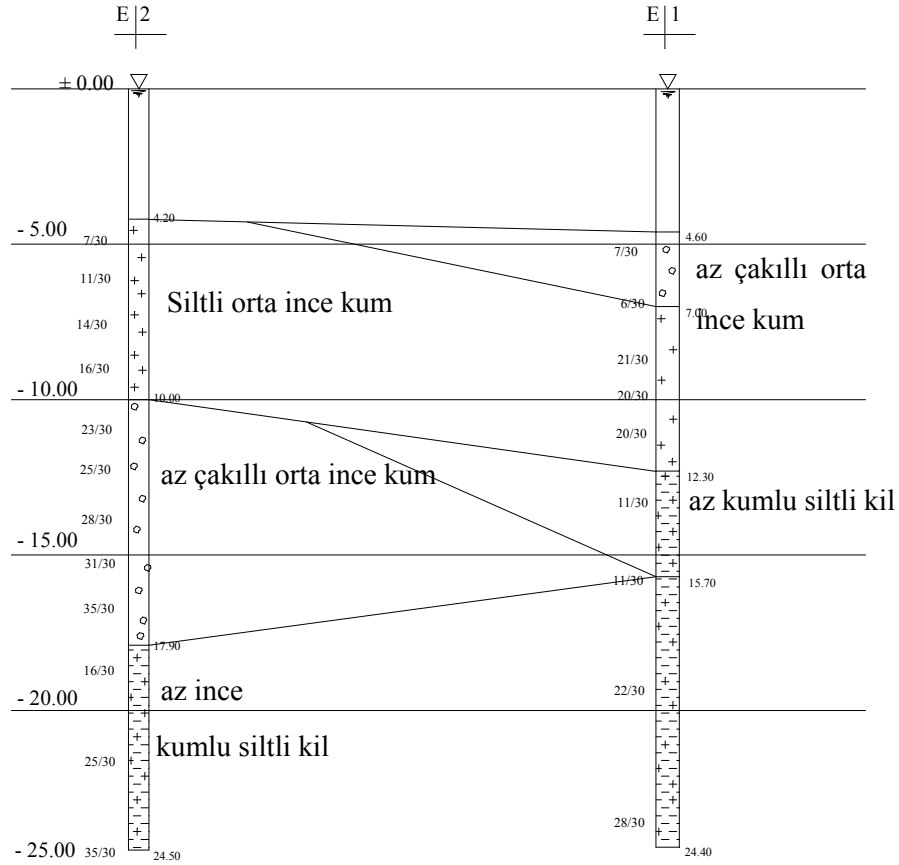
Şekil 4.2 Ereğli balıkçı limanı planı, (Yüksel ve diğ., 2002)



Şekil 4.4 Farklı kesitlerdeki oturular^(*) (Yüksel ve diğ., 2002)

Limanın yapımından önce 1974 yılında alınan iki adet sondaj verisinden yola çıkılarak zemin profili hakkında bilgi sahibi olunmaktadır (Şekil 4.5 ve Çizelge 4.1).

^(*)Üstteki sayılar y-koordinatlarını, alttakiler x-koordinatlarını göstermektedir.



Şekil 4.5 Karamürsel-Ereğli balıkçı limanı deniz tarafı zemin profili
(Yüksel ve diğ., 2002)

Çizelge 4.1 Dalgakıran çevresindeki zemin özellikleri, (Yüksel ve diğ., 2002)

Sondaj Numarası	Seviye, m	w _n %	LL %	PI %	c _u kPa	φ _u °	γ _n kN/m ³	q _u kPa	SPT N ₃₀
E-1	-14.20	36.20	46.20	23.50	39	0	18	66	11
	-17.20	32.10	40.20	19.70	39	0	18	78	22
	-21.70	35.40	46.60	24.00	18	2	19	77	
E-2	-18.40	35.10	43.20	23.30					16
	-20.20	34.90	44.80	22.80	43	0	18		
	-23.20	35.50	49.00	27.30	24	0	19		

Depremden sonra dalgakıran boyunca tüm kesitlerde proje değerlerine göre yaklaşık 1.5 metre oturma meydana geldiği ölçümlenmiştir (Şekil 4.4).

Bu çalışmada; deprem etkisi ile kum tabakalarda oluşması beklenen (sondaj kayıtlarına ve test

sonuçlarına göre) zemin sıvılaşması, bölüm 3.1, 3.2 ve 3.3’de verilen yöntemlerle teyid edilmeye çalışılmakta, ardından sıvılaşma etkisi ile oluşan oturma miktarları hesaplanmaktadır.

İnşaat sırasında kum tabakalarda meydana gelen ani oturma miktarları ve kil tabakada zamanla gelişen konsolidasyon oturması, yetersiz laboratuvar verilerine rağmen çalışmaya eklenmiş, bilinen toplam oturma miktarına göre kıyaslamalar yapılmıştır. Dalgakıran merkezi kritik olduğundan oturma hesaplarında değerlendirmeye yalnız bu bölge dahil edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan veriler aşağıdaki gibidir;

Deniz suyu: $H_w = 7.0 \text{ m.}$; $\gamma_w = 10.25 \text{ kN/m}^3$

Kum: $H_1 = 14 \text{ m}$

Üstteki 4 metrelik bölüm: $N_{avg} \leq 10$, $\phi' = 27^\circ$, $\gamma_{sat} = 16 \text{ kN/m}^3$; $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$

Altteki 10 metrelik bölüm: $N_{avg} = 25$, $\phi' = 35^\circ$, $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$; $\gamma' = 8 \text{ kN/m}^3$;

Kil: $H_2 = 20\text{m. } 25\text{m.}, 30\text{m.}$

$c_u = 35 \text{ kPa}$, $\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$; $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$;

Dalgakıran:

$\phi' = 40^\circ$, $\gamma_m = 18 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$; $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ (Kaplama taşları için birim hacim ağırlığı)

İskele duvarı ağırlığı= $P=3000 \text{ kN/m}$

4.3 Hasar Analizi

4.3.1 Kum Tabakada Meydana Gelen Anlık Oturma (Bowles, 1982)

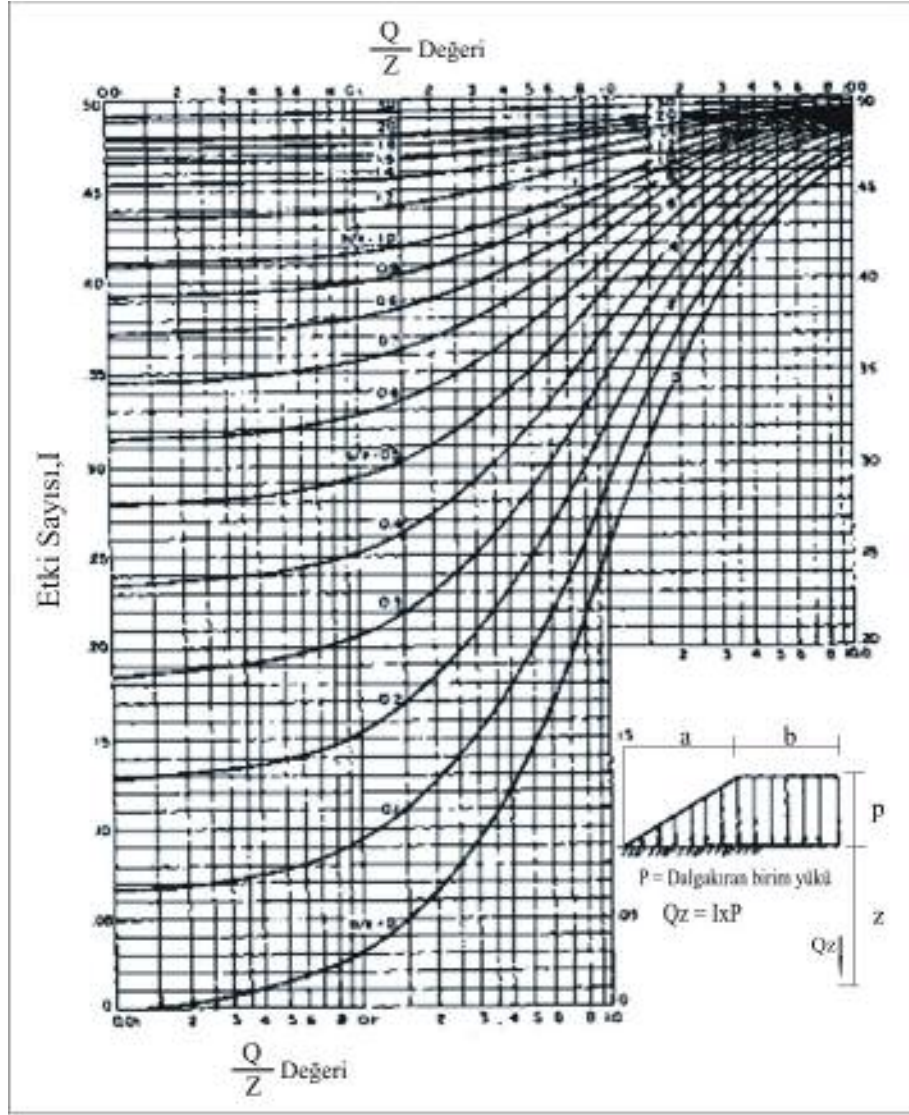
$$S_i = \underbrace{\Delta P * I * B / E_s}_{\sigma_z} * (1 - v^2) \quad (4.1)$$

burada; E_s , v : Young elastik sabitleridir.

Kum tabakalardaki oturma miktarları yukarıdaki denklem yardımıyla hesaplanmakta ve toplam ani oturma miktarı bulunmaktadır. Dalgakıran altında kalan bölgelerde dalgakıran yükünden dolayı oluşan düşey gerilmelerin hesabında Boussinesq’nin çalışması kullanılmıştır (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6).

Çizelge 4.2 Dalgakıran ortasındaki efektif düşey gerilmelerin hesabı

Su seviyesine göre kot	Derinlik (z)	a/z	b/z	I	$\sigma_z = 2I \cdot P$ kN/m	$\Delta P'$ kN/m ²	Zemin Cinsi
-6.00	0.00						
-8.00	2.00	9.50	2.00	0.5	3000	65	Kum
-15.00	9.00	2.11	0.44	0.43	2580	56	Kum
-30.00	24.00	0.79	0.17	0.285	1710	37	Kil
-32.50	26.50	0.72	0.15	0.27	1620	35	Kil
- 35.00	29.00	0.66	0.14	0.24	1440	31	Kil



Şekil 4.6 Dalgakıran yükü altında zeminde oluşan düşey gerilme dağılımı, (Yüksel ve diğ., 2002)

Gevşek kum tabakadaki ani oturma miktarı;

$$S_1 = 3000/12000 * (1-0.25^2) = 0.234 \text{ m. } (E_s = 12 \text{ Mpa , } \nu = 0.250)$$

Orta sıkılıktaki kum tabakası için ani oturma miktarı;

$$S_2 = 2580 * 41/ 50000 * (1-0.3^2) = 0.047 \text{ m. } (E_s = 50 \text{ Mpa , } \nu = 0.3)$$

Kum tabakalarda oluşan toplam ani oturma miktarı; $S_i = 0.28 \text{ m.}$

4.3.2 Konsolidasyon Oturması

Dalgakıran ortasında üç farklı kalınlıkta kil tabakası için düşey efektif gerilmeler;

$$H= 20 \text{ m.}; \Delta P \cdot I \cdot B = 1710 \text{ kN/m} ; \Delta p = 37 \text{ kN/m}^2$$

$$H= 25 \text{ m.}; \Delta P \cdot I \cdot B = 1620 \text{ kN/m} ; \Delta p = 35 \text{ kN/m}^2$$

$$H= 30 \text{ m.}; \Delta P \cdot I \cdot B = 1440 \text{ kN/m} ; \Delta p = 31 \text{ kN/m}^2$$

(B= 46 m. Bölüm 4.3.3, Şekil 4.8)

Çizelge 4.3’de farklı kalınlıkta kil tabakalar için ortalama konsolidasyon oturması hesaplanmaktadır. Odeometre testleri sonucunda $\Delta p = 40\text{-}80 \text{ kPa}$ için bulunan m_v hacim değişikliği katsayıları $0.000523 \text{ m}^2/\text{kN}$ ve $0.000627 \text{ m}^2/\text{kN}$ olup bu değerlerden büyük olanı tercih edilmiştir.

$$S_c = m_v \Delta p H \quad (4.2)$$

S_c : Kil tabakadaki oturma miktarı

H: Kil tabaka kalınlığı

Δp : Düşey efektif gerilme

m_v : Hacim değişikliği katsayısı

Çizelge 4.3 Kil tabakalardaki oturma miktarları

Δp kN/m ²	H (m)	m_v (m ² /kN)	S_c (m)	m_v (m ² /kN)	S_c (m)	Ortalama S_c (m)
37.00	20	0.000627	0.464	0.000523	0.387	0.426
35.00	25	0.000627	0.549	0.000523	0.458	0.503
31.00	30	0.000627	0.583	0.000523	0.486	0.535

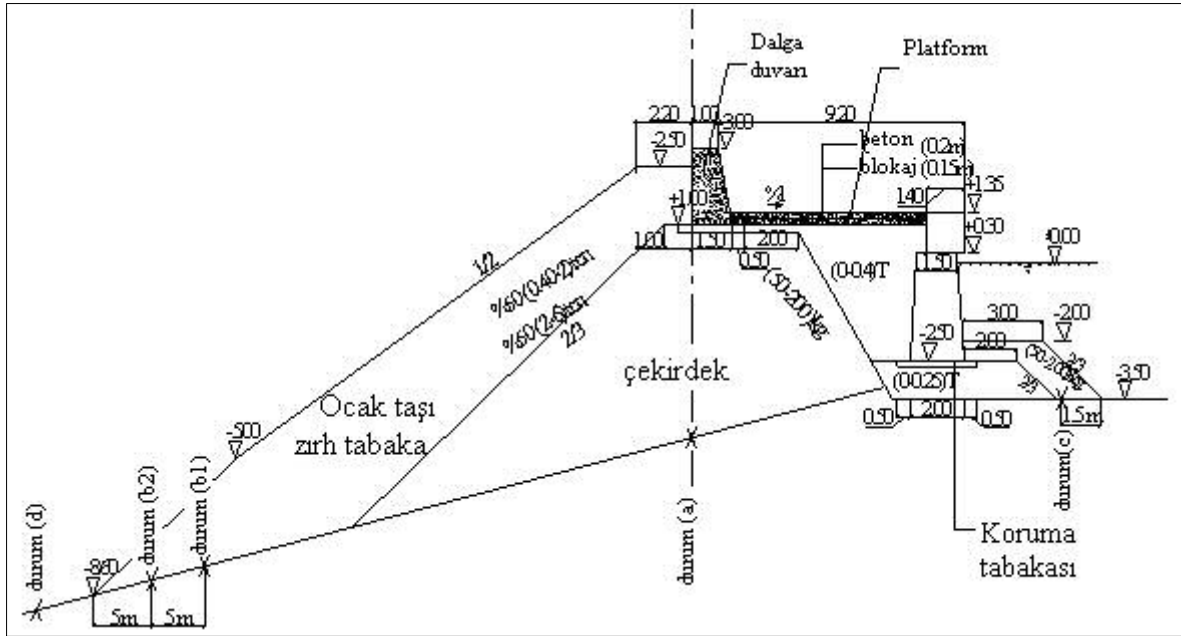
Çizelge 4.3’de görülebileceği gibi deprem öncesi kil tabakada 0.43 m ile 0.53 m arasında oturmanın meydana gelmiş olması beklenmektedir. Eldeki verilerin yetersiz olmasından dolayı bu oturmanın ne kadar zaman içerisinde gerçekleştiği bilinmemektedir.

4.3.3 Sıvılaşma ve Sıvılaşma Oturması

Sıvılaşma etkisi ve sıvılaşma sonucu dalgakırandaki meydana gelen oturmalar; Japon tane çapı dağılımı yöntemi, Seed vd. (1984;1985) tarafından geliştirilmiş olan yaklaşım ve yeni SPT tabanlı sıvılaşma bağıntıları yardımıyla ayrı ayrı ele alınmaktadır.

Şekil 4.7’de inceleme konusu dalgakırana ait kesit ve efektif basıncın farklı olduğu beş ayrı bölge (durum) görülmektedir. Her bir durum için yukarıda belirtilen yöntemler kullanılarak sıvılaşma potansiyelleri bulunmaktadır.

- a: Dalgakıran merkezi,
- b1: Dalgakıran şev altı, topuktan 10 metre içeride,
- b2: Dalgakıran şev altı, topuktan 5 metre içeride,
- c: Dalgakıran şevi-rıhtım duvarı altı ve topuktan 5 metre içeride,
- d: Dalgakıran kesiti dışında kalan bölge.

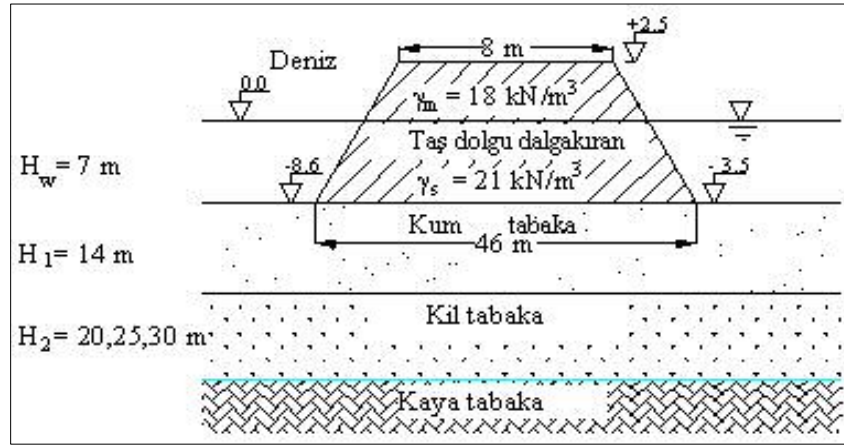


Şekil 4.7 Ereğli Balıkçı Barınağı 1-1 en kesiti, (Yüksel ve diğ., 2002)

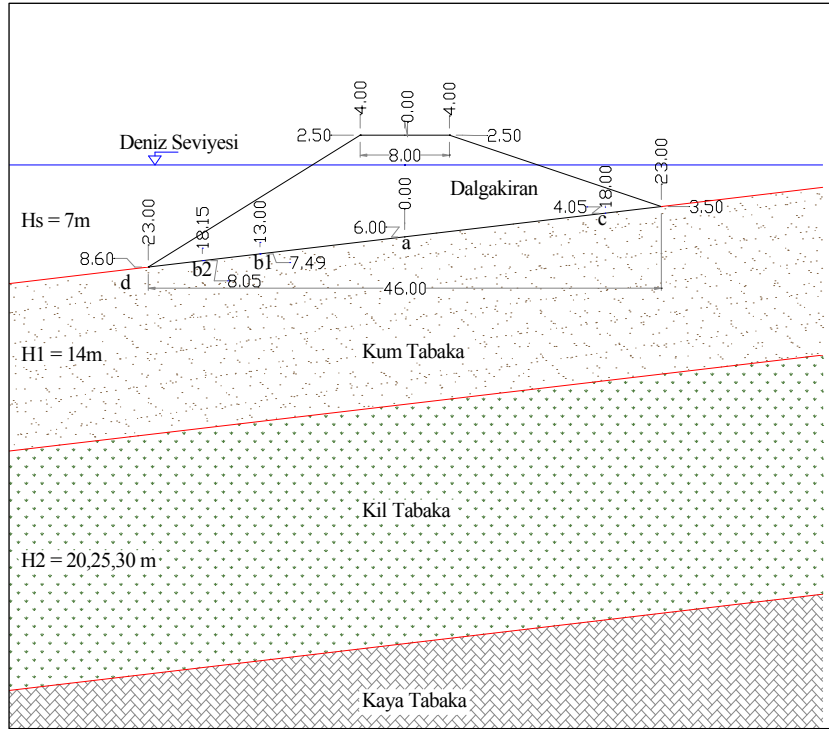
Efektif gerilmeler tespit edilirken;

“a” ile tanımlı noktanın altında kalan alanlar için hesaplamalara esas alınan idealleştirilmiş dalgakıran kesiti Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmektedir. Dalgakıran ağırlığı ile zeminde oluşan yükler düşey efektif gerilmelere ilave edilmiştir. Bu işlemler Boussinesq’nin bölüm 4.3.1, Şekil 4.6’ da belirtilen çalışması yardımıyla yapılmıştır

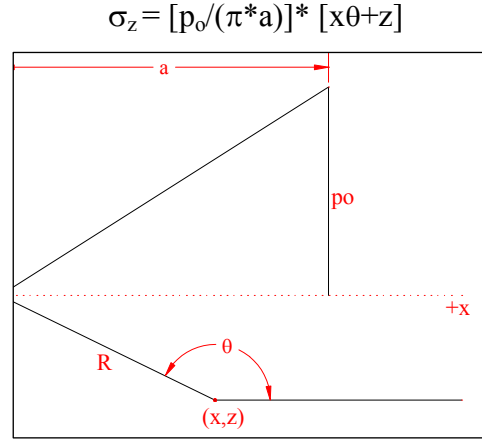
“b1”, “b2” ve “c” ile tanımlı noktaların altında kalan alanlar (dalgakıran şev altı) için benzer işlemler Şekil 4.10’da gösterilen yarı-elastik temel kabulünden yola çıkılarak yapılmaktadır.



Şekil 4.8 Basitleştirilmiş ölçeksiz en kesit, (Yüksel ve diğ., 2002)



Şekil 4.9 Basitleştirilmiş ölçekli en kesit

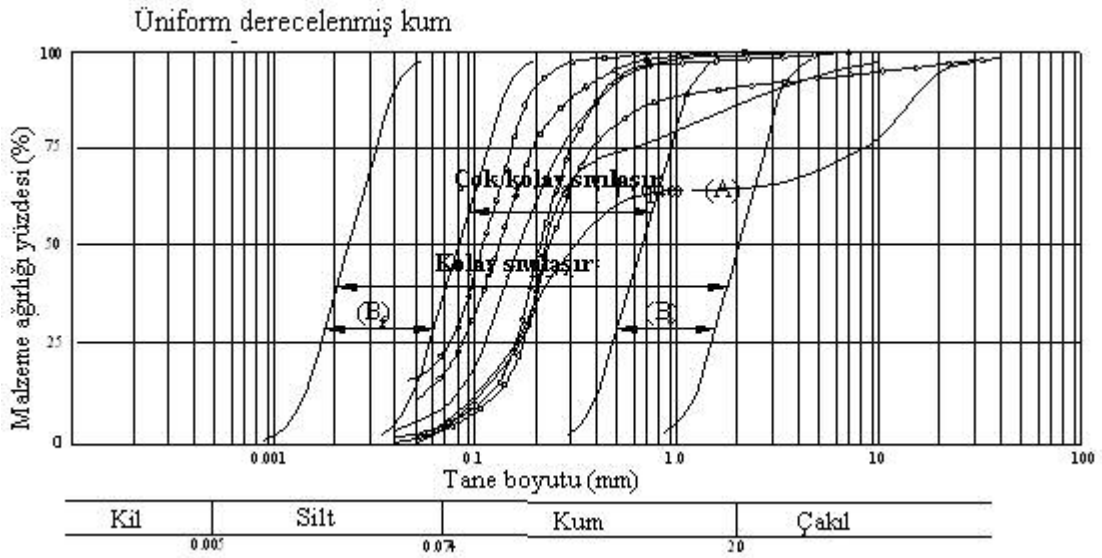


Şekil 4.10 Dalgakıran şevi altında kalan bölgelerde dalgakıran yükü nedeni ile oluşan gerilmelerin hesabı, (Yüksel ve diğ., 2002)

4.3.3.1 Japon “Tane Çapı Dağılımı - Standart Penetrasyon (N) Sayısı” Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi

Adım 1) Sıvılaşma risk bölgesinin tespiti

Kum tabakadan alınan örneklerden elde edilen veriler tane boyutu dağılımının üniform bir yapıda olduğunu ve sıvılaşma potansiyel eğrileri arasında A tipi, yani çok kolay sıvılaşabilir zemin tipine uygun aralığa yerleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.11 Tane boyutu dağılımı (Sıvılaşma potansiyeli)

Adım 2) Eşdeğer N sayılarının bulunması

Standart penetrasyon testinden elde edilen N sayıları her bir durum için ayrı ayrı denklem 4.3 kullanılarak düzeltilmiş ve bulunan eşdeğer N sayılarının derinliğe göre değişimi Çizelge 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13’de verilmiştir.

$$(N)_{0.66} = (N - 1.828(\sigma_v' - 0.66) / (0.399 (\sigma_v' - 0.66) + 1) \quad (4.3)$$

σ_v' : Efektif basınç (kPa)

Efektif basınç değeri dalgakıran ağırlığı ile zeminde oluşan düşey yükleri de içermektedir.

Adım 3) Maksimum kayma gerilmelerinin bulunması

Bilgisayar programı "EERA" yardımı ile daha önce yapılmış olan sismik analiz sonuçları bu çalışmada “Japon Yöntemi” için aynen kullanılmış olup her bir duruma ait maksimum kayma gerilmelerin derinliğe göre değişimi Çizelge 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Durum “a” için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı

İterasyon Sayısı	Alt Katman Numarası	Tip	Derinlik	Maksimum Birim Uzama	Maksimum Birim Uzama Zamanı	Kayma Modülü	G/Gmak	Sönümlenme	Kayma Modülü Yığılması	Sönümlenme Yığılması	Maksimum Gerilme	Alt katman Üst Seviyesi	Maksimum İvme
			(m)	(%)	(sec)	(Mpa)		(%)	(%)	(%)	(kPa)	(m)	(g)
16	1	2	0.9000	0.0122	11.6000	31.9631	0.8710	2.5328	0.0000	0.0012	3.9078	0.0000	0.2652
	2	2	2.8000	0.0563	11.6000	21.8530	0.5955	5.8747	0.0003	0.0206	12.3000	1.8000	0.2605
	3	2	4.8000	0.1209	11.6000	17.5053	0.4240	8.8597	0.0010	0.0739	21.1659	3.8000	0.2426
	4	2	6.7500	0.0718	11.5800	39.6948	0.5408	6.8261	0.0002	0.0130	28.5081	5.8000	0.2202
	5	2	8.7000	0.1102	11.5800	32.6535	0.4449	8.4961	0.0003	0.0233	35.9712	7.7000	0.2111
	6	2	10.7000	0.1441	11.5800	29.8052	0.3847	9.5437	0.0016	0.1127	42.9424	9.7000	0.2004
	7	1	12.7000	0.0580	11.5600	83.0776	0.8109	5.9894	0.0000	0.0009	48.1546	11.7000	0.1950
	8	1	15.2000	0.0692	11.5600	80.2045	0.7828	6.6794	0.0000	0.0022	55.4780	13.7000	0.1926
	9	1	18.7000	0.0867	7.6600	76.5364	0.7470	7.5604	0.0000	0.0006	66.3438	16.7000	0.1885
	10	1	22.7000	0.1095	7.6600	72.7440	0.7100	8.4712	0.0000	0.0012	79.6256	20.7000	0.1844

Çizelge 4.5 Durum “b1 / X=10m.” için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı

İterasyon Sayısı	Alt Katman Numarası	Tip	Derinlik (m)	Maksimum Birim Uzama (%)	Maksimum Birim Uzama Zamanı (sec)	Kayma Modülü (Mpa)	G/Gmak	Sönümlenme (%)	Kayma Modülü Yığılması (%)	Sönümlenme Yığılması (%)	Maksimum Gerilme (kPa)	Alt katman Üst Seviyesi (m)	Maksimum İvme (g)
16	1	2	0.9000	0.0125	11.5600	36.2702	0.8687	2.5623	0.0001	0.0038	4.5483	0.0000	0.3091
	2	2	2.8000	0.0582	11.5600	24.5430	0.5878	6.0085	0.0006	0.0436	14.2955	1.8000	0.3027
	3	2	4.8000	0.1262	11.5600	19.4617	0.4143	9.0285	0.0023	0.1642	24.5702	3.8000	0.2808
	4	2	6.7500	0.0851	11.5600	38.7713	0.5028	7.4882	0.0006	0.0400	32.9916	5.8000	0.2567
	5	2	8.7000	0.1351	11.5400	30.7828	0.3992	9.2916	0.0011	0.0829	41.5739	7.7000	0.2478
	6	2	10.7000	0.1759	11.5400	28.2289	0.3468	10.4955	0.0001	0.0112	49.6587	9.7000	0.2299
	7	2	12.7000	0.2360	11.5400	24.0937	0.2960	12.0196	0.0030	0.3753	56.8629	11.7000	0.2143
	8	1	14.7000	0.0785	11.5200	78.1447	0.7627	7.1742	0.0001	0.0075	61.3563	13.7000	0.2172
	9	1	16.7000	0.0872	11.5200	76.4332	0.7460	7.5852	0.0001	0.0102	66.6762	15.7000	0.2181
	10	1	18.7000	0.0966	11.5000	74.7774	0.7298	7.9829	0.0001	0.0124	72.2273	17.7000	0.2119
	11	1	20.7000	0.0933	7.6000	83.2633	0.7353	7.8493	0.0000	0.0028	77.7192	19.7000	0.2138

Çizelge 4.6 Durum “b2 / X=5m.” için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı

İterasyon Sayısı	Alt Katman Numarası	Tip	Derinlik (m)	Maksimum Birim Uzama (%)	Maksimum Birim Uzama Zamanı (sec)	Kayma Modülü (Mpa)	G/Gmak	Sönümlenme (%)	Kayma Modülü Yığılması (%)	Sönümlenme Yığılması (%)	Maksimum Gerilme (kPa)	Alt katman Üst Seviyesi (m)	Maksimum İvme (g)
16	1	2	0.9000	0.0095	11.5400	47.2397	0.8939	2.2407	0.0000	0.0022	4.4926	0.0000	0.3077
	2	2	2.8000	0.0397	11.5400	35.3526	0.6690	4.7824	0.0002	0.0076	14.0197	1.8000	0.3031
	3	2	4.8000	0.0781	11.5400	31.0274	0.5219	7.1556	0.0006	0.0438	24.2457	3.8000	0.2833
	4	2	6.7500	0.0808	11.5400	41.6159	0.5143	7.2881	0.0005	0.0366	33.6426	5.8000	0.2598
	5	2	8.7000	0.1269	11.5400	33.4321	0.4132	9.0486	0.0007	0.0500	42.4281	7.7000	0.2471
	6	2	10.7000	0.1651	11.5400	30.5629	0.3578	10.1652	0.0002	0.0227	50.4492	9.7000	0.2325
	7	2	12.7000	0.2169	11.5400	26.5316	0.3106	11.5812	0.0016	0.2002	57.5396	11.7000	0.2181
	8	1	14.7000	0.0800	11.5200	77.8364	0.7597	7.2482	0.0001	0.0059	62.2842	13.7000	0.2104
	9	1	16.7000	0.0890	11.5000	76.1071	0.7428	7.6635	0.0001	0.0099	67.7371	15.7000	0.2182
	10	1	18.7000	0.0987	11.5000	74.4303	0.7265	8.0663	0.0001	0.0090	73.4437	17.7000	0.2192
	11	1	20.7000	0.0490	11.5000	82.9665	0.7327	7.9138	0.0001	0.0081	78.7319	19.7000	0.2133

Çizelge 4.7 Durum “c” için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı

İterasyon Sayısı	Alt Katman Numarası	Tip	Derinlik (m)	Maksimum Birim Uzama (%)	Maksimum Birim Uzama Zamanı (sec)	Kayma Modülü (Mpa)	G/Gmak	Sönümlenme (%)	Kayma Modülü Yığılması (%)	Sönümlenme Yığılması (%)	Maksimum Gerilme (kPa)	Alt katman Üst Seviyesi (m)	Maksimum İvme (g)
16	1	2	0.9000	0.0066	11.5400	63.5322	0.9269	1.8212	0.0000	0.0012	4.2123	0.0000	0.2897
	2	2	2.8000	0.0254	11.5400	51.0000	0.7540	3.8518	0.0001	0.0034	13.1398	1.8000	0.2868
	3	2	4.8000	0.0463	11.5400	49.2890	0.6392	5.1139	0.0002	0.0138	22.8297	3.8000	0.2753
	4	2	6.7500	0.0757	11.5400	42.8172	0.5291	7.0297	0.0004	0.0286	32.3966	5.8000	0.2563
	5	2	8.7000	0.1193	11.5400	34.5612	0.4271	8.8057	0.0009	0.0686	41.2148	7.7000	0.2390
	6	2	10.7000	0.1582	11.5400	31.1899	0.3652	9.9450	0.0000	0.0016	49.3445	9.7000	0.2249
	7	2	12.7000	0.2088	11.5400	27.0925	0.3172	11.3842	0.0010	0.1257	56.5657	11.7000	0.2136
	8	1	14.7000	0.0824	11.5200	74.0322	0.7550	7.3628	0.0000	0.0037	61.0057	13.7000	0.2062
	9	1	16.7000	0.0923	11.5200	72.2701	0.7371	7.8051	0.0000	0.0050	66.6971	15.7000	0.2136
	10	1	18.7000	0.1016	11.5200	70.7733	0.7218	8.1807	0.0000	0.0053	71.9133	17.7000	0.2160
	11	1	20.7000	0.0982	11.5000	78.8152	0.7273	8.0463	0.0000	0.0050	77.3735	19.7000	0.2109

Çizelge 4.8 Durum “d” için "EERA" yardımı ile maksimum kayma gerilmelerinin derinliğe göre dağılımı

İterasyon Sayısı	Alt Katman Numarası	Tip	Derinlik (m)	Maksimum Birim Uzama (%)	Maksimum Birim Uzama Zamanı (sec)	Kayma Modülü (Mpa)	G/Gmak	Sönümlenme (%)	Kayma Modülü Yığılması (%)	Sönümlenme Yığılması (%)	Maksimum Gerilme (kPa)	Alt katman Üst Seviyesi (m)	Maksimum İvme (g)
16	1	2	0.9000	0.0059	11.5000	74.0522	0.9381	1.6789	0.0000	0.0013	4.3443	0.0000	0.2985
	2	2	2.8000	0.0220	11.5000	61.7074	0.7817	3.5480	0.0001	0.0034	13.5706	1.8000	0.2955
	3	2	4.8000	0.0398	11.5000	59.3539	0.6683	4.7896	0.0001	0.0042	23.6189	3.8000	0.2840
	4	2	6.7500	0.0590	11.5000	56.7682	0.5849	6.0600	0.0002	0.0120	33.5054	5.8000	0.2679
	5	2	8.7000	0.0898	11.5000	47.6220	0.4906	7.7003	0.0003	0.0251	42.7859	7.7000	0.2536
	6	2	10.7000	0.1158	11.5000	44.4321	0.4337	8.6917	0.0011	0.0782	51.4634	9.7000	0.2418
	7	2	12.7000	0.1592	11.5000	37.3049	0.3641	9.9769	0.0010	0.1226	59.3841	11.7000	0.2276
	8	1	14.7000	0.0763	11.4800	85.6010	0.7673	7.0609	0.0000	0.0031	65.2891	13.7000	0.2109
	9	1	16.7000	0.0859	11.4800	83.4933	0.7484	7.5258	0.0000	0.0040	71.7356	15.7000	0.2097
	10	1	18.7000	0.0950	11.4800	81.7118	0.7324	7.9188	0.0000	0.0047	77.6396	17.7000	0.2114
	11	1	20.7000	0.0916	11.4800	91.0233	0.7382	7.7770	0.0001	0.0059	83.4030	19.7000	0.2155

Adım 4) Eşdeğer yer ivmelerinin bulunması

Maksimum kayma gerilmeleri ve efektif basınca bağlı olarak elde edilen eşdeğer yer ivmeleri Çizelge 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13’de gösterilmektedir.

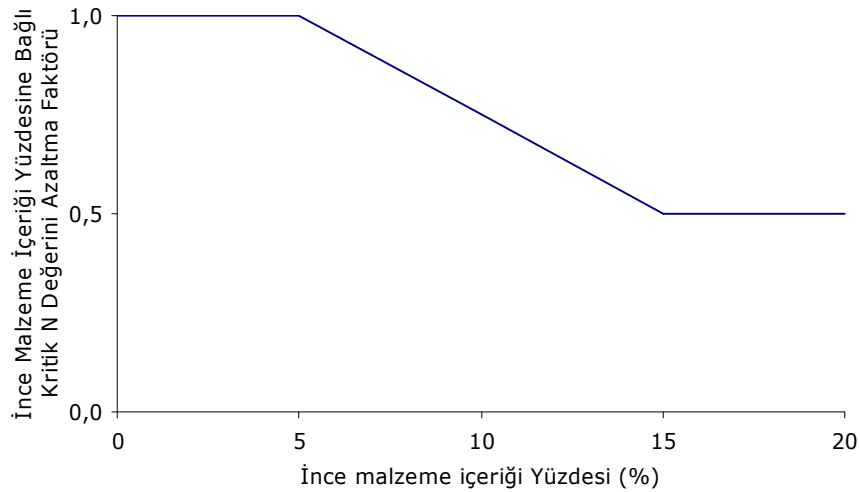
$$a_{eq} = 0.7 (\tau_{mak} / \sigma_v') \cdot g \quad (4.4)$$

Adım 5) A tipi zeminler için ince malzeme oranı düzeltmesi

Kum tabakadan alınmış olan zemin örneklerinden elde edilen verilere göre (Dadaşbilge ve Mut, 1974) ince malzeme oranları aşağıdaki gibidir;

- ✓ 0-5 metreler arası FC = %15
- ✓ 5-14 metreler arası FC ≤ %5
- ✓ 14 metre ve sonrası FC ≥ %90

%5’den fazla ince malzeme oranı içeren tabakaların düzeltilmiş N değerleri (kritik N değerleri) Şekil 4.12 kullanılarak azaltılmış ve bulunan “eşdeğer N sayıları” nihai değerler olarak Çizelge 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Kritik N değerini azaltma faktörü, (Yüksel ve diğ., 2002)

Çizelge 4.9 Durum “a” için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	Maksimum Gerilme (kPa)	Eşdeğer İvme aeq (g) m/sec ²	Eşdeğer İvme aeq GAL
Siltli orta-ince kum	6.50	0.50	7	16	68.0950	6.9040	3.9078	0.0402	39.4080
	8.00	2.00	11	16	77.3800	10.3232	8.7664	0.0793	77.7968
	9.50	3.50	14	16	84.6650	12.7121	15.4031	0.1274	124.9310
	11.00	5.00	16	18	94.0000	13.9317	21.9189	0.1632	160.1249
Az çakıllı orta- ince kum	12.50	6.50	23	18	104.0000	19.3687	27.5668	0.1855	182.0203
	14.00	8.00	25	18	114.0000	20.2452	33.2921	0.2044	200.5413
	15.50	9.50	28	18	126.8050	21.6387	38.7597	0.2140	209.8992
	17.00	11.00	31	19	137.0900	23.1375	43.7242	0.2233	219.0198
	18.50	12.50	35	19	147.3750	25.2984	47.6334	0.2262	221.9497
	20.20	14.20	16	19	159.2980	10.4168	52.5486	0.2309	226.5261
Siltli kil	23.50	17.50	25	19	184.3250	15.5130	62.6184	0.2378	233.2838
	26.30	20.30	35	19	205.2570	20.8625	71.6565	0.2444	239.7313

Çizelge 4.10 Durum “b1 / X=10m” için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	Maksimum Gerilme (kPa)	Eşdeğer İvme aeq (g) m/sec ²	Eşdeğer İvme aeq GAL
Siltli orta-ince kum	7.99	0.50	7	16	33.9654	8.6973	4.5483	0.0937	91.9559
	9.49	2.00	11	16	46.1548	12.3399	10.1914	0.1546	151.6298
	10.99	3.50	14	16	58.3415	14.5857	17.8916	0.2147	210.5910
	12.49	5.00	16	18	73.5241	15.4001	25.4339	0.2421	237.5477
Az çakıllı orta- ince kum	13.99	6.50	23	18	88.7020	20.7092	31.9119	0.2518	247.0511
	15.49	8.00	25	18	103.8751	21.1165	38.4931	0.2594	254.4709
	16.99	9.50	28	18	119.0438	22.3088	44.8078	0.2635	258.4723
	18.49	11.00	31	19	135.7085	23.2571	50.7393	0.2617	256.7466
	19.99	12.50	35	19	152.3699	24.8555	56.1425	0.2579	253.0227
Siltli kil	21.69	14.20	16	19	171.2494	9.9131	60.2330	0.2462	241.5306
	24.99	17.50	25	19	207.8897	14.3067	68.8966	0.2320	227.5790
	27.79	20.30	35	19	238.9722	18.8373	76.6208	0.2244	220.1742

Çizelge 4.11 Durum “b2 / X=5m” için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	Maksimum Gerilme (kPa)	Eşdeğer İvme aeq (g) m/sec ²	Eşdeğer İvme aeq GAL
Siltli orta-ince kum	8.55	0.50	7	16	24.0576	9.3277	4.4926	0.1307	128.2367
	10.05	2.00	11	16	37.1641	13.0258	10.0083	0.1885	184.9283
	11.55	3.50	14	16	50.2595	15.2452	17.5988	0.2451	240.4540
	13.05	5.00	16	18	66.3428	15.9719	25.2095	0.2660	260.9379
Az çakıllı orta- ince kum	14.55	6.50	23	18	82.4162	21.3045	32.4379	0.2755	270.2756
	16.05	8.00	25	18	98.4824	21.6060	39.2743	0.2792	273.8528
	17.55	9.50	28	18	114.5437	22.7133	45.6365	0.2789	273.5952
	19.05	11.00	31	19	132.1014	23.5741	51.5128	0.2730	267.7777
	20.55	12.50	35	19	149.6565	25.0945	56.8306	0.2658	260.7675
Siltli kil	22.25	14.20	16	19	169.5501	9.9826	61.0981	0.2522	247.4551
	25.55	17.50	25	19	208.1623	14.2936	70.0197	0.2355	230.9859
	28.35	20.30	35	19	238.9722	18.8373	77.6743	0.2275	223.2013

Çizelge 4.12 Durum “c” için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	Maksimum Gerilme (kPa)	Eşdeğer İvme aeq (g) m/sec ²	Eşdeğer İvme aeq GAL
Siltli orta-ince kum	4.55	0.50	7	16	6.1952	10.6297	4.2123	0.4760	466.9077
	6.05	2.00	11	16	17.1208	14.7751	9.3809	0.3835	376.2576
	7.55	3.50	14	16	32.7767	16.8396	16.5313	0.3531	346.3442
	9.05	5.00	16	18	53.0592	17.1206	23.8109	0.3141	308.1644
Az çakıllı orta- ince kum	10.55	6.50	23	18	74.9669	22.0473	31.1701	0.2910	285.5192
	12.05	8.00	25	18	98.4992	21.6044	38.0493	0.2704	265.2656
	13.55	9.50	28	18	123.6557	21.9065	44.4667	0.2517	246.9378
	15.05	11.00	31	19	151.9362	21.9148	50.4277	0.2323	227.9160
	16.55	12.50	35	19	181.8405	22.4883	55.8436	0.2150	210.8869
Siltli kil	18.25	14.20	16	19	215.4230	8.3126	59.8957	0.1946	190.9284
	21.55	17.50	25	19	267.2815	11.8243	68.7836	0.1801	176.7189
	24.35	20.30	35	19	317.5757	15.1719	76.2815	0.1681	164.9449

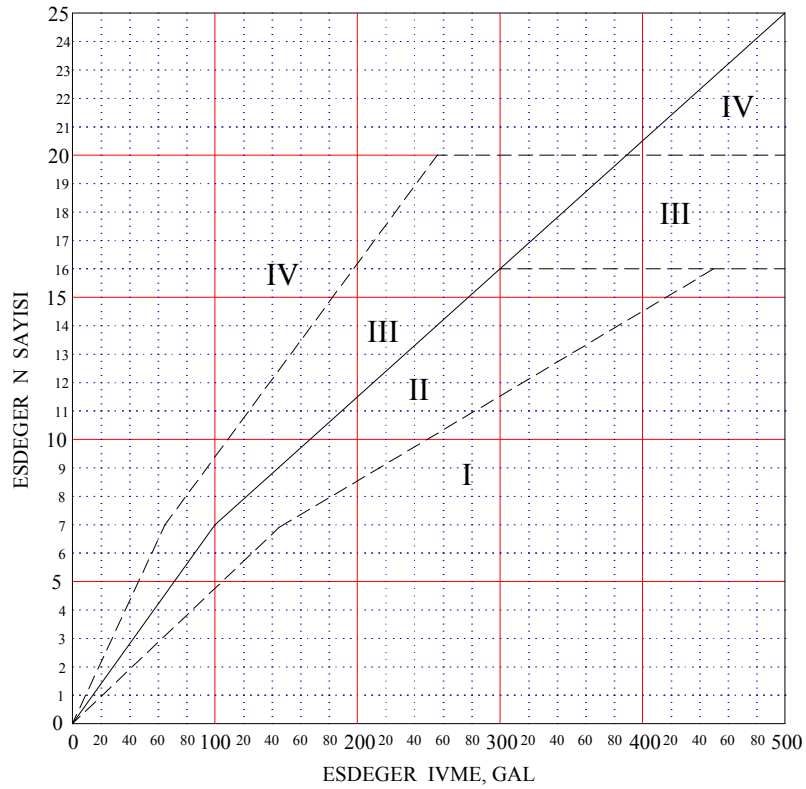
Çizelge 4.13 Durum “d” için standart penetrasyon sayısı düzeltme işlemi ve eşdeğer ivmenin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	Maksimum Gerilme (kPa)	Eşdeğer İvme aeq (g) m/sec ²	Eşdeğer İvme aeq GAL
Siltli orta-ince kum	9.10	0.50	7	16	3.1000	10.8805	4.3443	0.9810	962.3325
	10.60	2.00	11	16	12.3800	15.2409	9.6858	0.5477	537.2591
	12.10	3.50	14	16	21.6700	17.9929	17.0875	0.5520	541.4854
	13.60	5.00	16	18	33.9500	19.0179	24.6329	0.5079	498.2448
Az çakıllı orta- ince kum	15.10	6.50	23	18	46.2400	25.3607	32.2379	0.4880	478.7579
	16.60	8.00	25	18	58.5200	25.9100	39.4544	0.4719	462.9761
	18.10	9.50	28	18	70.8100	27.3865	46.2569	0.4573	448.5894
	19.60	11.00	31	19	84.5900	28.5430	52.6515	0.4357	427.4239
	21.10	12.50	35	19	98.3800	30.4713	58.5920	0.4169	408.9769
Siltli kil	22.80	14.20	16	19	114.0000	12.6918	63.8129	0.3918	384.3885
	26.10	17.50	25	19	144.3300	17.9562	74.0972	0.3594	352.5431
	28.90	20.30	35	19	170.0600	23.3874	82.2503	0.3386	332.1257

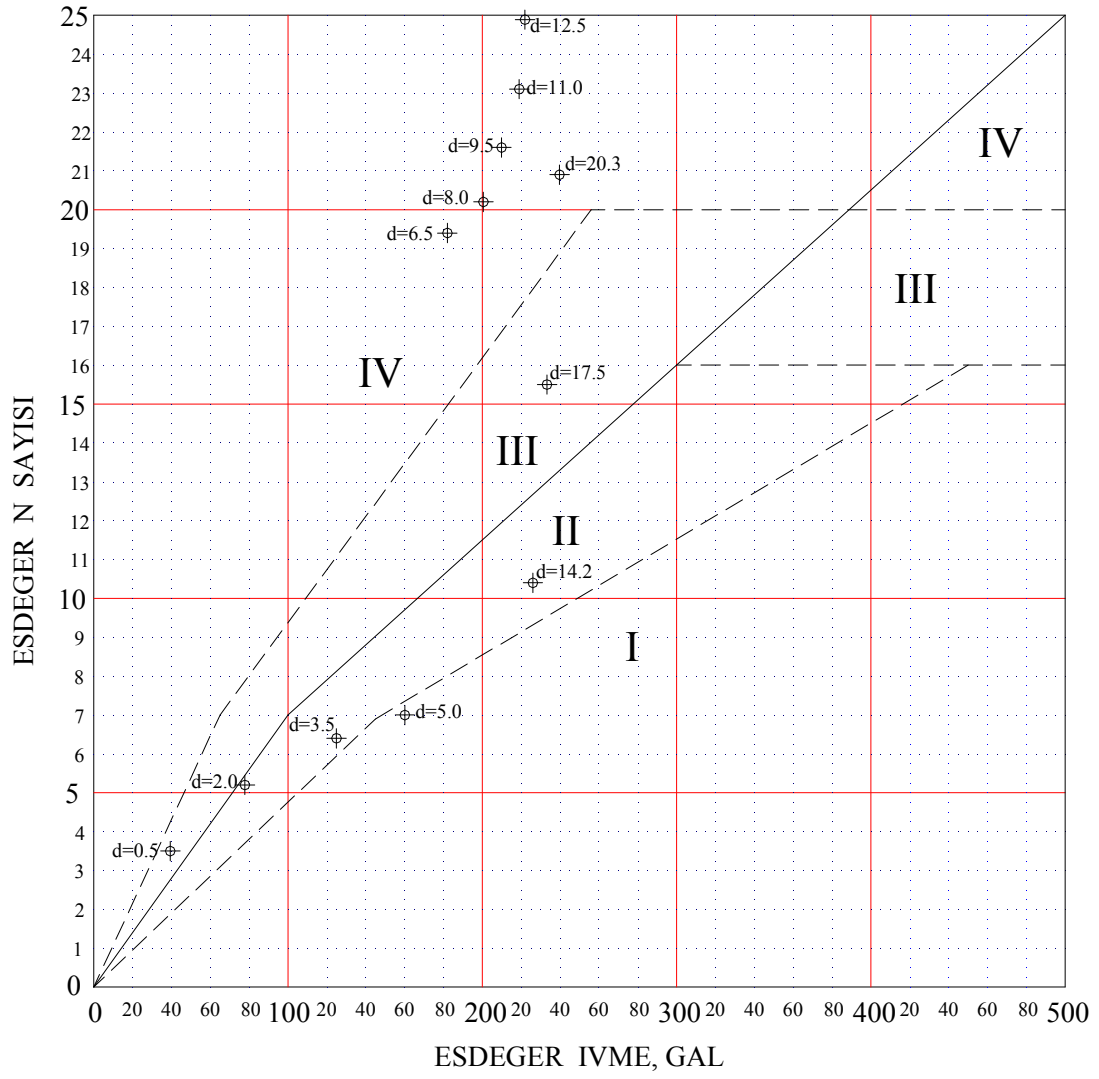
Adım 6) Sıvılaşma riskinin tayin edilmesi

Tespit edilen eşdeğer N sayıları ve eşdeğer ivmeler A tipi zeminler için verilen Şekil 4.13 üzerinde yerlerine konularak sıvılaşma bölgeleri tespit edilmektedir.

Bölüm 3.1.6’da verilen Çizelge 3.1 yardımı ile her durum için derinlikle değişen sıvılaşma olasılığı tahmin edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ve Çizelge 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18’de gösterilmiştir.



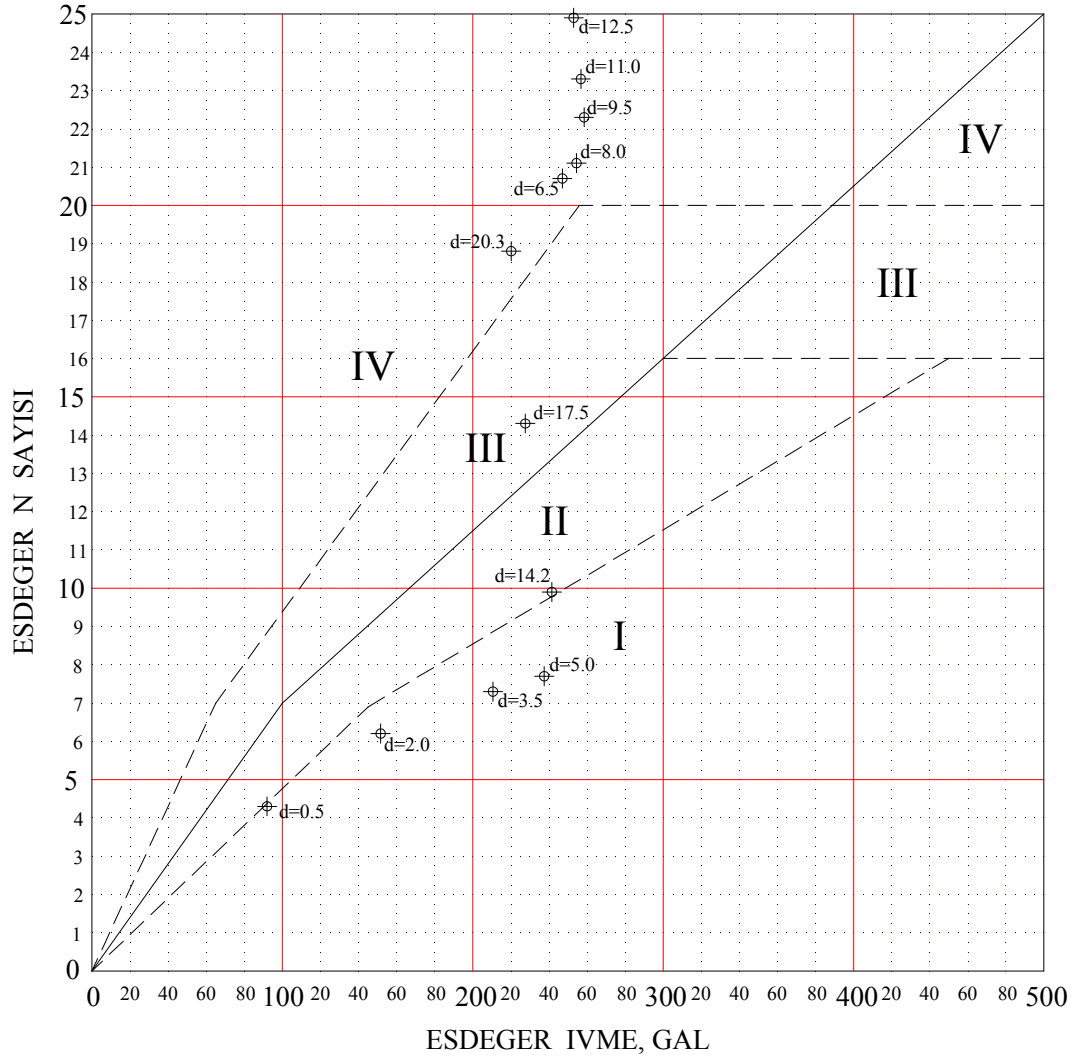
Şekil 4.13 A Tipi zeminler için sıvılaşma grafiği (1GAL=981g), (Yüksel ve diğ., 2002)



Şekil 4.14 Durum “a” için sınıflama bölgeleri, (Yüksel ve diğ., 2002)

Çizelge 4.14 Durum "a" için sıvılaşma tahmini

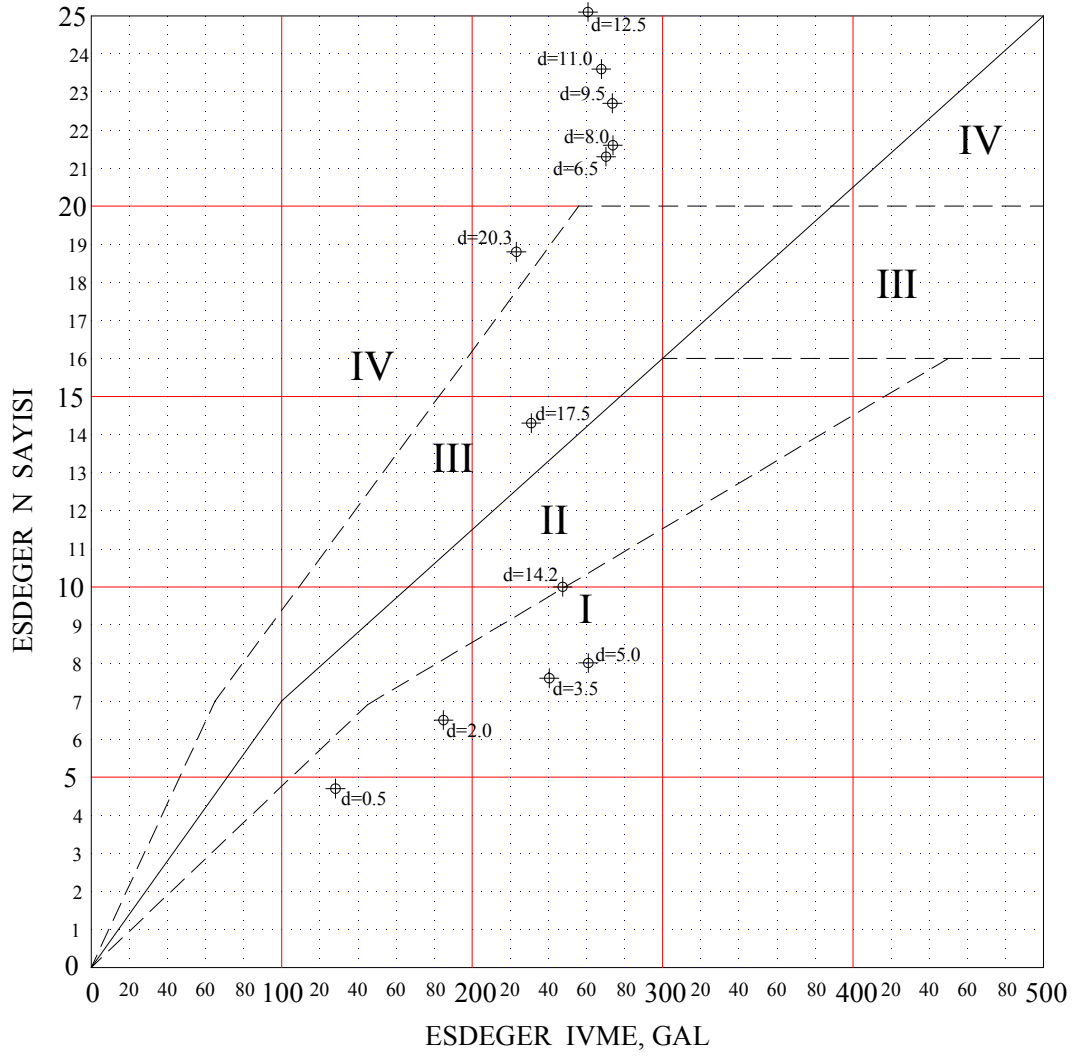
Derinlik (m)	Eşdeğer İvme, a eq GAL	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	İnce Malzeme Oranı (FC)	Kritik N Değerini Azaltma Faktörü	Eşdeğer N Değeri	Sıvılaşma Bölgesi	SIVILAŞMA TAHMİNİ	KARAR
0.50	39.4080	6.9040	15%	0.5	3.5	III	Sıvılaşma olasılığı yok	Sıvılaşmaz olarak karar verilir. Bu derinlikteki zemine ait 3 eksenli vibrasyon test sonuçları bulunmadığı için ikinci bir tahkik yapılamamıştır.
2.00	77.7968	10.3232	15%	0.5	5.2	II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Sıvılaşır olarak karar verilir. Bu derinlikteki zemine ait 3 eksenli vibrasyon test sonuçları bulunmadığı için ikinci bir tahkik yapılamamıştır.
3.50	124.9310	12.7121	15%	0.5	6.4	II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Sıvılaşır olarak karar verilir. Bu derinlikteki zemine ait 3 eksenli vibrasyon test sonuçları bulunmadığı için ikinci bir tahkik yapılamamıştır.
5.00	160.1249	13.9317	15%	0.5	7.0	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
6.50	182.0203	19.3687	<%5	1	19.4	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
8.00	200.5413	20.2452	<%5	1	20.2	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
9.50	209.8992	21.6387	<%5	1	21.6	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
11.00	219.0198	23.1375	<%5	1	23.1	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
12.50	221.9497	25.2984	<%5	1	25.3	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
14.20	226.5261	10.4168	>%90	-	10.4	II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
17.50	233.2838	15.5130	>%90	-	15.5	III	Sıvılaşma olasılığı yok	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
20.30	239.7313	20.8625	>%90	-	20.9	IV	Sıvılaşmaz	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.



Şekil 4.15 Durum “b1” için sınıflaştırma bölgeleri

Çizelge 4.15 Durum "b1" için sıvılaşma tahmini

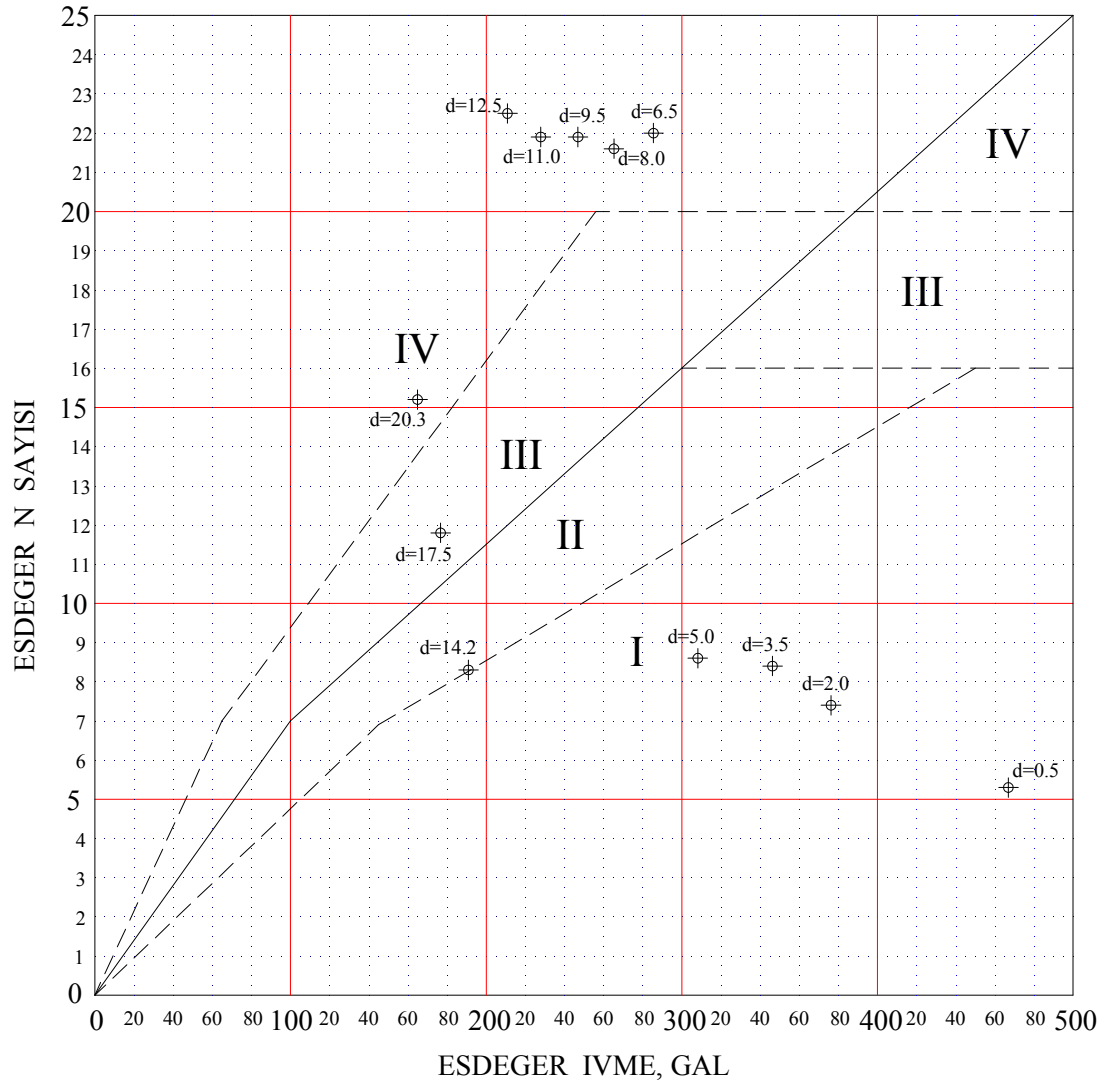
Derinlik (m)	Eşdeğer İvme a eq GAL	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	İnce Malzeme Oranı (FC)	Kritik N Değerini Azaltma Faktörü	Eşdeğer N Değeri	Sıvılaşma Bölgesi	SIVILAŞMA TAHMİNİ	KARAR
0.50	91.9559	8.6973	15%	0.5	4.3	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
2.00	151.6298	12.3399	15%	0.5	6.2	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
3.50	210.5910	14.5857	15%	0.5	7.3	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
5.00	237.5477	15.4001	15%	0.5	7.7	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
6.50	247.0511	20.7092	<%5	1	20.7	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
8.00	254.4709	21.1165	<%5	1	21.1	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
9.50	258.4723	22.3088	<%5	1	22.3	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
11.00	256.7466	23.2571	<%5	1	23.3	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
12.50	253.0227	24.8555	<%5	1	24.9	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
14.20	241.5306	9.9131	>%90	-	9.9	II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
17.50	227.5790	14.3067	>%90	-	14.3	III	Sıvılaşma olasılığı yok	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
20.30	220.1742	18.8373	>%90	-	18.8	IV	Sıvılaşmaz	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.



Şekil 4.16 Durum “b2” için sınıvlaşma bölgeleri

Çizelge 4.16 Durum "b2" için sıvılaşma tahmini

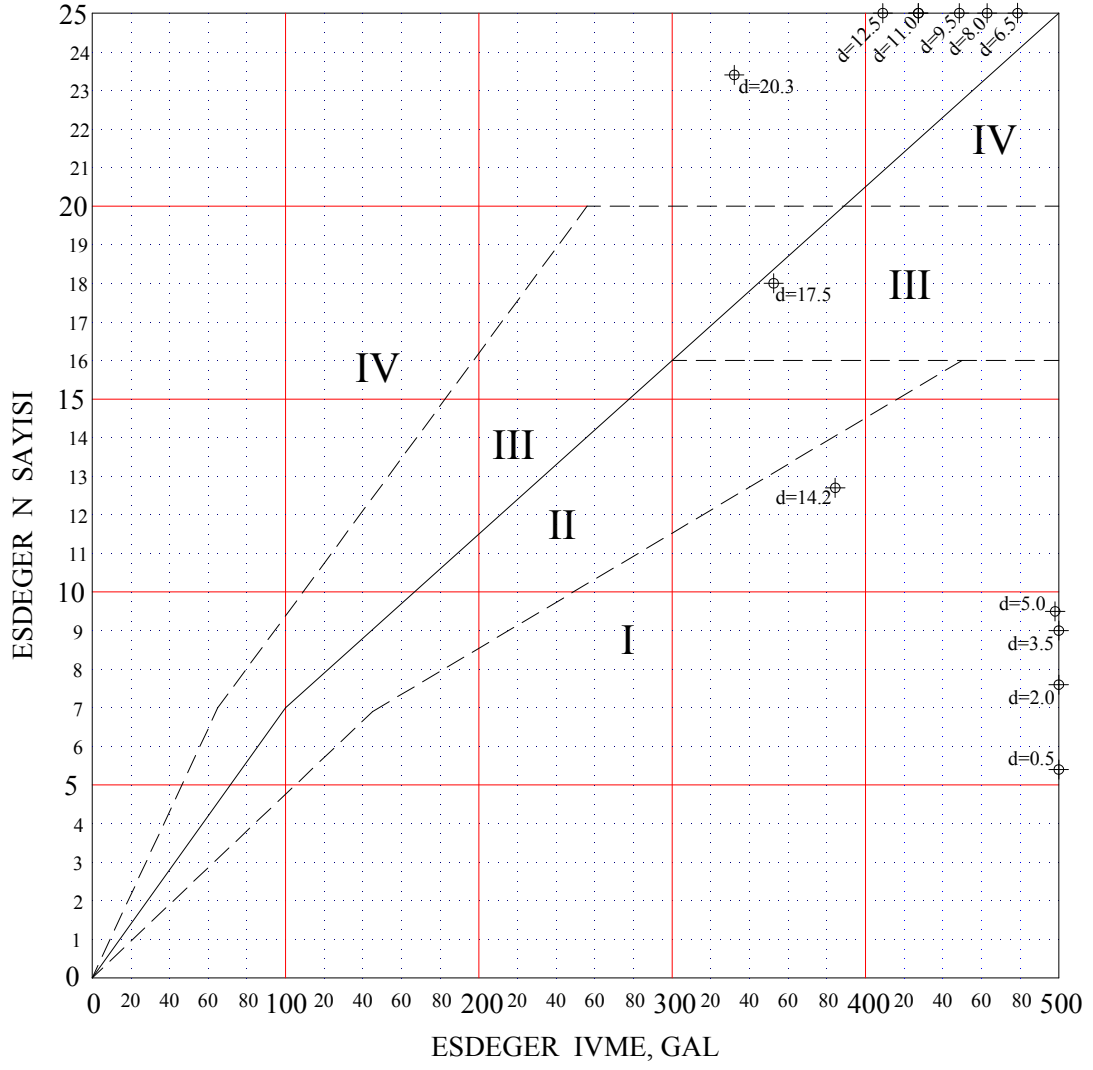
Derinlik (m)	Eşdeğer İvme a eq GAL	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	İnce Malzeme Oranı (FC)	Kritik N Değerini Azaltma Faktörü	Eşdeğer N Değeri	Sıvılaşma Bölgesi	SIVILAŞMA TAHMİNİ	KARAR
0.50	128.2367	9.3277	15%	0.5	4.7	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
2.00	184.9283	13.0258	15%	0.5	6.5	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
3.50	240.4540	15.2452	15%	0.5	7.6	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
5.00	260.9379	15.9719	15%	0.5	8.0	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
6.50	270.2756	21.3045	<%5	1	21.3	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
8.00	273.8528	21.6060	<%5	1	21.6	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
9.50	273.5952	22.7133	<%5	1	22.7	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
11.00	267.7777	23.5741	<%5	1	23.6	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
12.50	260.7675	25.0945	<%5	1	25.1	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
14.20	247.4551	9.9826	>%90	-	10.0	II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
17.50	230.9859	14.2936	>%90	-	14.3	III	Sıvılaşma olasılığı yok	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
20.30	223.2013	18.8373	>%90	-	18.8	IV	Sıvılaşmaz	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.



Şekil 4.17 Durum “c” için sınırlama bölgeleri

Çizelge 4.17 Durum "c" için sıvılaşma tahmini

Derinlik (m)	Eşdeğer İvme a eq GAL	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	İnce Malzeme Oranı (FC)	Kritik N Değerini Azaltma Faktörü	Eşdeğer N Değeri	Sıvılaşma Bölgesi	SIVILAŞMA TAHMİNİ	KARAR
0.50	466.9077	10.6297	15%	0.5	5.3	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
2.00	376.2576	14.7751	15%	0.5	7.4	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
3.50	346.3442	16.8396	15%	0.5	8.4	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
5.00	308.1644	17.1206	15%	0.5	8.6	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
6.50	285.5192	22.0473	<%5	1	22.0	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
8.00	265.2656	21.6044	<%5	1	21.6	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
9.50	246.9378	21.9065	<%5	1	21.9	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
11.00	227.9160	21.9148	<%5	1	21.9	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
12.50	210.8869	22.4883	<%5	1	22.5	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
14.20	190.9284	8.3126	>%90	-	8.3	II	Büyük olasılıkla sıvılaşır	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
17.50	176.7189	11.8243	>%90	-	11.8	III	Sıvılaşma olasılığı yok	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
20.30	164.9449	15.1719	>%90	-	15.2	IV	Sıvılaşmaz	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.



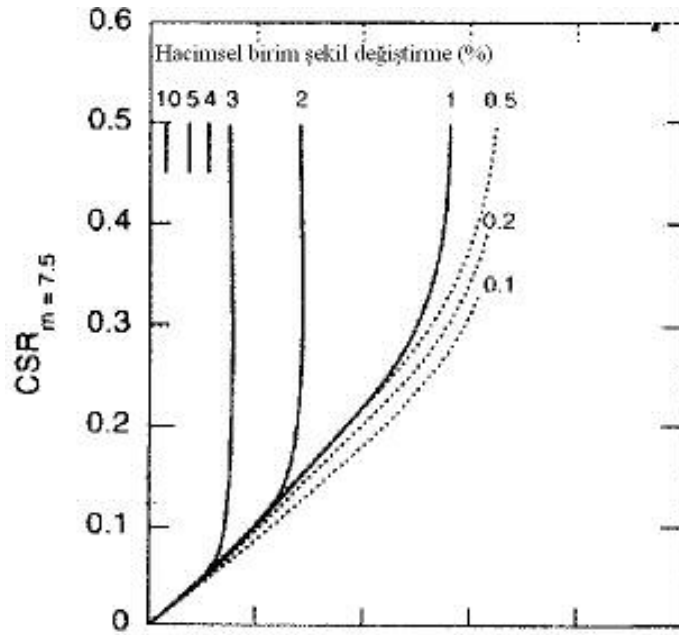
Şekil 4.18 Durum “d” için sınırlama bölgeleri

Çizelge 4.18 Durum "d" için sıvılaşma tahmini

Derinlik (m)	Eşdeğer İvme a eq GAL	Düzeltilmiş N Değeri N _{0.66}	İnce Malzeme Oranı (FC)	Kritik N Değerini Azaltma Faktörü	Eşdeğer N Değeri	Sıvılaşma Bölgesi	SIVILAŞMA TAHMİNİ	KARAR
0.50	962.3325	10.8805	15%	0.5	5.4	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
2.00	537.2591	15.2409	15%	0.5	7.6	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
3.50	541.4854	17.9929	15%	0.5	9.0	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
5.00	498.2448	19.0179	15%	0.5	9.5	I	Sıvılaşır	Sıvılaşır.
6.50	478.7579	25.3607	<%5	1	25.4	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
8.00	462.9761	25.9100	<%5	1	25.9	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
9.50	448.5894	27.3865	<%5	1	27.4	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
11.00	427.4239	28.5430	<%5	1	28.5	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
12.50	408.9769	30.4713	<%5	1	30.5	IV	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz
14.20	384.3885	12.6918	>%90	-	12.7	I	Sıvılaşır	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
17.50	352.5431	17.9562	>%90	-	18.0	III	Sıvılaşma olasılığı yok	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.
20.30	332.1257	23.3874	>%90	-	23.4	IV	Sıvılaşmaz	Bu derinlikteki zemin katmanı KİL olup ince malzeme oranı %90'dan fazla olduğu için SIVILAŞMA OLASILIĞI BULUNMAMAKTADIR.

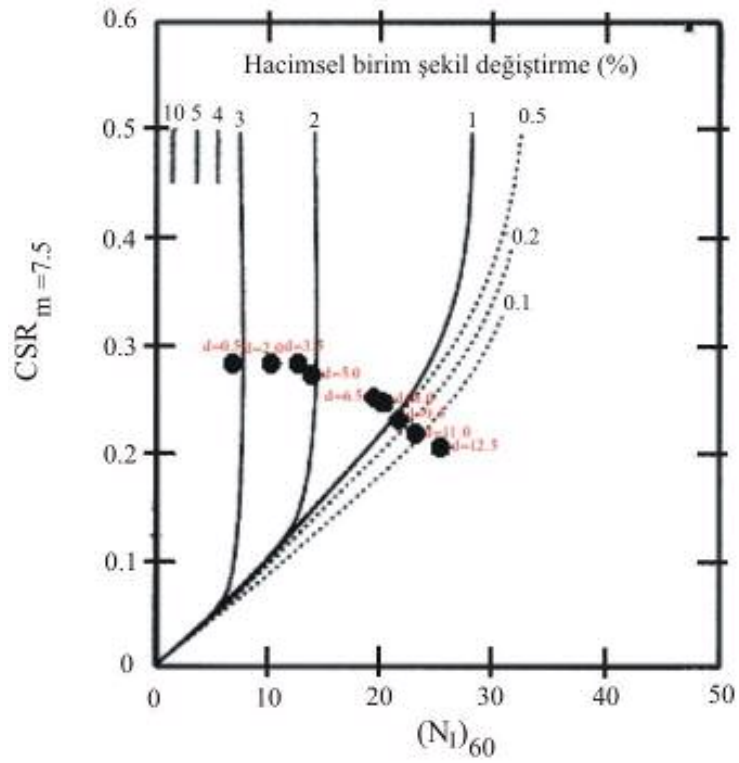
Adım 7) Sıvılaşma oturmasının bulunması

Tokimatsu ve Seed (1985) tarafından $(N)_{l-60}$ - rölatif yoğunluk-sıvılaşan zemindeki potansiyel kayma birim şekil değiştirme potansiyeli ve CSR arasında kurulan bağıntıya göre sıvılaşma etkisinden dolayı meydana gelen hacimsel şekil değiştirmeler bulunabilmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Doygun kumlardaki hacimsel şekil değiştirme tahmin grafiği, (Yüksel ve diğ., 2002)

Tespit edilen hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri ilgili tabaka kalınlıkları ile çarpılarak sıvılaşmadan dolayı meydana gelen oturmalar tespit edilmektedir. Japon “Tane Çapı Dağılımı - Standart Penetrasyon (N) Sayısı” Yöntemi kullanılarak bulunan düzeltilmiş N sayıları bölüm 4.3.3.2’de elde edilen $(CSR)_{7.5}$ değerleri ile birlikte Şekil 4.19’da yerine konularak hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri bulunmuştur. Sonuçlar Şekil 4.20 ve Çizelge 4.19’da gösterilmektedir. Sıvılaşmadan dolayı dalgakıran merkezindeki toplam oturma miktarı 19.90 cm. olarak bulunmuştur.



Şekil 4.20 Durum “a” için hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri

Çizelge 4.19 Durum "a" için sıvılaşma oturması miktarı

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	CSR	r_m	CSR _{7.5}	Düzeltilmiş N Değeri $N_{0.66}$	Hacimsel Şekil Değiştirme (%)	Tabaka Kalınlığı (m)	Sıvılaşma oturması (m)
Siltli orta- ince kum	0.50	0.3063	1.0440	0.2934	6.9040	3.50	1.25	0.0438
	2.00	0.3072	1.0440	0.2943	10.3232	2.60	1.50	0.0390
	3.50	0.3077	1.0440	0.2948	12.7121	2.30	1.50	0.0345
	5.00	0.2949	1.0440	0.2824	13.9317	2.00	1.50	0.0300
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	0.2756	1.0440	0.2640	19.3687	1.50	1.50	0.0225
	8.00	0.2656	1.0440	0.2544	20.2452	1.30	1.50	0.0195
	9.50	0.2537	1.0440	0.2430	21.6387	0.50	1.50	0.0075
	11.00	0.2372	1.0440	0.2272	23.1375	0.15	1.50	0.0023
	12.50	0.2246	1.0440	0.2151	25.2984	0.00	2.25	0.0000

14.00

0.1990

4.3.4 Seed vd. (1984-1985) Yöntemi

Adım 1) Tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)’nin bulunması

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı dalgakıran kesitinde daha önce belirlenen her bölge için

denklem 4.15 kullanılarak istenilen derinliklere göre elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24’de gösterilmektedir.

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma_v') = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_v / \sigma_v') r_d \quad (4.5)$$

burada;

τ_{av} : Ortalama kayma gerilmesi

a_{max} : Maksimum yatay yer ivmesi

g : Yerçekimi ivmesi

σ_v : Toplam düşey gerilme

σ_v' : Efektif düşey gerilme

r_d : Gerilme düzeltme katsayısıdır.

$$r_d = 1.0 - 0.00765 z \quad (z \leq 9,15m) \quad (4.6)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 z \quad (9,15m \leq z \leq 23m) \quad (4.7)$$

Adım 2) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı, C_E ’nin bulunması

Bu çalışmada SPT çekicinden numune alıcıya iletilen enerji oranı yüzdesi 0.6 olarak kabul edilmiştir (C_E : 0.6). bölüm 3.2, Çizelge 3.2’de donut şahmerdan için verilen 0.5 – 1.0 aralığı içerisinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bu oran seçilmiştir.

Adım 3) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_B ‘nin bulunması

SPT için kullanılan sondaj aletinin çapına göre bölüm 3.3, Çizelge 3.2’den C_B düzeltme katsayısı 1.00 olarak alınmıştır.

Adım 4) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_S ‘nin bulunması

Standart membranlı numune alıcıları için geçerli olamayan bu düzeltme işlemi için bölüm 3.2, Çizelge 3.5’de belirtildiği gibi C_S 1.00 olarak alınmıştır.

Adım 5) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_R ‘nin bulunması

Sondaj tij uzunluğuna göre bölüm 3.2, Çizelge 3.4 kullanılarak tayin edilen C_R düzeltme katsayısı belirtilen aralıklarda her bir durum için derinliğe göre hesaplanmış olup sondaj derinlikleri bölüm 4.2, Şekil 4.5’de görülmektedir. Sonuçlar eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranlarının bulunduğu Çizelge 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’da verilmektedir.

Çizelge 4.20 Durum "a" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	Maksimum İvme, amak (g)	rd	CSR
Siltli orta-ince kum	6.50	0.50	7	16	68.0950	121.0000	0.2662	0.9962	0.3063
	8.00	2.00	11	16	77.3800	141.5000	0.2625	0.9847	0.3072
	9.50	3.50	14	16	84.6650	162.0000	0.2542	0.9732	0.3077
	11.00	5.00	16	18	94.0000	184.5000	0.2403	0.9618	0.2949
Az çakıllı orta- ince kum	12.50	6.50	23	18	104.0000	208.0000	0.2231	0.9503	0.2756
	14.00	8.00	25	18	114.0000	231.5000	0.2144	0.9388	0.2656
	15.50	9.50	28	18	126.8050	260.0000	0.2068	0.9204	0.2537
	17.00	11.00	31	19	137.0900	284.7000	0.1996	0.8803	0.2372
	18.50	12.50	35	19	147.3750	309.9000	0.1955	0.8403	0.2246
Siltli kil	20.20	14.20	16	19	159.2980	338.9000	0.1936	0.7949	0.2128
	23.50	17.50	25	19	184.3250	398.3000	0.1899	0.7068	0.1885
	26.30	20.30	35	19	205.2570	431.7000	0.1869	0.6320	0.1614

Çizelge 4.21 Durum "b1" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m3)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	Maksimum İvme, amak (g)	rd	CSR
Siltli orta-ince kum	7.99	0.50	7	16	33.9654	56.5829	0.3104	0.9962	0.3349
	9.49	2.00	11	16	46.1548	85.1538	0.3054	0.9847	0.3606
	10.99	3.50	14	16	58.3415	113.7204	0.2950	0.9732	0.3638
	12.49	5.00	16	18	73.5241	152.2805	0.2783	0.9618	0.3604
Az çakıllı orta- ince kum	13.99	6.50	23	18	88.7020	183.8333	0.2598	0.9503	0.3326
	15.49	8.00	25	18	103.8751	215.3785	0.2510	0.9388	0.3176
	16.99	9.50	28	18	119.0438	246.9167	0.2406	0.9204	0.2986
	18.49	11.00	31	19	135.7085	289.4488	0.2276	0.8803	0.2777
	19.99	12.50	35	19	152.3699	322.4756	0.2159	0.8403	0.2495
Siltli kil	21.69	14.20	16	19	171.2494	359.9005	0.2165	0.7949	0.2351
	24.99	17.50	25	19	207.8897	432.5362	0.2156	0.7068	0.2061
	27.79	20.30	35	19	238.9722	494.1567	0.2134	0.6320	0.1813

Çizelge 4.22 Durum "b2" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m3)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	Maksimum İvme, amak (g)	rd	CSR
Siltli orta-ince kum	8.55	0.50	7	16	24.0576	38.9449	0.3087	0.9962	0.3235
	10.05	2.00	11	16	37.1641	68.5861	0.3050	0.9847	0.3603
	11.55	3.50	14	16	50.2595	134.7970	0.2962	0.9732	0.5025
	13.05	5.00	16	18	66.3428	209.6149	0.2809	0.9618	0.5548
Az çakıllı orta- ince kum	14.55	6.50	23	18	82.4162	290.0252	0.2628	0.9503	0.5713
	16.05	8.00	25	18	98.4824	376.0174	0.2517	0.9388	0.5863
	17.55	9.50	28	18	114.5437	467.5840	0.2413	0.9204	0.5892
	19.05	11.00	31	19	132.1014	566.2199	0.2303	0.8803	0.5649
	20.55	12.50	35	19	149.6565	670.4211	0.2195	0.8403	0.5371
Siltli kil	22.25	14.20	16	19	169.5501	784.7265	0.2123	0.7949	0.5077
	25.55	17.50	25	19	208.1623	941.6626	0.2186	0.7068	0.4543
	28.35	20.30	35	19	238.9722	1089.0986	0.2145	0.6320	0.4015

Çizelge 4.23 Durum "c" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	Maksimum İvme, a_{max} (g)	rd	CSR
Siltli orta-ince kum	4.55	0.50	7	16	6.1952	33.7446	0.2903	0.9962	1.0239
	6.05	2.00	11	16	17.1208	60.7844	0.2880	0.9847	0.6545
	7.55	3.50	14	16	32.7767	82.1457	0.2828	0.9732	0.4483
	9.05	5.00	16	18	53.0592	108.9609	0.2734	0.9618	0.3509
Az çakıllı orta- ince kum	10.55	6.50	23	18	74.9669	141.2254	0.2587	0.9503	0.3011
	12.05	8.00	25	18	98.4992	178.9368	0.2452	0.9388	0.2718
	13.55	9.50	28	18	123.6557	222.0941	0.2334	0.9204	0.2507
	15.05	11.00	31	19	151.9362	270.6966	0.2232	0.8803	0.2275
	16.55	12.50	35	19	181.8405	324.7436	0.2147	0.8403	0.2094
Siltli kil	18.25	14.20	16	19	215.4230	388.5527	0.2081	0.7949	0.1939
	21.55	17.50	25	19	267.2815	499.5034	0.2146	0.7068	0.1842
	24.35	20.30	35	19	317.5757	613.7897	0.2119	0.6320	0.1683

Çizelge 4.24 Durum "d" için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)'nin bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	Maksimum İvme, amak (g)	rd	CSR
Siltli orta-ince kum	9.10	0.50	7	16	3.1000	51.0500	0.2991	0.9962	3.1897
	10.60	2.00	11	16	12.3800	75.0500	0.2968	0.9847	1.1515
	12.10	3.50	14	16	21.6700	99.0500	0.2915	0.9732	0.8428
	13.60	5.00	16	18	33.9500	120.0500	0.2823	0.9618	0.6241
Az çakıllı orta- ince kum	15.10	6.50	23	18	46.2400	147.0500	0.2700	0.9503	0.5303
	16.60	8.00	25	18	58.5200	174.0500	0.2587	0.9388	0.4696
	18.10	9.50	28	18	70.8100	201.0500	0.2489	0.9204	0.4227
	19.60	11.00	31	19	84.5900	224.0500	0.2397	0.8803	0.3632
	21.10	12.50	35	19	98.3800	252.5500	0.2290	0.8403	0.3211
Siltli kil	22.80	14.20	16	19	114.0000	284.8500	0.2151	0.7949	0.2777
	26.10	17.50	25	19	144.3300	347.5500	0.2104	0.7068	0.2327
	28.90	20.30	35	19	170.0600	400.7500	0.2147	0.6320	0.2078

Adım 6) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_N 'nin bulunması

Efektif basınç değerlerini 1 atmosferlik referans basınca normalize eden C_N katsayıları aşağıdaki bağıntılar kullanılarak tayin edilmiştir:

$$Q_v' < 200 \text{ kPa için; } C_N = (P_a / Q_v')^{0.5} \quad (4.8)$$

$$200 \text{ kPa} < Q_v' < 300 \text{ kPa için; } C_N = 2.2 / (1.2 + Q_v' / P_a) \quad (4.9)$$

C_N için üst sınır değer 1.7 olarak tanımlanmıştır.

Her bir durum için sonuçlar eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranlarının bulunduğu Çizelge 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da derinliğe göre verilmektedir.

Adım 7) SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

Bölüm 3.2, denklem 3.9'a uygun olarak SPT N sayılarının prosedür düzeltmeleri yapılmış ve $(N)_{l-60}$ değerleri Çizelge 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da derinliğe göre verilmiştir.

Adım 8) İnce malzeme oranı düzeltmelerinin yapılması

Kum tabakadan alınmış olan zemin örneklerinden elde edilen verilere göre (Dadaşbilge ve Mut, 1974) ince malzeme oranları aşağıdaki gibidir;

- ✓ 0-5 metreler arası $FC = \%15$
- ✓ 5-14 metreler arası $FC \leq \%5$
- ✓ 14 metre ve sonrası $FC \geq \%90$

Prosedür düzeltmeleri sonucunda elde edilen $(N)_{l-60}$ değerleri yukarıda belirtilen ince malzeme oranlarına göre aşağıdaki katsayılar ile çarpılarak yeniden düzeltilmiş ve $(N)_{l-60 CS}$ değerleri bulunmuştur. (bkz. bölüm 3.2, madde 3.2.2.7).

$$0-5 \text{ metreler arası } \alpha = 2.498, \beta = 1.048 \quad (FC = 15)$$

$$5-14 \text{ metreler arası } \alpha = 0, \beta = 1$$

$$14 \text{ metre ve sonrası } \alpha = 5, \beta = 1.2$$

Sonuçlar Çizelge 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da verilmektedir.

Adım 9) Eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması

Tüm düzeltmeler yapıldıktan sonra elde edilen $(N)_{I-60CS}$ değerleri bölüm 3.2, denklem 3.13’de %5 ince malzeme içeriği için tanımlanan denkleminde yerine konularak eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranları ($CRR_{7.5}$) bulunmuştur.

Her bir dalgakıran bölgesi için derinliğe bağlı olarak tespit edilen dayanım oranları Çizelge 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’da verilmektedir.

Çizelge 4.25 Durum "a" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{L-60}	(N) _{L-60 CS}	CRR _{7.5}
						C _E	C _B	C _S	C _R *	C _N			
Siltli orta-ince kum	6.50	0.50	7	16	68.0950	0.60	1.00	1.00	0.85	1.2118	4.3262	7.0319	0.0879
	8.00	2.00	11	16	77.3800	0.60	1.00	1.00	0.95	1.1368	7.1278	9.9679	0.1128
	9.50	3.50	14	16	84.6650	0.60	1.00	1.00	0.95	1.0868	8.6726	11.5869	0.1274
	11.00	5.00	16	18	94.0000	0.60	1.00	1.00	1.00	1.0314	9.9016	12.8749	0.1394
Az çakıllı orta-ince kum	12.50	6.50	23	18	104.0000	0.60	1.00	1.00	1.00	0.9806	13.5320	13.5320	0.1456
	14.00	8.00	25	18	114.0000	0.60	1.00	1.00	1.00	0.9366	14.0488	14.0488	0.1506
	15.50	9.50	28	18	126.8050	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8880	14.9190	14.9190	0.1592
	17.00	11.00	31	19	137.0900	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8541	15.8858	15.8858	0.1691
	18.50	12.50	35	19	147.3750	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8237	17.2985	17.2985	0.1841
Siltli kil	20.20	14.20	16	19	159.2980	0.60	1.00	1.00	1.00	0.7923	7.6062	14.1274	0.1514
	23.50	17.50	25	19	184.3250	0.60	1.00	1.00	1.00	0.7366	11.0484	18.2581	0.1947
	26.30	20.30	35	19	205.2570	0.60	1.00	1.00	1.00	0.6764	14.2042	22.0450	0.2427

* Sondaj sırasındaki tij uzunlukları baz alınarak hesaplanmaktadır, dalgakıran altında kalan noktaları işaret eden “Seviye” hesaplamının dışındadır.

Çizelge 4.26 Durum "b1" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	(N) _{I-60 CS}	CRR _{7.5}
						C _E	C _B	C _S	C _R *	C _N			
Siltli orta-ince kum	7.99	0.50	7	16	33.9654	0.60	1.00	1.00	0.85	1.7000	6.0690	8.8583	0.1032
	9.49	2.00	11	16	46.1548	0.60	1.00	1.00	0.95	1.4719	9.2291	12.1701	0.1328
	10.99	3.50	14	16	58.3415	0.60	1.00	1.00	0.95	1.3092	10.4475	13.4470	0.1448
	12.49	5.00	16	18	73.5241	0.60	1.00	1.00	1.00	1.1662	11.1958	14.2312	0.1524
Az çakıllı orta-ince kum	13.99	6.50	23	18	88.7020	0.60	1.00	1.00	1.00	1.0618	14.6525	14.6525	0.1566
	15.49	8.00	25	18	103.8751	0.60	1.00	1.00	1.00	0.9812	14.7176	14.7176	0.1572
	16.99	9.50	28	18	119.0438	0.60	1.00	1.00	1.00	0.9165	15.3977	15.3977	0.1641
	18.49	11.00	31	19	135.7085	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8584	15.9665	15.9665	0.1699
	19.99	12.50	35	19	152.3699	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8101	17.0126	17.0126	0.1810
Siltli kil	21.69	14.20	16	19	171.2494	0.60	1.00	1.00	1.00	0.7642	7.3360	13.8031	0.1483
	24.99	17.50	25	19	207.8897	0.60	1.00	1.00	1.00	0.6710	10.0644	17.0772	0.1817
	27.79	20.30	35	19	238.9722	0.60	1.00	1.00	1.00	0.6129	12.8701	20.4441	0.2210

* Sondaj sırasındaki tij uzunlukları baz alınarak hesaplanmaktadır, dalgakıran altında kalan noktaları işaret eden “Seviye” hesaplamının dışındadır.

Çizelge 4.27 Durum "b2" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye	Derinlik	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{L-60}	(N) _{L-60 CS}	CRR _{7.5}
	(-m)	(m)				C _E	C _B	C _S	C _R *	C _N			
Siltli orta-ince kum	8.55	0.50	7	16	24.0576	0.60	1.00	1.00	0.85	1.7000	6.0690	8.8583	0.1032
	10.05	2.00	11	16	37.1641	0.60	1.00	1.00	0.95	1.6404	10.2850	13.2767	0.1432
	11.55	3.50	14	16	50.2595	0.60	1.00	1.00	0.95	1.4106	11.2563	14.2946	0.1530
	13.05	5.00	16	18	66.3428	0.60	1.00	1.00	1.00	1.2277	11.7862	14.8500	0.1586
Az çakıllı orta-ince kum	14.55	6.50	23	18	82.4162	0.60	1.00	1.00	1.00	1.1015	15.2010	15.2010	0.1621
	16.05	8.00	25	18	98.4824	0.60	1.00	1.00	1.00	1.0077	15.1151	15.1151	0.1612
	17.55	9.50	28	18	114.5437	0.60	1.00	1.00	1.00	0.9344	15.6973	15.6973	0.1671
	19.05	11.00	31	19	132.1014	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8701	16.1830	16.1830	0.1722
	20.55	12.50	35	19	149.6565	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8174	17.1661	17.1661	0.1826
Siltli kil	22.25	14.20	16	19	169.5501	0.60	1.00	1.00	1.00	0.7680	7.3726	13.8472	0.1487
	25.55	17.50	25	19	208.1623	0.60	1.00	1.00	1.00	0.6704	10.0560	17.0672	0.1816
	28.35	20.30	35	19	238.9722	0.60	1.00	1.00	1.00	0.6129	12.8701	20.4441	0.2210

* Sondaj sırasındaki tij uzunlukları baz alınarak hesaplanmaktadır, dalgakıran altında kalan noktaları işaret eden “Seviye” hesaplamının dışındadır.

Çizelge 4.28 Durum "c" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{L-60}	(N) _{L-60 CS}	CRR _{7.5}
						C _E	C _B	C _S	C _R *	C _N			
Siltli orta-ince kum	4.55	0.50	7	16	6.1952	0.60	1.00	1.00	0.85	1.7000	6.0690	8.8583	0.1032
	6.05	2.00	11	16	17.1208	0.60	1.00	1.00	0.95	1.7000	10.6590	13.6686	0.1469
	7.55	3.50	14	16	32.7767	0.60	1.00	1.00	0.95	1.7000	13.5660	16.7152	0.1778
	9.05	5.00	16	18	53.0592	0.60	1.00	1.00	1.00	1.3728	13.1793	16.3099	0.1735
Az çakıllı orta-ince kum	10.55	6.50	23	18	74.9669	0.60	1.00	1.00	1.00	1.1550	15.9384	15.9384	0.1696
	12.05	8.00	25	18	98.4992	0.60	1.00	1.00	1.00	1.0076	15.1138	15.1138	0.1612
	13.55	9.50	28	18	123.6557	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8993	15.1078	15.1078	0.1611
	15.05	11.00	31	19	151.9362	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8113	15.0898	15.0898	0.1610
	16.55	12.50	35	19	181.8405	0.60	1.00	1.00	1.00	0.7416	15.5731	15.5731	0.1659
Siltli kil	18.25	14.20	16	19	215.4230	0.60	1.00	1.00	1.00	0.6559	6.2965	12.5558	0.1364
	21.55	17.50	25	19	267.2815	0.60	1.00	1.00	1.00	0.5681	8.5209	15.2251	0.1623
	24.35	20.30	35	19	317.5757	0.60	1.00	1.00	1.00	0.5028	10.5582	17.6698	0.1881

* Sondaj sırasındaki tij uzunlukları baz alınarak hesaplanmaktadır, dalgakıran altında kalan noktaları işaret eden “Seviye” hesaplamasının dışındadır.

Çizelge 4.29 Durum "d" için eşdeğer tekrarlı kayma gerilmesi dayanma oranının ($CRR_{7.5}$) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	(N) _{I-60 CS}	CRR _{7.5}
						C _E	C _B	C _S	C _R *	C _N			
Siltli orta-ince kum	9.10	0.50	7	16	3.1000	0.60	1.00	1.00	0.85	1.7000	6.0690	8.8583	0.1032
	10.60	2.00	11	16	12.3800	0.60	1.00	1.00	0.95	1.7000	10.6590	13.6686	0.1469
	12.10	3.50	14	16	21.6700	0.60	1.00	1.00	0.95	1.7000	13.5660	16.7152	0.1778
	13.60	5.00	16	18	33.9500	0.60	1.00	1.00	1.00	1.7000	16.3200	19.6014	0.2105
Az çakıllı orta-ince kum	15.10	6.50	23	18	46.2400	0.60	1.00	1.00	1.00	1.4706	20.2941	20.2941	0.2191
	16.60	8.00	25	18	58.5200	0.60	1.00	1.00	1.00	1.3072	19.6083	19.6083	0.2106
	18.10	9.50	28	18	70.8100	0.60	1.00	1.00	1.00	1.1884	19.9647	19.9647	0.2150
	19.60	11.00	31	19	84.5900	0.60	1.00	1.00	1.00	1.0873	20.2234	20.2234	0.2182
	21.10	12.50	35	19	98.3800	0.60	1.00	1.00	1.00	1.0082	21.1722	21.1722	0.2305
Siltli kil	22.80	14.20	16	19	114.0000	0.60	1.00	1.00	1.00	0.9366	8.9912	15.7895	0.1681
	26.10	17.50	25	19	144.3300	0.60	1.00	1.00	1.00	0.8324	12.4857	19.9828	0.2152
	28.90	20.30	35	19	170.0600	0.60	1.00	1.00	1.00	0.7668	16.1034	24.3241	0.2791

* Sondaj sırasındaki tij uzunlukları baz alınarak hesaplanmaktadır, dalgakıran altında kalan noktaları işaret eden “Seviye” hesaplananın dışındadır.

Adım 10) Deprem şiddeti düzeltme katsayısının (MSF) bulunması

Doğu Marmara Depremi yaklaşık 177 km uzunluğunda bir fay hattında sağ-yanal hareket oluşturmuş 7.4 büyüklüğünde bir depremdir. 7.4 şiddeti için bu çalışmada Idriss(3) ve Andrus&Stokoe(7) tarafından verilmiş olan değerler arasındaki ortalama sayı baz alınmıştır (bkz. bölüm 3.2, Çizelge 3.6).

✓ Idriss:	1.038
✓ Andrus&Stokoe:	1.050
✓ Ortalama Sayı:	1.044

Adım 11) Yüksek efektif basınç değerleri için düzeltme faktörlerinin($K\sigma$) bulunması

Arazide yapılan zemin etütleri sonucunda elde edilmiş olan rölatif yoğunluk değerlerinin esas alındığı ve bölüm 3.2.5, Şekil 3.11’de belirtilen esaslara göre hesaplanmış olan yüksek efektif basınç düzeltme katsayıları bu çalışmada aynen kullanılmıştır. Sıvılaşma potansiyellerinin değerlendirildiği Çizelge 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34’de sonuçlar verilmektedir.

Adım 12) Sonuç, sıvılaşma potansiyellerinin bulunması

İncelenen durumlara ait sıvılaşma potansiyelleri “Güvenlik Faktörü” (FS: Factor of Safety) yani sıvılaşma dayanımının sıvılaşmaya yol açacak sismik etkiye oranı şeklinde Çizelge 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34’de verilmektedir. Bölüm 3.2’de açıklandığı gibi bu oranın 1’den küçük olduğu durumlar için sıvılaşmanın oluşacağı düşünülmektedir.

Çizelge 4.30 Durum "a" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR	CRR _{7.5}	MSF	K σ	FS	Değerlendirme
Siltli orta-ince kum	0.50	68.0950	0.3063	0.0879	1.044		0.2997	Sıvılaşır
	2.00	77.3800	0.3072	0.1128	1.044		0.3834	Sıvılaşır
	3.50	84.6650	0.3077	0.1274	1.044		0.4321	Sıvılaşır
	5.00	94.0000	0.2949	0.1394	1.044		0.4935	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	104.0000	0.2756	0.1456	1.044	0.9028	0.4981	Sıvılaşır
	8.00	114.0000	0.2656	0.1506	1.044	0.8578	0.5079	Sıvılaşır
	9.50	126.8050	0.2537	0.1592	1.044	0.9192	0.6024	Sıvılaşır
	11.00	137.0900	0.2372	0.1691	1.044	0.8980	0.6684	Sıvılaşır
	12.50	147.3750	0.2246	0.1841	1.044	0.8787	0.7519	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	159.2980	0.2128	0.1514	1.044	0.8584	0.6378	Sıvılaşır
	17.50	184.3250	0.1885	0.1947	1.044	0.8216	0.8861	Sıvılaşır
	20.30	205.2570	0.1614	0.2427	1.044	0.7955	1.2483	Sıvılaşmaz

Çizelge 4.31 Durum "b1" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR	CRR _{7.5}	MSF	K σ	FS	Değerlendirme
Siltli orta-ince kum	0.50	33.9654	0.3349	0.1032	1.044		0.3217	Sıvılaşır
	2.00	46.1548	0.3606	0.1328	1.044		0.3843	Sıvılaşır
	3.50	58.3415	0.3638	0.1448	1.044		0.4156	Sıvılaşır
	5.00	73.5241	0.3604	0.1524	1.044		0.4416	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	88.7020	0.3326	0.1566	1.044		0.4916	Sıvılaşır
	8.00	103.8751	0.3176	0.1572	1.044	0.9759	0.5044	Sıvılaşır
	9.50	119.0438	0.2986	0.1641	1.044	0.9368	0.5374	Sıvılaşır
	11.00	135.7085	0.2777	0.1699	1.044	0.9007	0.5753	Sıvılaşır
	12.50	152.3699	0.2495	0.1810	1.044	0.8699	0.6587	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	171.2494	0.2351	0.1483	1.044	0.8400	0.5531	Sıvılaşır
	17.50	207.8897	0.2061	0.1817	1.044	0.7925	0.7293	Sıvılaşır
	20.30	238.9722	0.1813	0.2210	1.044	0.7601	0.9674	Sıvılaşır

Çizelge 4.32 Durum "b2" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR	CRR _{7.5}	MSF	K σ	FS	Değerlendirme
Siltli orta-ince kum	0.50	24.0576	0.3235	0.1032	1.044		0.3330	Sıvılaşır
	2.00	37.1641	0.3603	0.1432	1.044		0.4149	Sıvılaşır
	3.50	50.2595	0.5025	0.1530	1.044		0.3180	Sıvılaşır
	5.00	66.3428	0.5548	0.1586	1.044		0.2984	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	82.4162	0.5713	0.1621	1.044		0.2962	Sıvılaşır
	8.00	98.4824	0.5863	0.1612	1.044		0.2871	Sıvılaşır
	9.50	114.5437	0.5892	0.1671	1.044	0.9477	0.2807	Sıvılaşır
	11.00	132.1014	0.5649	0.1722	1.044	0.9080	0.2889	Sıvılaşır
	12.50	149.6565	0.5371	0.1826	1.044	0.8746	0.3104	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	169.5501	0.5077	0.1487	1.044	0.8425	0.2576	Sıvılaşır
	17.50	208.1623	0.4543	0.1816	1.044	0.7922	0.3305	Sıvılaşır
	20.30	238.9722	0.4015	0.2210	1.044	0.7955	0.4571	Sıvılaşır

Çizelge 4.33 Durum "c" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR	CRR _{7.5}	MSF	K σ	FS	Değerlendirme
Siltli orta-ince kum	0.50	6.1952	1.0239	0.1032	1.044		0.1052	Sıvılaşır
	2.00	17.1208	0.6545	0.1469	1.044		0.2344	Sıvılaşır
	3.50	32.7767	0.4483	0.1778	1.044		0.4140	Sıvılaşır
	5.00	53.0592	0.3509	0.1735	1.044		0.5162	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	74.9669	0.3011	0.1696	1.044		0.5882	Sıvılaşır
	8.00	98.4992	0.2718	0.1612	1.044		0.6191	Sıvılaşır
	9.50	123.6557	0.2507	0.1611	1.044	0.9262	0.6214	Sıvılaşır
	11.00	151.9362	0.2275	0.1610	1.044	0.8707	0.6430	Sıvılaşır
	12.50	181.8405	0.2094	0.1659	1.044	0.8250	0.6821	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	215.4230	0.1939	0.1364	1.044	0.7841	0.5757	Sıvılaşır
	17.50	267.2815	0.1842	0.1623	1.044	0.7350	0.6762	Sıvılaşır
	20.30	317.5757	0.1683	0.1881	1.044	0.6979	0.8147	Sıvılaşır

Çizelge 4.34 Durum "d" için sıvılaşma potansiyelinin bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR	CRR _{7.5}	MSF	K σ	FS	Değerlendirme
Siltli orta-ince kum	0.50	3.1000	3.1897	0.1032	1.044		0.0338	Sıvılaşır
	2.00	12.3800	1.1515	0.1469	1.044		0.1332	Sıvılaşır
	3.50	21.6700	0.8428	0.1778	1.044		0.2202	Sıvılaşır
	5.00	33.9500	0.6241	0.2105	1.044		0.3521	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	46.2400	0.5303	0.2191	1.044		0.4314	Sıvılaşır
	8.00	58.5200	0.4696	0.2106	1.044		0.4682	Sıvılaşır
	9.50	70.8100	0.4227	0.2150	1.044		0.5309	Sıvılaşır
	11.00	84.5900	0.3632	0.2182	1.044		0.6272	Sıvılaşır
	12.50	98.3800	0.3211	0.2305	1.044		0.7496	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	114.0000	0.2777	0.1681	1.044	0.9500	0.6004	Sıvılaşır
	17.50	144.3300	0.2327	0.2152	1.044	0.8800	0.8495	Sıvılaşır
	20.30	170.0600	0.2078	0.2791	1.044	0.8400	1.1779	Sıvılaşmaz

Adım 13) Sıvılaşma oturmasının bulunması

Bölüm 4.3.3.1, Adım 7’de açıklanan yöntem izlenerek düzeltilmiş $(N)_{1-60}$ CS değerleri ile $(CSR)_{7.5}$ değerleri Şekil 4.19’da grafikte yerine konulmuş ve hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri bulunmuştur. Daha sonra sıvılaşmadan dolayı meydana gelen oturmalar tespit edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.21 ve Çizelge 4.35’de gösterilmektedir. Sıvılaşmadan dolayı dalgakıran merkezindeki toplam oturma miktarı 29.28 cm.’dir.

4.3.4.1 Yeni SPT Tabanlı Sıvılaşma Bağlılıkları ve Kullanma Yöntemi (Çetin ve Seed, 2000, 2001)

Adım 1) Deprem şiddetine bağlı süre düzeltme faktörlerinin (r_d) bulunması

Yeni r_d değerleri derinliğe (h), deprem büyüklüğüne (M_w), maksimum yer inmesine (a_{mak}) ve arazi rijitliğine ($V_{s,40}^*$: 40 feet'teki yani 12 metredeki zemin ortalama kayma dalga hızının feet/saniye biriminden ifadesi) bağlı olarak hesaplanmıştır (bölüm 3.3.1.2, denklem 3.19). Bu çalışmada $M_w = 7.4$ olup $V_{s,40}^*$ için Bardet vd., (2000) tarafından EERA sismik analiz programı kullanılarak bulunan ortalama V_s değerleri baz alınmış ve her bölge için ortak kullanılmıştır. Bölüm 3.3.1.2, Şekil 3.12 ve denklem 3.19'da yer alan $\Phi 1$ standart sapma değerleri hesaplamalara dahil edilmemiş, ortalama r_d eğrilerine karşılık gelen değerler tercih edilmiştir.

Sonuçlar arazi denk üniform tekrarlı gerilme oranlarının (CSR_{denk}) hesaplandığı Çizelge 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40'da gösterilmektedir.

Adım 2) Maksimum tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{mak}) bulunması

Bulunan yeni r_d değerleri bölüm 3.3.1.3, denklem 3.20'de yerine konularak her derinlik için CSR_{mak} elde edilmiştir. Sonuçlar arazi denk üniform tekrarlı gerilme oranlarının (CSR_{denk}) hesaplandığı Çizelge 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40'da gösterilmektedir.

Adım 3) Üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması

Bulunan CSR_{mak} değerleri bölüm 3.3.1.4, denklem 3.21'de yerine konularak her derinlik için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranı CSR_{denk} bulunmuştur. Sonuçlar arazi denk üniform tekrarlı gerilme oranlarının (CSR_{denk}) hesaplandığı Çizelge 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40'da gösterilmektedir.

Adım 4) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı (C_N) 'nin bulunması, Düşey efektif gerilme düzeltmesi

Arazide ölçülen tüm SPT N değerleri 1 atm.'lik efektif düşey gerilme altında ölçüleceği varsayılan N_1 değerine bölüm 3.3.2.1, denklem 3.23 kullanılarak çevrilmektedir. Sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45'de gösterilmektedir.

Adım 5) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_R 'nin bulunması

Sondaj tij uzunluğuna göre bölüm 3.3.2.2, Çizelge 3.7'de belirtilen esaslara uygun olarak C_R düzeltme katsayıları belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45'de verilmiştir.

Çizelge 4.36 Durum "a" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	Derinlik (ft)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	M_W	Maksimum İvme, amak (g)	(Vs)ort	rd	CSRmak	CSRdenk
Siltli orta- ince kum	6.50	0.50	1.64	68.0950	121.0000	7.4	0.2662	188.5482	0.9362	0.4428	0.2878
	8.00	2.00	6.56	77.3800	141.5000		0.2625	213.9351	0.7799	0.3744	0.2433
	9.50	3.50	11.48	84.6650	162.0000		0.2542	227.1159	0.6566	0.3194	0.2076
	11.00	5.00	16.40	94.0000	184.5000		0.2403	228.0764	0.5568	0.2626	0.1707
Az çakıllı orta-ince kum	12.50	6.50	21.33	104.0000	208.0000		0.2231	253.5602	0.5072	0.2263	0.1471
	14.00	8.00	26.25	114.0000	231.5000		0.2144	255.4328	0.4590	0.1998	0.1299
	15.50	9.50	31.17	126.8050	260.0000		0.2068	260.5752	0.4302	0.1824	0.1186
	17.00	11.00	36.09	137.0900	284.7000		0.1996	263.0665	0.4116	0.1706	0.1109
	18.50	12.50	41.01	147.3750	309.9000		0.1955	270.6715	0.4028	0.1656	0.1077
Siltli kil	20.20	14.20	46.59	159.2980	338.9000		0.1936	202.8697	0.3654	0.1504	0.0978
	23.50	17.50	57.41	184.3250	398.3000		0.1899	229.1748	0.3701	0.1519	0.0987
	26.30	20.30	66.60	205.2570	431.7000		0.1869	250.7018	0.3750	0.1474	0.0958

Çizelge 4.37 Durum "b1" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	Derinlik (ft)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	M_W	Maksimum İvme, a_{mak} (g)	(Vs)ort	rd	CSR_{mak}	CSR_{denk}
Siltli orta- ince kum	7.99	0.50	1.64	33.9654	56.5829	7.4	0.3104	188.5482	0.9351	0.4836	0.3143
	9.49	2.00	6.56	46.1548	85.1538		0.3054	213.9351	0.7763	0.4374	0.2843
	10.99	3.50	11.48	58.3415	113.7204		0.2950	227.1159	0.6513	0.3746	0.2435
	12.49	5.00	16.40	73.5241	152.2805		0.2783	228.0764	0.5504	0.3173	0.2062
Az çakıllı orta-ince kum	13.99	6.50	21.33	88.7020	183.8333		0.2598	253.5602	0.5007	0.2696	0.1752
	15.49	8.00	26.25	103.8751	215.3785		0.2510	255.4328	0.4519	0.2352	0.1529
	16.99	9.50	31.17	119.0438	246.9167		0.2406	260.5752	0.4233	0.2113	0.1373
	18.49	11.00	36.09	135.7085	289.4488		0.2276	263.0665	0.4058	0.1969	0.1280
	19.99	12.50	41.01	152.3699	322.4756		0.2159	270.6715	0.3985	0.1821	0.1183
Siltli kil	21.69	14.20	46.59	171.2494	359.9005		0.2165	202.8697	0.3595	0.1636	0.1063
	24.99	17.50	57.41	207.8897	432.5362		0.2156	229.1748	0.3640	0.1633	0.1061
	27.79	20.30	66.60	238.9722	494.1567		0.2134	250.7018	0.3690	0.1628	0.1058

Çizelge 4.38 Durum "b2" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	Derinlik (ft)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	M_w	Maksimum İvme, amak (g)	(Vs)ort	rd	CSRmak	CSRdenk
Siltli orta- ince kum	8.55	0.50	1.64	24.0576	38.9449	7.4	0.3087	188.5482	0.9351	0.4673	0.3037
	10.05	2.00	6.56	37.1641	68.5861		0.3050	213.9351	0.7763	0.4370	0.2841
	11.55	3.50	11.48	50.2595	134.7970		0.2962	227.1159	0.6512	0.5172	0.3362
	13.05	5.00	16.40	66.3428	209.6149		0.2809	228.0764	0.5500	0.4881	0.3173
Az çakıllı orta-ince kum	14.55	6.50	21.33	82.4162	290.0252		0.2628	253.5602	0.5002	0.4626	0.3007
	16.05	8.00	26.25	98.4824	376.0174		0.2517	255.4328	0.4518	0.4341	0.2821
	17.55	9.50	31.17	114.5437	467.5840		0.2413	260.5752	0.4232	0.4168	0.2709
	19.05	11.00	36.09	132.1014	566.2199		0.2303	263.0665	0.4052	0.4000	0.2600
	20.55	12.50	41.01	149.6565	670.4211		0.2195	270.6715	0.3978	0.3912	0.2543
	22.25	14.20	46.59	169.5501	784.7265		0.2123	202.8697	0.3606	0.3544	0.2303
Siltli kil	25.55	17.50	57.41	208.1623	941.6626		0.2186	229.1748	0.3633	0.3593	0.2335
	28.35	20.30	66.60	238.9722	1089.0986		0.2145	250.7018	0.3688	0.3605	0.2343

Çizelge 4.39 Durum "c" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	Derinlik (ft)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	M_W	Maksimum İvme, a_{mak} (g)	(Vs)ort	rd	CSR_{mak}	CSR_{denk}
Siltli orta- ince kum	4.55	0.50	1.64	6.1952	33.7446	7.4	0.2903	188.5482	0.9356	1.4794	0.9616
	6.05	2.00	6.56	17.1208	60.7844		0.2880	213.9351	0.7778	0.7953	0.5170
	7.55	3.50	11.48	32.7767	82.1457		0.2828	227.1159	0.6529	0.4627	0.3008
	9.05	5.00	16.40	53.0592	108.9609		0.2734	228.0764	0.5513	0.3094	0.2011
Az çakıllı orta-ince kum	10.55	6.50	21.33	74.9669	141.2254		0.2587	253.5602	0.5009	0.2441	0.1587
	12.05	8.00	26.25	98.4992	178.9368		0.2452	255.4328	0.4530	0.2018	0.1312
	13.55	9.50	31.17	123.6557	222.0941		0.2334	260.5752	0.4248	0.1781	0.1157
	15.05	11.00	36.09	151.9362	270.6966		0.2232	263.0665	0.4067	0.1617	0.1051
	16.55	12.50	41.01	181.8405	324.7436		0.2147	270.6715	0.3988	0.1529	0.0994
Siltli kil	18.25	14.20	46.59	215.4230	388.5527		0.2081	202.8697	0.3617	0.1357	0.0882
	21.55	17.50	57.41	267.2815	499.5034		0.2146	229.1748	0.3643	0.1461	0.0949
	24.35	20.30	66.60	317.5757	613.7897		0.2119	250.7018	0.3693	0.1513	0.0983

Çizelge 4.40 Durum "d" için üniforma denk tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk}) bulunması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	Derinlik (ft)	Efektif Basınç σ' (kpa)	Toplam Basınç σ_t (kpa)	M_W	Maksimum İvme, a_{mak} (g)	(Vs)ort	rd	CSR_{mak}	CSR_{denk}
Siltli orta- ince kum	9.10	0.50	1.64	3.1000	51.0500	7.4	0.2991	188.5482	0.9354	4.6076	2.9949
	10.60	2.00	6.56	12.3800	75.0500		0.2968	213.9351	0.7770	1.3979	0.9086
	12.10	3.50	11.48	21.6700	99.0500		0.2915	227.1159	0.6518	0.8683	0.5644
	13.60	5.00	16.40	33.9500	120.0500		0.2823	228.0764	0.5497	0.5489	0.3568
Az çakıllı orta-ince kum	15.10	6.50	21.33	46.2400	147.0500		0.2700	253.5602	0.4989	0.4283	0.2784
	16.60	8.00	26.25	58.5200	174.0500		0.2587	255.4328	0.4504	0.3466	0.2253
	18.10	9.50	31.17	70.8100	201.0500		0.2489	260.5752	0.4216	0.2980	0.1937
	19.60	11.00	36.09	84.5900	224.0500		0.2397	263.0665	0.4032	0.2560	0.1664
	21.10	12.50	41.01	98.3800	252.5500		0.2290	270.6715	0.3958	0.2327	0.1512
Siltli kil	22.80	14.20	46.59	114.0000	284.8500		0.2151	202.8697	0.3599	0.1934	0.1257
	26.10	17.50	57.41	144.3300	347.5500		0.2104	229.1748	0.3653	0.1850	0.1203
	28.90	20.30	66.60	170.0600	400.7500		0.2147	250.7018	0.3687	0.1865	0.1212

Adım 6) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_S 'nin bulunması

Numune alıcıda membran kullanıldığı kabul edilerek Seed ve ortak çalışanlarınca geliştirilmiş olan yaklaşımın kullanıldığı bir önceki bölümde olduğu gibi C_S değeri “1” alınmıştır.

Sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de gösterilmektedir.

Adım 7) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_B 'nin bulunması

Seed ve ortak çalışanlarınca geliştirilmiş olan yaklaşımın kullanıldığı bir önceki bölümde olduğu gibi sondaj çap düzeltme katsayısı C_B “1” olarak alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de gösterilmektedir.

Adım 8) SPT N sayısı prosedür düzeltme katsayısı C_E 'nin bulunması

Tokmak enerji düzeltme katsayısı sonuçların diğer yöntemlerle karşılaştırabilir olması amacıyla aynı, yani “0.6” olarak alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de gösterilmektedir.

Adım 9) SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

SPT N sayılarının prosedür düzeltmeleri yapılarak $(N)_{1-60}$ değerleri bulunmuş, sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de gösterilmiştir.

Adım 10) İnce malzeme oranı düzeltme katsayılarının ($C_{ince-tane}$) bulunması

Kum tabakadan alınmış olan zemin örneklerinden elde edilen verilere göre (Dadaşbilge ve Mut, 1974) ince malzeme oranları aşağıdaki gibidir;

- ✓ 0-5 metreler arası $FC = \%15$
- ✓ 5-14 metreler arası $FC \leq \%5$
- ✓ 14 metre ve sonrası $FC \geq \%90$

Yukarıda belirtilen oranlara göre bölüm 3.3.3, denklem 3.26 kullanılarak ince malzeme oranı düzeltme katsayıları bulunmuştur. İnce malzeme oranının $\%90$ ’dan fazla olduğu 14 metre derinlikten sonraki tabakalar için ince tane düzeltme katsayısı yüzdesel üst değeri olan $FC=35$ alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de gösterilmektedir.

Adım 11) İnce malzeme oranı düzeltmelerinin yapılması

Prosedür düzeltmeleri sonucunda elde edilen $(N)_{1-60}$ değerleri $C_{ince-tane}$ düzeltme katsayıları ile çarpılarak $(N)_{1-60\ C_S}$ değerlerine yeniden düzeltilmiştir (bölüm 3.3.3, denklem 3.25).

Sonuçlar Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.41 Durum "a" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

Zemin Cinsi	Seviye	Derinlik	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	<i>C_{ince-tane}</i>	(N) _{I-60 CS}
	(-m)	(m)				C _N	C _R	C _S	C _B	C _E			
Siltli orta-ince kum	6.50	0.50	7	16	68.0950	1.2118	0.85	1.00	1.00	0.60	4.3262	1.2334	5.3358
	8.00	2.00	11	16	77.3800	1.1368	0.95	1.00	1.00	0.60	7.1278	1.1652	8.3054
	9.50	3.50	14	16	84.6650	1.0868	0.95	1.00	1.00	0.60	8.6726	1.1465	9.9430
	11.00	5.00	16	18	94.0000	1.0314	1.00	1.00	1.00	0.60	9.9016	1.1357	11.2457
Az çakıllı orta-ince kum	12.50	6.50	23	18	104.0000	0.9806	1.00	1.00	1.00	0.60	13.5320	1.0000	13.5320
	14.00	8.00	25	18	114.0000	0.9366	1.00	1.00	1.00	0.60	14.0488	1.0000	14.0488
	15.50	9.50	28	18	126.8050	0.8880	1.00	1.00	1.00	0.60	14.9190	1.0000	14.9190
	17.00	11.00	31	19	137.0900	0.8541	1.00	1.00	1.00	0.60	15.8858	1.0000	15.8858
	18.50	12.50	35	19	147.3750	0.8237	1.00	1.00	1.00	0.60	17.2985	1.0000	17.2985
Siltli kil	20.20	14.20	16	19	159.2980	0.7923	1.00	1.00	1.00	0.60	7.6062	1.3701	10.4210
	23.50	17.50	25	19	184.3250	0.7366	1.00	1.00	1.00	0.60	11.0484	1.2984	14.3452
	26.30	20.30	35	19	205.2570	0.6980	1.00	1.00	1.00	0.60	14.6579	1.2594	18.4600

Çizelge 4.42 Durum "b1" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

Zemin Cinsi	Seviye	Derinlik	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	<i>C_{ince-tane}</i>	(N) _{I-60 CS}
	(-m)	(m)				C _N	C _R	C _S	C _B	C _E			
Siltli orta-ince kum	7.99	0.50	7	16	33.9654	1.7159	0.85	1.00	1.00	0.60	6.1256	1.1824	7.2432
	9.49	2.00	11	16	46.1548	1.4719	0.95	1.00	1.00	0.60	9.2291	1.1413	10.5328
	10.99	3.50	14	16	58.3415	1.3092	0.95	1.00	1.00	0.60	10.4475	1.1318	11.8244
	12.49	5.00	16	18	73.5241	1.1662	1.00	1.00	1.00	0.60	11.1958	1.1270	12.6176
Az çakıllı orta-ince kum	13.99	6.50	23	18	88.7020	1.0618	1.00	1.00	1.00	0.60	14.6525	1.0000	14.6525
	15.49	8.00	25	18	103.8751	0.9812	1.00	1.00	1.00	0.60	14.7176	1.0000	14.7176
	16.99	9.50	28	18	119.0438	0.9165	1.00	1.00	1.00	0.60	15.3977	1.0000	15.3977
	18.49	11.00	31	19	135.7085	0.8584	1.00	1.00	1.00	0.60	15.9665	1.0000	15.9665
	19.99	12.50	35	19	152.3699	0.8101	1.00	1.00	1.00	0.60	17.0126	1.0000	17.0126
Siltli kil	21.69	14.20	16	19	171.2494	0.7642	1.00	1.00	1.00	0.60	7.3360	1.3786	10.1130
	24.99	17.50	25	19	207.8897	0.6936	1.00	1.00	1.00	0.60	10.4034	1.3082	13.6099
	27.79	20.30	35	19	238.9722	0.6469	1.00	1.00	1.00	0.60	13.5846	1.2688	17.2364

Çizelge 4.43 Durum "b2" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	<i>C_{ince-tane}</i>	(N) _{I-60 CS}
						C _N	C _R	C _S	C _B	C _E			
Siltli orta-ince kum	8.55	0.50	7	16	24.0576	2.0388	0.85	1.00	1.00	0.60	7.2785	1.1630	8.4652
	10.05	2.00	11	16	37.1641	1.6404	0.95	1.00	1.00	0.60	10.2850	1.1329	11.6521
	11.55	3.50	14	16	50.2595	1.4106	0.95	1.00	1.00	0.60	11.2563	1.1266	12.6816
	13.05	5.00	16	18	66.3428	1.2277	1.00	1.00	1.00	0.60	11.7862	1.1236	13.2434
Az çakıllı orta-ince kum	14.55	6.50	23	18	82.4162	1.1015	1.00	1.00	1.00	0.60	15.2010	1.0000	15.2010
	16.05	8.00	25	18	98.4824	1.0077	1.00	1.00	1.00	0.60	15.1151	1.0000	15.1151
	17.55	9.50	28	18	114.5437	0.9344	1.00	1.00	1.00	0.60	15.6973	1.0000	15.6973
	19.05	11.00	31	19	132.1014	0.8701	1.00	1.00	1.00	0.60	16.1830	1.0000	16.1830
	20.55	12.50	35	19	149.6565	0.8174	1.00	1.00	1.00	0.60	17.1661	1.0000	17.1661
Siltli kil	22.25	14.20	16	19	169.5501	0.7680	1.00	1.00	1.00	0.60	7.3726	1.3774	10.1548
	25.55	17.50	25	19	208.1623	0.6931	1.00	1.00	1.00	0.60	10.3966	1.3083	13.6021
	28.35	20.30	35	19	238.9722	0.6469	1.00	1.00	1.00	0.60	13.5846	1.2688	17.2364

Çizelge 4.44 Durum "c" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

Zemin Cinsi	Seviye (-m)	Derinlik (m)	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	<i>C_{ince-tane}</i>	(N) _{I-60 CS}
						C _N	C _R	C _S	C _B	C _E			
Siltli orta- ince kum	4.55	0.50	7	16	6.1952	4.0177	0.85	1.00	1.00	0.60	14.3430	1.1123	15.9536
	6.05	2.00	11	16	17.1208	2.4168	0.95	1.00	1.00	0.60	15.1532	1.1095	16.8124
	7.55	3.50	14	16	32.7767	1.7467	0.95	1.00	1.00	0.60	13.9386	1.1138	15.5250
	9.05	5.00	16	18	53.0592	1.3728	1.00	1.00	1.00	0.60	13.1793	1.1169	14.7200
Az çakıllı orta-ince kum	10.55	6.50	23	18	74.9669	1.1550	1.00	1.00	1.00	0.60	15.9384	1.0000	15.9384
	12.05	8.00	25	18	98.4992	1.0076	1.00	1.00	1.00	0.60	15.1138	1.0000	15.1138
	13.55	9.50	28	18	123.6557	0.8993	1.00	1.00	1.00	0.60	15.1078	1.0000	15.1078
	15.05	11.00	31	19	151.9362	0.8113	1.00	1.00	1.00	0.60	15.0898	1.0000	15.0898
	16.55	12.50	35	19	181.8405	0.7416	1.00	1.00	1.00	0.60	15.5731	1.0000	15.5731
Siltli kil	18.25	14.20	16	19	215.4230	0.6813	1.00	1.00	1.00	0.60	6.5407	1.4076	9.2064
	21.55	17.50	25	19	267.2815	0.6117	1.00	1.00	1.00	0.60	9.1750	1.3307	12.2095
	24.35	20.30	35	19	317.5757	0.5611	1.00	1.00	1.00	0.60	11.7841	1.2885	15.1839

Çizelge 4.45 Durum "d" için SPT N sayısı prosedür düzeltme işlemlerinin yapılması

Zemin Cinsi	Seviye	Derinlik	SPT (N)	γ_{sat} (kN/m ³)	Efektif Basınç σ' (kpa)	SPT N Sayısı Prosedür Düzeltme Katsayıları					(N) _{I-60}	<i>C_{ince-tane}</i>	(N) _{I-60 CS}
	(-m)	(m)				C _N	C _R	C _S	C _B	C _E			
Siltli orta- ince kum	9.10	0.50	7	16	3.1000	5.6796	0.85	1.00	1.00	0.60	20.2762	1.0970	22.2428
	10.60	2.00	11	16	12.3800	2.8421	0.95	1.00	1.00	0.60	17.8200	1.1021	19.6392
	12.10	3.50	14	16	21.6700	2.1482	0.95	1.00	1.00	0.60	17.1425	1.1038	18.9210
	13.60	5.00	16	18	33.9500	1.7162	1.00	1.00	1.00	0.60	16.4760	1.1055	18.2145
Az çakıllı orta-ince kum	15.10	6.50	23	18	46.2400	1.4706	1.00	1.00	1.00	0.60	20.2941	1.0000	20.2941
	16.60	8.00	25	18	58.5200	1.3072	1.00	1.00	1.00	0.60	19.6083	1.0000	19.6083
	18.10	9.50	28	18	70.8100	1.1884	1.00	1.00	1.00	0.60	19.9647	1.0000	19.9647
	19.60	11.00	31	19	84.5900	1.0873	1.00	1.00	1.00	0.60	20.2234	1.0000	20.2234
	21.10	12.50	35	19	98.3800	1.0082	1.00	1.00	1.00	0.60	21.1722	1.0000	21.1722
Siltli kil	22.80	14.20	16	19	114.0000	0.9366	1.00	1.00	1.00	0.60	8.9912	1.3346	12.0000
	26.10	17.50	25	19	144.3300	0.8324	1.00	1.00	1.00	0.60	12.4857	1.2802	15.9837
	28.90	20.30	35	19	170.0600	0.7668	1.00	1.00	1.00	0.60	16.1034	1.2487	20.1079

Adım 12) Deprem büyüklüğü bağıntılı süre düzeltmelerinin

7.4 şiddetinde gerçekleşen Doğu Marmara Depremi için süre düzeltme katsayısı bölüm 3.3.4, Şekil 3.14 kullanılarak bulunmuştur ($DWF_M = 1.0263$). Bu katsayı denklem 3.27’de yerine konularak daha önce hesaplanan arazi denk üniform tekrarlı gerilme oranları için deprem büyüklüğü bağıntılı süre düzeltmeleri yapılmış ve $CSR_{denk,M=7.5}$ değerleri bulunmuştur. Sonuçlar Çizelge 4.46, 4.47, 4.48, 4.49 ve 4.50’de gösterilmektedir.

Adım 13) Efektif gerilme düzeltme katsayılarının ($K\sigma$) bulunması

Bu çalışmada $\sigma_V' \leq 2$ atm. için bölüm 3.3.5’de önerilen denklem 3.29 kullanılmıştır (Üst sınır değer 1.50’dir). Arazide yapılan zemin etüdleri sonucunda elde edilmiş olan rölatif yoğunluk değeri için $D_R \approx 60\%$ kabul edilmiş ve $f=0.7$ alınmıştır. $\sigma_V' > 2$ atm. için bölüm 4.3.3.2, Adım 11’de kullanılan yüksek efektif gerilme düzeltme değerleri aynen kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.46, 4.47, 4.48, 4.49 ve 4.50’de verilmektedir.

Adım 14) Efektif gerilme düzeltmelerinin yapılması

Yukarıda elde edilen düzeltme katsayıları her derinlik için bölüm 3.3.5, denklem 3.28’de yerine konularak $CSR_{denk,M=7.5, 1atm}$ değerleri bulunmuştur. $CSR_{denk,M=7.5, 1atm}$ için üst 1.5 olarak alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.46, 4.47, 4.48, 4.49 ve 4.50’de verilmektedir.

Adım 15) Sıvılaşma riskinin olasılıksal olarak bulunması

Daha önce ince tane düzeltmesi dahil tüm düzeltmeleri yapılmış olan penetrasyon direnci $N_{160,CS}$ ile, deprem şiddeti için süre düzeltmesi ve efektif gerilme düzeltmesi yapılmış olan CSR değeri bölüm 3.3.6, Şekil 3.18’de yerine konularak sıvılaşma riskleri olasılıksal olarak bulunmuştur. Bölüm 3.3.7’de açıklanan sıvılaşma direncinin deterministik olarak %20 sıvılaşma riskine karşılık gelen değerleri sıvılaşma olasılığı tespit edildiğinden hesaplanmamıştır. Sonuçlar Şekil 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 ve Çizelge 4.51, 4.52, 4.53, 4.54, 4.55’de verilmektedir.

Çizelge 4.46 Durum "a" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR_{denk}	DWF_M	CSR_{denk} , $M=7.5$	$K\sigma$	(CSR) CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.
Siltli orta-ince kum	0.50	68.0950	0.2878	1.0263	0.2805	1.1222	0.2499
	2.00	77.3800	0.2433	1.0263	0.2371	1.0800	0.2195
	3.50	84.6650	0.2076	1.0263	0.2023	1.0512	0.1924
	5.00	94.0000	0.1707	1.0263	0.1663	1.0187	0.1633
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	104.0000	0.1471	1.0263	0.1433	0.9883	0.1450
	8.00	114.0000	0.1299	1.0263	0.1265	0.9615	0.1316
	9.50	126.8050	0.1186	1.0263	0.1155	0.9312	0.1241
	11.00	137.0900	0.1109	1.0263	0.1081	0.9097	0.1188
	12.50	147.3750	0.1077	1.0263	0.1049	0.8902	0.1178
Siltli kil	14.20	159.2980	0.0978	1.0263	0.0953	0.8696	0.1096
	17.50	184.3250	0.0987	1.0263	0.0962	0.8324	0.1156
	20.30	205.2570	0.0958	1.0263	0.0933	0.7955	0.1173

Çizelge 4.47 Durum "b1" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR_{denk}	DWF_M	CSR_{denk} , $M=7.5$	$K\sigma$	(CSR) CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.
Siltli orta-ince kum	0.50	33.9654	0.3143	1.0263	0.3063	1.3826	0.2215
	2.00	46.1548	0.2843	1.0263	0.2770	1.2611	0.2197
	3.50	58.3415	0.2435	1.0263	0.2372	1.1755	0.2018
	5.00	73.5241	0.2062	1.0263	0.2010	1.0967	0.1832
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	88.7020	0.1752	1.0263	0.1707	1.0366	0.1647
	8.00	103.8751	0.1529	1.0263	0.1489	0.9887	0.1507
	9.50	119.0438	0.1373	1.0263	0.1338	0.9490	0.1410
	11.00	135.7085	0.1280	1.0263	0.1247	0.9125	0.1367
	12.50	152.3699	0.1183	1.0263	0.1153	0.8813	0.1308
Siltli kil	14.20	171.2494	0.1063	1.0263	0.1036	0.8510	0.1217
	17.50	207.8897	0.1061	1.0263	0.1034	0.7925	0.1305
	20.30	238.9722	0.1058	1.0263	0.1031	0.7601	0.1357

Çizelge 4.48 Durum "b2" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması

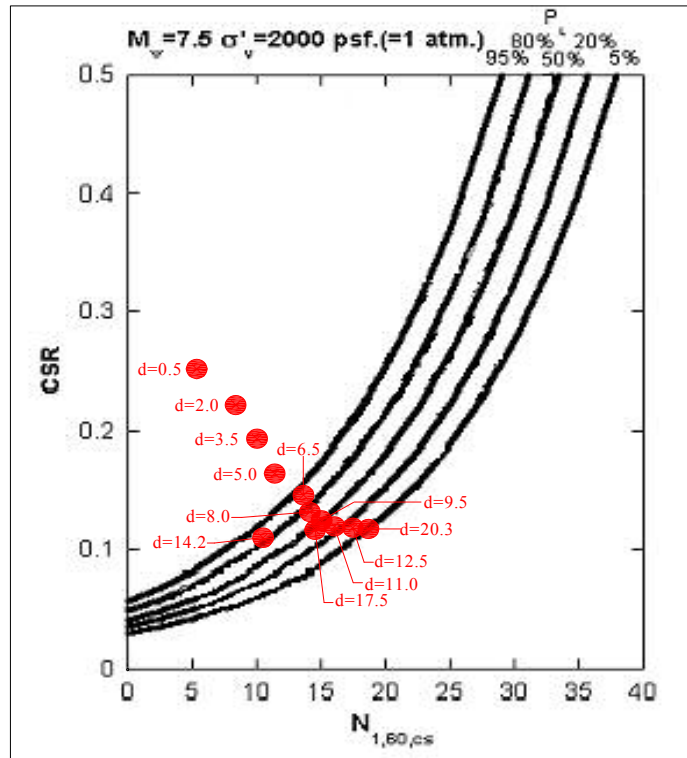
Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR_{denk}	DWF_M	$(CSR)_{denk}$, $M=7.5$	$K\sigma$	$(CSR)_{denk}$, $M=7.5$, 1 atm.
Siltli orta-ince kum	0.50	24.0576	0.3037	1.0263	0.2959	1.5000	0.1973
	2.00	37.1641	0.2841	1.0263	0.2768	1.3457	0.2057
	3.50	50.2595	0.3362	1.0263	0.3276	1.2292	0.2665
	5.00	66.3428	0.3173	1.0263	0.3091	1.1310	0.2733
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	82.4162	0.3007	1.0263	0.2930	1.0597	0.2765
	8.00	98.4824	0.2821	1.0263	0.2749	1.0046	0.2737
	9.50	114.5437	0.2709	1.0263	0.2640	0.9601	0.2750
	11.00	132.1014	0.2600	1.0263	0.2534	0.9199	0.2754
	12.50	149.6565	0.2543	1.0263	0.2478	0.8861	0.2796
Siltli kil	14.20	169.5501	0.2303	1.0263	0.2244	0.8535	0.2630
	17.50	208.1623	0.2335	1.0263	0.2275	0.7922	0.2872
	20.30	238.9722	0.2343	1.0263	0.2283	0.7955	0.2870

Çizelge 4.49 Durum "c" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR_{denk}	DWF_M	$(CSR)_{denk}$, $M=7.5$	$K\sigma$	$(CSR)_{denk}$, $M=7.5$, 1 atm.
Siltli orta-ince kum	0.50	6.1952	0.9616	1.0263	0.9370	1.5000	0.6247
	2.00	17.1208	0.5170	1.0263	0.5037	1.5000	0.3358
	3.50	32.7767	0.3008	1.0263	0.2930	1.3974	0.2097
	5.00	53.0592	0.2011	1.0263	0.1960	1.2094	0.1621
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	74.9669	0.1587	1.0263	0.1546	1.0903	0.1418
	8.00	98.4992	0.1312	1.0263	0.1278	1.0045	0.1272
	9.50	123.6557	0.1157	1.0263	0.1128	0.9383	0.1202
	11.00	151.9362	0.1051	1.0263	0.1024	0.8821	0.1161
	12.50	181.8405	0.0994	1.0263	0.0969	0.8358	0.1159
Siltli kil	14.20	215.4230	0.0882	1.0263	0.0860	0.7841	0.1096
	17.50	267.2815	0.0949	1.0263	0.0925	0.7350	0.1259
	20.30	317.5757	0.0983	1.0263	0.0958	0.6979	0.1373

Çizelge 4.50 Durum "d" için tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının (CSR_{denk} , $M=7.5$, 1 atm.) bulunması

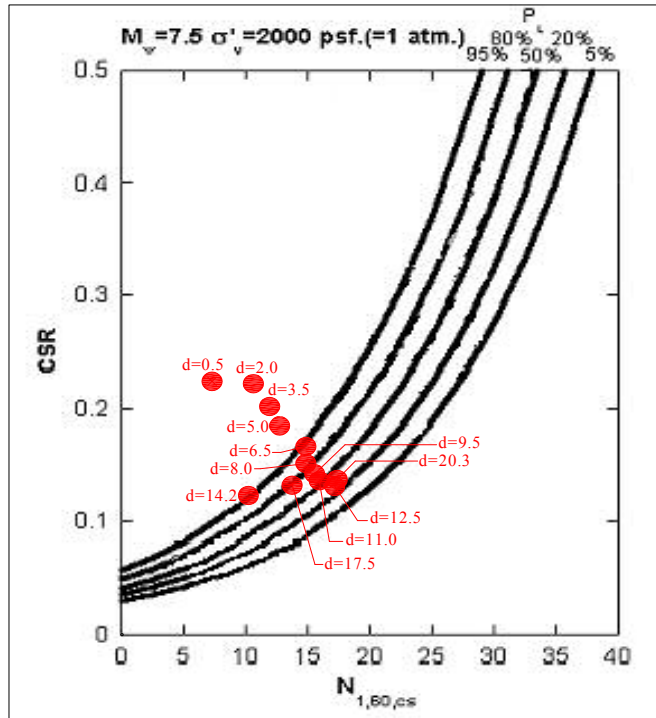
Zemin Cinsi	Derinlik (m)	Efektif Basınç σ' (kpa)	CSR_{denk}	DWF_M	$(CSR)_{denk}$, $M=7.5$	$K\sigma$	$(CSR)_{denk}$, $M=7.5$, 1 atm.
Siltli orta- ince kum	0.50	3.1000	2.9949	1.0263	2.9182	1.5000	1.9455
	2.00	12.3800	0.9086	1.0263	0.8853	1.5000	0.5902
	3.50	21.6700	0.5644	1.0263	0.5500	1.5000	0.3666
	5.00	33.9500	0.3568	1.0263	0.3476	1.3828	0.2514
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	46.2400	0.2784	1.0263	0.2713	1.2604	0.2152
	8.00	58.5200	0.2253	1.0263	0.2195	1.1744	0.1869
	9.50	70.8100	0.1937	1.0263	0.1887	1.1091	0.1701
	11.00	84.5900	0.1664	1.0263	0.1621	1.0515	0.1542
	12.50	98.3800	0.1512	1.0263	0.1474	1.0049	0.1466
Siltli kil	14.20	114.0000	0.1257	1.0263	0.1225	0.9615	0.1274
	17.50	144.3300	0.1203	1.0263	0.1172	0.8958	0.1308
	20.30	170.0600	0.1212	1.0263	0.1181	0.8527	0.1385



Şekil 4.22 Durum "a" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Çizelge 4.51 Durum "a" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

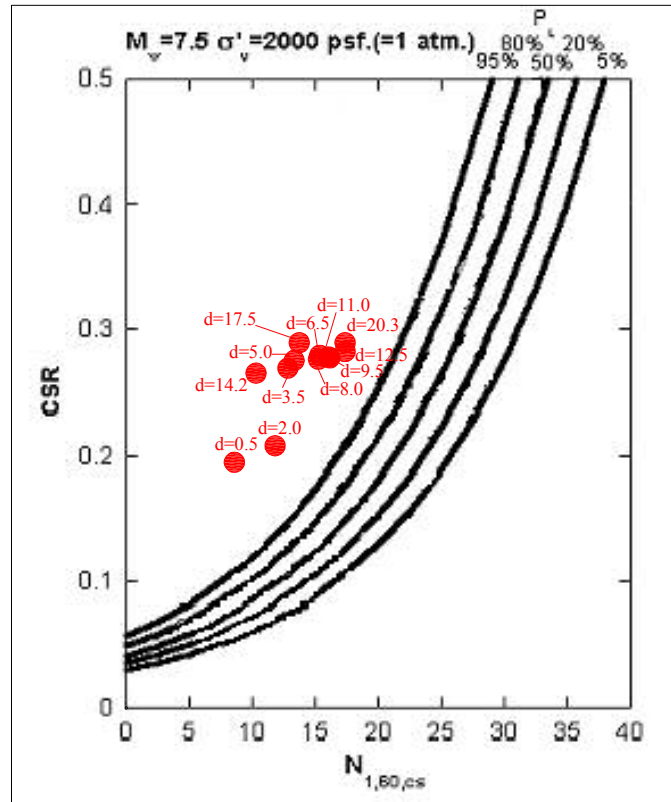
Zemin Cinsi	Derinlik (m)	(N) ₁₋₆₀ CS	(CSR) _{denk,} M=7.5, 1 atm.	Olasılıksal Sıvılaşma Riski
Siltli orta-ince kum	0.50	5.3358	0.2499	Sıvılaşır
	2.00	8.3054	0.2195	Sıvılaşır
	3.50	9.9430	0.1924	Sıvılaşır
	5.00	11.2457	0.1633	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	13.5320	0.1450	%80-95 arası sıvılaşır
	8.00	14.0488	0.1316	%50-80 arası sıvılaşır
	9.50	14.9190	0.1241	%50 sıvılaşır
	11.00	15.8858	0.1188	%20 sıvılaşır
	12.50	17.2985	0.1178	%5-20 arası sıvılaşır
Siltli kil	14.20	10.4210	0.1096	%80 sıvılaşır
	17.50	14.3452	0.1156	%50 sıvılaşır
	20.30	18.4600	0.1173	%5 sıvılaşır



Şekil 4.23 Durum "b1" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Çizelge 4.52 Durum "b1" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

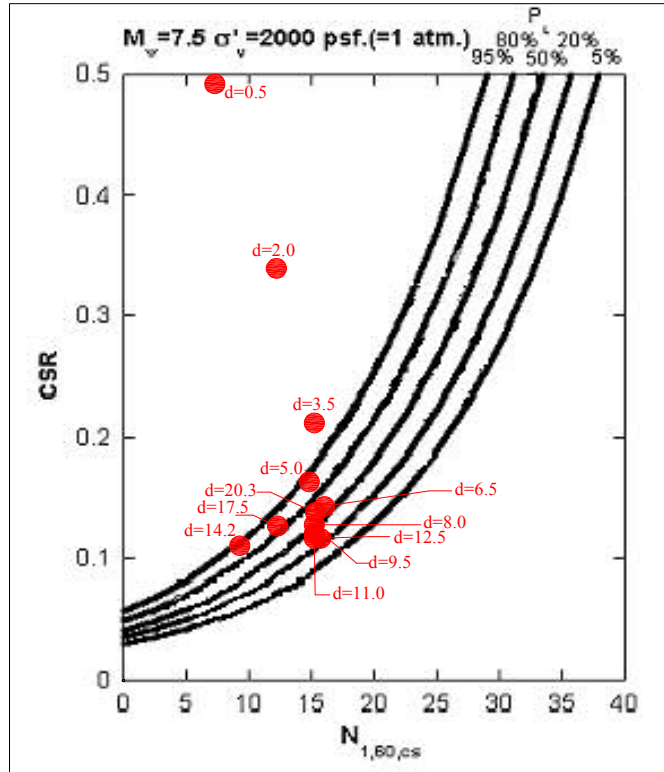
Zemin Cinsi	Derinlik (m)	(N) ₁₋₆₀ CS	(CSR) _{denk} , M=7.5, 1 atm.	Olasılıksal Sıvılaşma Riski
Siltli orta-ince kum	0.50	7.1831	0.2215	Sıvılaşır
	2.00	10.5328	0.2197	Sıvılaşır
	3.50	11.8244	0.2018	Sıvılaşır
	5.00	12.6176	0.1832	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	14.6525	0.1647	%95 sıvılaşır
	8.00	14.7176	0.1507	%80 sıvılaşır
	9.50	15.3977	0.1410	%50-80 arası sıvılaşır
	11.00	15.9665	0.1367	%50 sıvılaşır
	12.50	17.0126	0.1308	%20-50 arası sıvılaşır
Siltli kil	14.20	10.1130	0.1217	%95 sıvılaşır
	17.50	13.6099	0.1305	%80 sıvılaşır
	20.30	17.2364	0.1357	%20-50 arası sıvılaşır



Şekil 4.24 Durum "b2" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Çizelge 4.53 Durum "b2" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

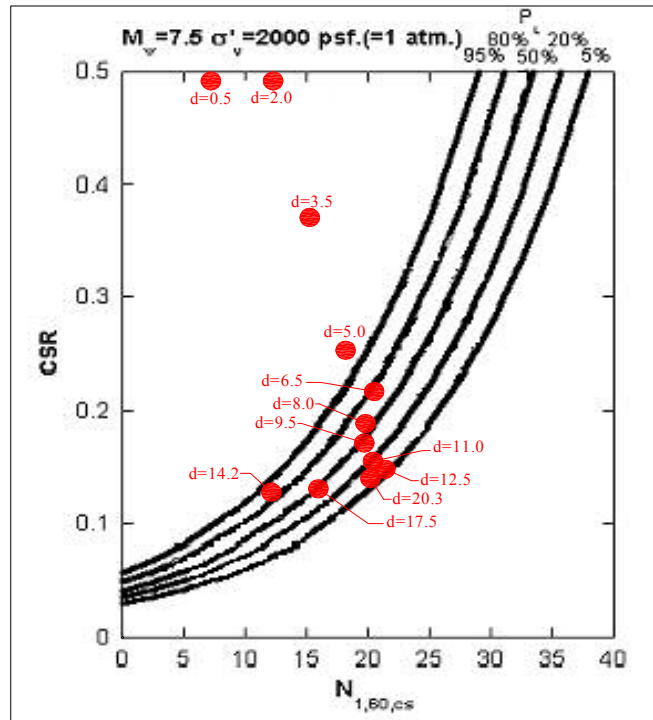
Zemin Cinsi	Derinlik (m)	(N) ₁₋₆₀ CS	(CSR) _{denk} , M=7.5, 1 atm.	Olasılıksal Sıvılaşma Riski
Siltli orta-ince kum	0.50	7.1831	0.1973	Sıvılaşır
	2.00	11.6521	0.2057	Sıvılaşır
	3.50	12.6816	0.2665	Sıvılaşır
	5.00	13.2434	0.2733	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	15.2010	0.2765	Sıvılaşır
	8.00	15.1151	0.2737	Sıvılaşır
	9.50	15.6973	0.2750	Sıvılaşır
	11.00	16.1830	0.2754	Sıvılaşır
	12.50	17.1661	0.2796	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	10.1548	0.2630	Sıvılaşır
	17.50	13.6021	0.2872	Sıvılaşır
	20.30	17.2364	0.2870	Sıvılaşır



Şekil 4.25 Durum "c" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Çizelge 4.54 Durum "c" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	(N) ₁₋₆₀ CS	(CSR) _{denk} , M=7.5, 1 atm.	Olasılıksal Sıvılaşma Riski
Siltli orta-ince kum	0.50	7.1831	0.6247	Sıvılaşır
	2.00	12.0485	0.3358	Sıvılaşır
	3.50	15.1300	0.2097	Sıvılaşır
	5.00	14.7200	0.1621	%80-95 arası sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	15.9384	0.1418	%50-80 arası sıvılaşır
	8.00	15.1138	0.1272	%50 sıvılaşır
	9.50	15.1078	0.1202	%20-50 arası sıvılaşır
	11.00	15.0898	0.1161	%20-50 arası sıvılaşır
	12.50	15.5731	0.1159	%20-50 arası sıvılaşır
Siltli kil	14.20	9.2064	0.1096	%95 sıvılaşır
	17.50	12.2095	0.1259	%80-95 arası sıvılaşır
	20.30	15.1839	0.1373	%50-80 arası sıvılaşır



Şekil 4.26 Durum "d" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Çizelge 4.55 Durum "d" için olasılıksal sıvılaşma dağılımı

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	(N) _{I-60} CS	(CSR) _{denk} , M=7.5, 1 atm.	Olasılıksal Sıvılaşma Riski
Siltli orta-ince kum	0.50	7.1831	1.9455	Sıvılaşır
	2.00	12.0485	0.5902	Sıvılaşır
	3.50	15.1300	0.3666	Sıvılaşır
	5.00	18.0492	0.2514	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	20.2941	0.2152	%80 sıvılaşır
	8.00	19.6083	0.1869	%50-80 arası sıvılaşır
	9.50	19.9647	0.1701	%50 sıvılaşır
	11.00	20.2234	0.1542	%20 sıvılaşır
	12.50	21.1722	0.1466	%5-20 arası sıvılaşır
Siltli kil	14.20	12.0000	0.1274	%80-95 arası sıvılaşır
	17.50	15.9837	0.1308	%50 sıvılaşır
	20.30	20.1079	0.1385	%5-20 arası sıvılaşır

Adım 16) Sıvılaşma oturmasının bulunması

Bölüm 4.3.3.1, Adım 7’de açıklanan yöntem izlenerek düzeltilmiş $(N)_{I-60}$ CS değerleri ile $(CSR)_{denk, M=7.5}$ değerleri Şekil 4.19’da grafikte yerine konulmuş ve hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri bulunmuştur. Daha sonra sıvılaşmadan dolayı meydana gelen oturmalar tespit edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.27 ve Çizelge 4.56’da gösterilmektedir. Sıvılaşmadan dolayı dalgakıran merkezindeki toplam oturma miktarı 19.28 cm.’dir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Dalga etkisinde zemin sıvılaşması, özellikle anlık sıvılaşma, üzerinde hala pek çok belirsizliğin olduğu ve çözüm yöntemleri konusunda araştırmaların yetersiz kaldığı bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada kısaca sıvılaşma mekanizmasının oluşma biçimine ve çözüm yöntemlerine değinilmiştir.

Deprem etkisinde zemin sıvılaşması ise bir örnek problem, Ereğli Balıkçı Barınağı dalgakıranı üzerinde incelenmiştir. Kullanılan yöntemler; bu tip deniz yapıları için uygulamada elverişli olan ve yaklaşık çözümleme olanağı sağlayan Japon Teknik Standartları tane çapı dağılımı ve SPT N sayısı yöntemi, yaygın olarak kabul görmüş olan Seed vd. (1984;1985) yöntemi ve bu yöntemde kullanılan deterministik bağıntılara yenilemeler getiren Çetin ve Seed (2000;2001) yöntemidir.

17 Ağustos 1999 Doğu Marmara Depremi sonrasında Ereğli Balıkçı Barınağı dalgakıranında yapılan ölçümlerde proje değerlerine göre toplam 150 cm. kadar oturma meydana geldiği, şev stabilitesinin bozulduğu, koruma duvarlarında çatlakların ve platformdan ayrılımların olduğu saptanmıştır (Yüksel vd., 2002). Dalgakıran altındaki zemin gevşek kum özelliğinde olup sıvılaşma potansiyeli oldukça yüksektir. Bu nedenden dolayı zemin sıvılaşmasının hasarlarda önemli bir payı olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada Yüksel vd. (2002) dinamik analiz sonuçlarından elde edilen maksimum yer ivmeleri ve arazi deneylerinden elde edilen SPT N sayıları aynen kullanılmıştır. Sondaj verileri darbeli sondaj yöntemi ile duba üzerinden alındığından dönel sondaj yöntemi ile platform üzerinden örnek alınmasını öneren her üç yöntem için sonuçlar uygun olmayabilir.

Çalışma sonuçları değerlendirilirken zemin profilinin dalgakıran inşaatı öncesinde alınan eski verilere dayanılarak oluşturulduğu (Dadaşbilge ve Mut, 1974) ve arazi deneylerinin istenilen standartların dışında yapıldığı göz ardı edilmemelidir. Ancak deprem sonrası yapılan incelemelerde sıvılaşma etkisinin somut olarak saptanabildiği ve bu çalışma içerisinde kullanılan yöntemlere dayanak oluşturduğu da unutulmamalıdır.

Sonuçlar aşağıda verilmektedir;

1) Japon Teknik Standartları sıvılaşma olasılığı yüksek olan silt ve kum karışımı zeminler için ince malzeme oranı arttıkça sıvılaşma dayanımını düşürmeyi öngörmektedir. Bu tip zeminler hem geçirimsiz olmaları hem de sıvılaşabilir olmaları nedeniyle çok büyük sıvılaşma riski taşımaktadır. Ereğli Balıkçı Barınağı dalgakıranı için yapılan hesaplarda Japon Teknik

Standartlarına göre; 0-5 metre derinlikte yer alan siltli orta-ince kum karışımı üst zemin tabakası, incelenen tüm bölgeler için sıvılaşır sonucunu vermektedir.

Benzer şekilde diğer yöntemlerden (Seed vd.,1984,1985; Çetin ve Seed, 2000,2001) elde edilen sonuçlar da kesin olarak sıvılaşmayı öngörmektedir. Hatta Çetin ve Seed (2000;2001) yönteminde olasılıksal sıvılaşma %100 olarak hesaplanmaktadır.

Üç farklı yöntem sonuçları bir araya getirildiğinde en üst zemin katmanının, yani siltli kumun, deprem sırasında bozulan stabilite ile birlikte sıvılaşarak göçmeye neden olduğu görülmektedir.

2) 6.50-12.50 metreler arasında kalan az çakıllı orta-ince kum karışımı zemin için Japon Teknik Standartları'na göre sıvılaşma olasılığı bulunmamaktadır. Bu sonuç ince malzeme oranının %5'den daha az olması ve göreceli olarak yüksek SPT N değerlerine bağlanabilir. Ancak diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar sıvılaşmanın oluşması gerektiği yönündedir. Seed vd. (1984;1985) yöntemi incelenen tüm durumlar için sıvılaşmayı öngörürken, Çetin ve Seed (2000;2001) yönteminde derinlere inildikçe efektif gerilmeye bağlı olarak sıvılaşma riski azalmakta, %20 olasılıksal sıvılaşma eğrisi esas alındığında, özellikle dalgakıran şev bölgeleri altında kalan her derinlik için sıvılaşma öngörülmektedir. Yine Çetin ve Seed (2000,2001) yönteminde dalgakıran merkezi ve dalgakıran gövdesi dışında kalan bölgelerin 11.00-12.50 metre derinlikler arasında sıvılaşma olasılığı %20'nin altındadır

Sonuç olarak; 6.50-12.50 metreler arasında bulunan az çakıllı kum zemin katmanının üst bölgelerinde yüksek olasılıkla sıvılaşma meydana gelmiştir. Özellikle şev bölgelerinde deprem sırasında sıvılaşma ile birlikte kayma meydana geldiği öngörülmektedir.

3) Arazi testleri sırasında 14.20 metre derinlikteki siltli kil için ölçülen SPT N değerinin düşük olması bu tabakanın her üç yöntemde de sıvılaşır olarak hesaplanmasına neden olmaktadır. Daha derin bölgelerde Japon Teknik Standartları'ndan elde edilen sonuçlar sıvılaşmanın oluşmayacağı yönündedir. Diğer yöntemler ise sıvılaşma sınırına çok yakın değerler vermektedir.

Bu çalışmada incelenen siltli kil malzemenin plastisite indisi (PI) 19.70 ile 27.30 arasında değişmektedir. Teknik olarak düşük plastisiteli ve orta plastisiteli ($8\% < PI < 15\%$) siltli kil sınıfının üzerinde kalan bu malzemenin sıvılaşma olasılığı bulunmamaktadır. Çalışmada kullanılan laboratuvar test sonuçları yetersiz olmasına rağmen, 14.20–20.30 metre derinlikler arasında bulunan siltli kil zemin tabakasının sıvılaşmadığı öngörülebilir.

4) Her üç yöntemden elde edilen sıvılaşma olasılığı tahmin sonuçları kıyaslamalı olarak Çizelge 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5’de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Durum “a” için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu

Zemin tanımı	Derinlik (m)	Sıvılaşma olasılığı		
		Japon Teknik Standartları ^(*)	Seed ve Diğ. (1984-1985)	Çetin ve diğ. (2000-2001) ^(**)
Siltli orta-ince kum	0.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	2.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	3.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	5.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	8.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	9.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	11.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşmaz
	12.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşmaz
Siltli kil	14.20	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	17.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	20.30	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz

Çizelge 5.2 Durum “b1” için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu

Zemin tanımı	Derinlik (m)	Sıvılaşma olasılığı		
		Japon Teknik Standartları ^(*)	Seed vd. (1984-1985)	Çetin vd. (2000-2001) ^(**)
Siltli orta-ince kum	0.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	2.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	3.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	5.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	8.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	9.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	11.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	12.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	17.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	20.30	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır

(*) Siltli kil tabaka için "tahmin" sonuçları kullanılmıştır.

(**) %20 Sıvılaşma olasılığına göre değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.3 Durum “b2” için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu

Zemin tanımı	Derinlik (m)	Sıvılaşma olasılığı		
		Japon Teknik Standartları ⁽¹⁾	Seed ve Diğ. (1984-1985)	Çetin ve diğ. (2000-2001) ⁽²⁾
Siltli orta-ince kum	0.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	2.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	3.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	5.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	8.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	9.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	11.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	12.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	17.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	20.30	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır

Çizelge 5.4 Durum “c” için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu

Zemin tanımı	Derinlik (m)	Sıvılaşma olasılığı		
		Japon Teknik Standartları ⁽¹⁾	Seed ve Diğ. (1984-1985)	Çetin ve diğ. (2000-2001) ⁽²⁾
Siltli orta-ince kum	0.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	2.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	3.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	5.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	8.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	9.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	11.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	12.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Siltli kil	14.20	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	17.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	20.30	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır

(*) Siltli kil tabaka için "tahmin" sonuçları kullanılmıştır.

(**) %20 Sıvılaşma olasılığına göre değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 5.5 Durum “d” için kıyaslamalı sıvılaşma olasılık tablosu

Zemin tanımı	Derinlik (m)	Sıvılaşma olasılığı		
		Japon Teknik Standartları ^(*)	Seed ve Diğ. (1984-1985)	Çetin ve diğ. (2000-2001) ^(**)
Siltli orta-ince kum	0.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	2.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	3.50	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	5.00	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
Az çakıllı orta-ince kum	6.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	8.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	9.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	11.00	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşmaz
	12.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşmaz
Siltli kil	14.20	Sıvılaşır	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	17.50	Sıvılaşmaz	Sıvılaşır	Sıvılaşır
	20.30	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz	Sıvılaşmaz

5) Prosedür düzeltmeleri yapılmış $(N)_{l-60}$ değerleri ve ince malzeme oranı için düzeltme işlemleri yapılmış Eşdeğer N ya da $(N)_{l-60 CS}$ değerleri Çizelge 5.6’da verilmektedir.

Çizelge 5.6 SPT N değerleri kıyas çizelgesi

Derinlik (m)	SPT (N)	Japon Teknik Standartları		Seed ve Diğ. (1984-1985)		Cetin ve Seed (2000-2001)	
		Düzeltilmiş N Değeri	Eşdeğer N Değeri	$(N)_{l-60}$	$(N)_{l-60 CS}$	$(N)_{l-60}$	$(N)_{l-60 CS}$
0.50	7	6.9040	3.4520	4.3262	7.0319	4.3262	5.3358
2.00	11	10.3232	5.1616	7.1278	9.9679	7.1278	8.3054
3.50	14	12.7121	6.3560	8.6726	11.5869	8.6726	9.9430
5.00	16	13.9317	6.9659	9.9016	12.8749	9.9016	11.2457
6.50	23	19.3687	19.3687	13.5320	13.5320	13.5320	13.5320
8.00	25	20.2452	20.2452	14.0488	14.0488	14.0488	14.0488
9.50	28	21.6387	21.6387	14.9190	14.9190	14.9190	14.9190
11.00	31	23.1375	23.1375	15.8858	15.8858	15.8858	15.8858
12.50	35	25.2984	25.2984	17.2985	17.2985	17.2985	17.2985
14.20	16	10.4168	10.4168	7.6062	14.1274	7.6062	10.4210
17.50	25	15.5130	15.5130	11.0484	18.2581	11.0484	14.3452
20.30	35	20.8625	20.8625	14.2042	22.0450	14.6579	18.4600

Değerler incelendiğinde %15 ince malzeme oranına sahip 0.50-5.00 metre derinlikler arası siltli orta-ince kum için Seed vd.(1984;1985) yöntemi ile Çetin ve Seed (2000;2001) yönteminde artış yönünde düzeltme öngörülürken, Japon Teknik Standartları’nda azaltma yönünde düzeltme yapılmıştır.

6.50-12.50 metre derinlikler arası %5'den daha az malzeme oranı için her üç yöntemde de öngörüldüğü gibi düzeltme işlemi yapılmamıştır.

14.20-20.30 metre derinlikler arasındaki siltli kil için Japon Teknik Standartları'nda öngörülen %15 ince malzeme oranının çok üzerine çıktığından düzeltme işlemi yapılmamış, diğer yöntemlerde ise önerildiği gibi artış yönünde düzeltmeler yapılmıştır.

Artan ince malzeme oranı ile birlikte Seed vd.(1984;1985) yönteminde belirlenen artış yönündeki düzeltmelerin, Çetin ve Seed (2000;2001) yönteminde kullanılan artıştan daha fazla olduğu görülmektedir.

6) Her üç yöntemde dalgakıran merkezinde hesaplanan sıvılaşma oturması miktarları aşağıdaki gibidir;

- ✓ Japon Teknik Standartları $\cong 20$ cm
- ✓ Seed vd. (1984;1985) $\cong 30$ cm
- ✓ Çetin ve Seed (2000;2001) $\cong 20$ cm

Japon Teknik Standartları ile Çetin ve Seed (2000;2001) yöntemi aynı sonucu verirken Seed vd. (1984;1985) yöntemi oturma miktarını %50 daha fazla vermektedir.

Yapım sonrasında oluştuğu düşünülen oturma miktarları;

- ✓ Ani kum oturması $\cong 30$ cm
- ✓ Siltli kildeki konsolidasyon oturması $\cong 50$ cm
- ✓ Toplam $\cong 80$ cm

Deprem sonrası yapılan tespitlerde bulunan oturma miktarı $\cong 150$ cm. olduğuna göre geriye kalan $\cong 70$ cm oturmanın stabilite bozulması ve zemin sıvılaşması ile birlikte oluştuğu düşünülebilir.

Bu çalışmadan elde edilen verilere göre yalnız sıvılaşma etkisiyle oluşabilecek oturma miktarı 20 cm. ile 30 cm. arasındadır.

Öneriler aşağıda verilmektedir;

1) Standart penetrasyon testi sonuçlarına dayanarak sıvılaşma olasılığını inceleyen her üç yöntem için bu deneylerin olabildiğince doğru ve yeterli miktarda yapılması çok büyük önem taşımaktadır. Arazideki zemin profili ve yapısının gerçeğe yakın tanımlanması elde edilecek sonuçların geçerliliğini de doğrudan ilgilendirmektedir.

- 2) Sıvılaşma potansiyelinin tahmin edilmesinde doğrudan etkili olan diğer etken dinamik analiz yöntemlerinin kullanılması, sismik yükler altında zemin davranışının incelenmesi, doğru verilerek girilerek modelleme yapılması ve yer ivmelerinin gerçekçi olarak tespit edilmesidir.
- 3) Sıvılaşma bağıntıları incelendiğinde bir genelleme yaparak sabit bir işlem sırası veya yöntem seçilmesi yerine, farklı yöntemleri bir arada kullanarak karşılaştırmalı bir sonuç elde etmenin daha faydalı olacağı görülmektedir.
- 4) Birçok bağıntının ortak kullanıldığı; sıvılaşma olasılığını yüksek tutarak güvenli sonuç vermeye yatkın bir yöntem olan Seed vd. (1984;1985) ile olasılıksal ve yeni bağıntıları kullanarak daha gerçekçi sonuç vermeye çalışan Çetin ve Seed (2000;2001) yöntemi iç içe kullanılmalıdır. Yapı önem derecesine, zemin sıvılaşma hassasiyetine ve deprem etki alanına göre bu yöntemlerden elde edilecek sonuçlar değerlendirilmelidir.
- 5) Japon Teknik Standartları tane boyutu dağılımından yola çıkarak eşdeğer N sayısı ve eşdeğer ivme arasında grafik bir bağıntı kurmaktadır. Bu bağıntıları kullanarak sonuca ulaşmak özellikle uygulama mühendisleri açısından kolaylık sağlayabilir. Ancak sonuçlar kesin olarak sıvılaşmanın oluşmayacağı veya oluşacağı bölgeler dışında, ara bölgelerde kaldığında, yöntemin kolay uygulanabilirliği ortadan kalkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Bartlett, S.F., Youd, T.L., (1993), "Empirical Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread", Journal of Geotechnical Engineering, Paper no.7247, 316-329, Aiken.
- Çetin, K.Ö., (2002), "Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4.Kıyı Mühendisliği Ulusal Sempozyumu Bildiriler Kitabı 1.Cilt, 19-54, Antalya,Türkiye.
- Çetin, K.Ö., Seed, R.B., (2004), "Nonlinear shear mass participation factor (r_d) for cyclic shear stress ratio evaluation", Soil Dynamics and earthquake engineering, Elsevier Science Volume 24, Number 2, 103-113(11).
- Çetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, Jr.L.F., Kayen, R.E. and Moss, R.E.S. (2005), "SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.
- Finn W.D.L., (2000), "State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice", Soil Dynamics and earthquake engineering 20 (2000) 1-15, Elsevier Science.
- Japan International Cooperation Agency, (1994), "Dynamic Property of Soil", Port and Harbour Engineering II.
- Özaydın, K., (1989), "Zemin Mekaniği", Meya Matbaa ve Yayıncılık, 74-329, İstanbul.
- Peacock, W.H., Seed, H.B., (1968), "Sand liqvefaction under cyclic loading simple shear conditions", J. Soil Mechanics and Foundations Engineering Devision, ASCE, vol.94, No.sm3, 689-708.
- Skempton, A.W., (1986), "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation", Geotechnique Volume XXXVI Number 3, The Institution of Civil Engineers, 425-446, London.
- Sümer, B. M., Fredsøe, J., (2002), "The Mechanics of Scour in the Marine Environment, Advanced series on Ocean Engineering-Volume 17", World Scientific, Chapter 10, 445-504, Denmark.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., (2001), "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical Engineering and Geoanvironmental Engineering, Vol.127, No.4, Paper No.22223, 297-313.
- Yüksel, Y., Çevik, E., Özgüven, O., Özmen, H.İ., (2002), "Karamürsel Ereğli Balıkçı Barınağı Dalgakıran Hasar Analizi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4.Kıyı Mühendisliği Ulusal Sempozyumu Bildiriler Kitabı 2.Cilt, Antalya,Türkiye.
- Zen, K., Yamazaki, H., Lee, I.H., (1991), "Wave-Induced Liquefaction and Instability of Breakwaters", Geo-Coast'91, 3-6 Sept., 1991, Yokohoma 5/24, 673-678.

INTERNET KAYNAKLARI

[1]www.benkoltd.com/deprem/deprem_spektrum.htm

[2]www.benkoltd.com/deprem/deprem_zemin.htm

[3]www.ibb.gov.tr/deprem/deprem.htm

[4]www.koeri.boun.edu.tr/sismo/tbilesenler.htm

[5]www.koeri.boun.edu.tr/sismo/xMagnitude.htm

[6]www.liquefaction.com

EKLER

- Ek 1 Tane apı dağılımının zemin davranışına olan etkileri, kıvam limitleri ve ince malzeme etkisi.
- Ek 2 Sıvılaşma potansiyelinin sayısal yöntemler ve arazi deney yöntemleri ile belirlenmesi.
- Ek 3 Maksimum Yatay Yer İvmesinin “ a_{mak} ” bulunması ve dinamik analiz metotları.

Ek 1 Tane çapı dağılımının zemin davranışına olan etkileri (Özaydın, 1989)

Zeminin su geçirgenliği: Temiz iri taneli zeminler ince taneli zeminlerden çok daha yüksek su geçirgenliğine sahip olmaktadır.

Zemini mukavemeti: İyi derecelenmiş zeminler daha yüksek mukavemete ve taşıma gücüne sahip olmaktadır.

Zeminin sıkışabilirliği: İyi derecelenmiş zeminler, uygulanan yükler altında, kötü derecelenmiş veya üniform zeminlerden daha az sıkışma göstermektedir.

İnce taneli zeminlerin su muhtevalarına göre yapılarında meydana gelen değişiklikler KIVAM LİMİTLERİ ile belirlenir;

w , Su Muhtevası: Zemindeki suyun kütlesinin katı malzemenin kütlesine oranıdır.

W_L , Likit Limit: Zeminin viskoz bir sıvıdan plastik kıvama dönüştüğü su muhtevasıdır.

W_P , Plastik Limit: Zeminin plastik malzemedan yarı plastik malzemeye dönüştüğü su muhtevasıdır.

W_S , Büzülme Limiti: Zeminin yarı plastik malzemedan katı malzemeye dönüştüğü su muhtevasıdır.

I_P , Plastisite İndisi: Zeminin plastik davranış gösterdiği aralıktır; $I_P = W_L - W_P$

İnce taneli zeminler için bu aralığın büyüklüğü zemin davranışları üzerinde büyük etki yapar (Casagrande).

$$I_P \uparrow \longrightarrow \text{Sıkışabilirlik} \uparrow, \text{Şişebilirlik} \uparrow, \text{Su Geçirgenliği} \downarrow$$

İnce Malzeme Etkisi (Çetin, 2002)

Hem laboratuvar çalışmalarından hem de gerçek arazi davranışlarından anlaşıldığı gibi belli bir miktarın üzerindeki siltli malzemenin varlığı, genel zemin davranışını bu ince malzemelerin özellikleri tarafından belirlenmesi sonucunu doğurmaktadır. Bu sınır, siltli malzemenin %12-30'dan fazla olduğu durumlar olarak tanımlanabilir. Daha net bir aralığın tanımlanabilmesi malzemenin tane çap dağılımı ve tane özelliklerine bağlıdır.

İyi derecelenmiş zeminler üniform derecelenmiş veya ayırık tane dağılımlı zeminlerle karşılaştırıldığında daha az boşluk oranına sahip olduklarından, iri taneleri birbirinden ayırmak için daha az siltli-killi malzeme yeterli olmaktadır. Kildeki boşluk oranı silte göre daha fazla olduğundan, daha az killi malzeme ile daha fazla boşluk doldurabilmektedir.

İnce taneli (siltli ve killi) zemin parçacıklarının iri taneleri birbirinden ayıracak kadar ya da genel zemin davranışını kontrol edebilecek miktarlarda olduğu durumlarda, bu tür malzemelerin sıvılaşması ince taneli siltli veya killi malzemenin PLASTİK olmadığı ya da DÜŞÜK PLASTİSİTELİ olduğu ($PI \leq 10-12\%$) durumlarda rastlanır.

Aslında düşük plastisiteli silt ve siltli kumlar hem sıvılaşabilir olmaları hem de boşluk suyu basıncının düşmesini engelleyebilecek kadar düşük geçirimsizlik göstermeleri sebebiyle en tehlikeli zemin türleridir.

Daha fazla bilgi için bkz; Geliştirilmiş Çin Kriterleri (Finn vd., 1994), (Andrews ve Martin, 2000).

Ek 2 Sıvılaşma olasılığının sayısal yöntemler ile belirlenmesi

Sismik sebepli zemin sıvılaşma hesaplarının ilk aşaması, sıvılaşma olasılığının sayısal yöntemler ile belirlenmesidir. Bu amaca yönelik iki yöntem vardır (Çetin, 2002);

- 1) Örselenmemiş numunelerin laboratuvar ortamında test edilmesi,
- 2) Arazi davranışları ile “index” test parametrelerine dayalı ampirik bağıntıların kullanılması.

Laboratuvar testlerinin kullanılması numune alımı ve numunenin arazideki gerilmelere konsolidasyonu sırasındaki örselenmeler sebebiyle oldukça zordur. Tekrarlı basit kayma testi her ne kadar arazide oluşan sismik yükleri en iyi modelleyebilen test olsa da her projede uygulanabilirliği testin zor ve pahalı olması bakımından kısıtlıdır. Üç eksenli dinamik testlerin uygulanabilirliği hem sismik arazi yüklerini iyi modelleyememesi, hem de zor ve pahalı olmaları bakımından kısıtlıdır. Örselenme sorunları, doldurularak örnekleme yöntemleri ile alınan numuneler üzerinde tekrarlı basit kayma ya da bükmeli kayma testlerinin uygulanması ile aşılabılır. Ancak deneylerin zorluğu ve ekonomik olmamaları gibi nedenler, bu narin laboratuvar yöntemlerinin tipik mühendislik uygulamalarında kullanılmalarını kısıtlar.

Bilindiği gibi arazi testlerinin kullanımı mühendislik uygulamalarında oldukça yaygındır. Mevcut uygulamaları özetleyen yayında (NCEER, 1997) dört değişik arazi deney yöntemi ile sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yeterli doygunluğa ulaşıldığı vurgulanmıştır. Bu testler; 1) Standart penetrasyon deneyi (SPT), 2) koni penetrasyon deneyi (KPT), 3) arazi kayma dalga hızının (V_s) ölçülmesi, 4) Becker penetrasyon deneyidir. Bu yöntemler arasında en eski ve en sık kullanılanı SPT’dir.

Ek 3 Maksimum yatay yer ivmesinin (a_{mak}) bulunması

(NCEER Summary Report 1996-1998 ve NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, 2000)

Maksimum yatay yer ivmesi (a_{mak});

1. SHAKE ya da DESRA gibi bilgisayar programları yardımı ile zemin cinsine ve diğer değişkenlere göre hesaplanabilir.
2. Ampirik metotlar yardımı ile deprem süresi, deprem merkezine olan uzaklık ve yerel şartlar göz önüne alınarak bir bağıntı kurulur ve tahmin edilir.
3. En az istenen ve kullanılması tavsiye edilmeyen yöntem ise Idriss ve Seed gibi değişik araştırmacıların geliştirmiş oldukları orantılama yöntemidir. Bu yöntemde belli katsayılar uygulanarak, sıvılaşma olasılığı hesaplanacak zemin katmanındaki hareket etme miktarı tahmin edilmektedir. Bu yöntem çok iyi bir mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir.
4. Hesaplamalarda düşey yer ivmeleri yatay yer ivmelerine göre çok küçük olduklarından ihmal edilebilirler. Ortogonal maksimum iki yer ivmesinin geometrik ortalaması alınmalıdır.

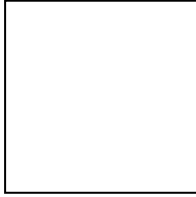
Dinamik Analiz Metotlar (Finn WD.Liam, 2000)

1. Doğrudan Non-Linear Analiz: Bu modelleme türünde zeminin ortalama efektif gerilme etkisi ile lineer olmayan elastik davranış sergilediği kabul edilmektedir. Modelleme efektif gerilmelerin fonksiyonu şeklinde bağıntılar verdiğinden boşluk suyu basıncı analizler sırasında sürekli olarak gözden geçirilmelidir. Sismik çalkantı sırasında doygun zeminlerde iki farklı türde boşluk suyu basıncı oluşur; geçici ve kalıcı. Kalıcı sıvılaşma zemin yapısında plastik deformasyonlar meydana getirir bu durum TARA-3 programı yardımı ile modellenmiştir. Doğrudan non-lineer analiz, yapıların sismik olarak güvenilirliğini amacıyla geçmişte çok sık kullanılmıştır.
2. Elastik – Plastik Metotlar: Yükleme şartları iyi tahmin edildiğinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu amaçla geliştirilen modelleme programları olarak; Dyna-Flow, Diana, Dsage, Dynard ve Fiac verilebilir.

Analizlerde Dikkat Edilecek Konular:

- 1) En uygun gerilme biçimi seçilmelidir (efektif – normal).
- 2) Güvenilir programlar ile çalışılmalıdır.
- 3) Hangi program kullanılırsa kullanılsın el ile bir model oluşturulmalıdır.
- 4) Gerilme–şekil değiştirme bağıntıları hakim yükleme şartları altında modellenmelidir.
- 5) Kalibrasyon deneyleri gerçeğe uygun yapılmalıdır (SPT, CPT, v.s.).

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Yeri	Ankara	
Doğum Tarihi	08/02/1970	
Lise	1985-1988	
Üniversite	1988-1992	
Yüksek Lisans	2002-2005	Y.T.Ü. Kıyı ve Liman Mühendisliği

Çalıştığı kurumlar

Alsim-Alarko	2004	Deniz deşarj şefi
Uransan	1999-2004	Tasarım ve teklif bölümü
Arçelik	1996-1999	Şantiye şefi
Stüdyo 3M	1995-1996	Proje Mühendisi