T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN ZEMİN YETERSİZLİKLERİNİN İRDELENMESİ

Z. Özgen YATMAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2006

T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN ZEMİN YETERSİZLİKLERİNİN İRDELENMESİ

Z. Özgen YATMAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2006

Prof. Dr. Göksenin ESELLER danışmanlığında, Z. Özgen YATMAN'ın hazırladığı "Sıvılaşma Sonucu Oluşan Zemin Yetersizliklerinin İrdelenmesi" konulu bu çalışma 02/02/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Göksenin ESELLER

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. İrfan YEŞİLNACAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Paki TURGUT

Bu Tezin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım

Prof. Dr. İbrahim BOLAT
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	SayfaNo
ÖZ……	i
ABSTRACT……	ii
TEŞEKKÜR……	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ…….....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ……	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……	vii
1. GİRİŞ……..	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR…….....	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM……	10
3.1 Sıvılaşma Kavramı…….....	12
3.1.1. Sıvılaşma……..	12
3.2.1. Sıvılaşma ile ilgili terimler……..	15
3.1.2.1. Ön sıvılaşma…….....	15
3.1.2.2. Sınırlı sıvılaşma – çevrimsel hareketlilik……	15
3.1.2.3. Kum kaynaması……..	16
3.1.2.4. Mikroskobik sıvılaşma……	16
3.1.2.5. Dengeli durum……	17
3.1.3. Zemin yapısının belirlenmesi için zemin sınıflandırılması……..	17
3.1.3.1. Zemin sınıflandırılması……..	17
3.1.3.2. Kıvam (Atterberg) limitleri……	18
3.1.3.3. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)……...	19
3.1.4. Sıvılaştırma potansiyelini etkileyen faktörler……...	20
3.1.4.1. Deprek hareketi özellikleri…….	20
3.1.4.1.1. Odak noktası (Hiposantr)……	20
3.1.4.1.2. Dış merkez (Episantr)……..	20
3.1.4.1.3. Odak derinliği……..	21
3.1.4.1.4. Şiddet……...	21
3.1.4.1.5. Deprem büyüklüğü (Magnitüd)……...	22
3.1.4.2. Sıvılaşmaya karşı dirençli örtü zeminlerinin sıvılaşma üzerindeki etkileri……...	23
3.1.4.3. Sıvılaşma ortamları……	23
3.1.4.4. Sıvılaşabilir zemin derinliği……...	24
3.1.4.5. Yeraltı suyu seviyesinin derinliği……..	24
3.2. İrdeleme Yöntemleri……..	25
3.2.1. Zemin özellikleri…….	25
3.2.1.1. Relatif sıkılık……..	25
3.2.1.2. İnce dane oranı ve plastisite……...	26
3.2.1.3. Sismik geçmişin etkisi……...	27
3.2.1.4. Yapay toprak basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı……	28
3.2.1.5. Zeminin gerilme altında kaldığı süre…….	28
3.2.1.6. Dane şekli, dane boyutu, ve boyut dağılımı……	29
3.2.1.7. Kumların fiziksel özelliklerinin etkisi……	29
3.2.1.8. Kritik boşluk oranı……	30
3.2.1.9. Titreşim……..	31
3.2.2. Deprek kaynak büyüklükleri ile zemin sıvılaşması arasındaki ilişkiler……...	32
3.2.2.1. Zemin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde kaybı……..	33

3.2.2.2. Yanal yayılmalar…… 34
3.2.2.3. Akma hareketi…… 35
3.2.3. Sıvılaşma potansiyeli tahmininde kullanılan fizik kriterler…….. 36
3.2.3.1. Jeolojik kriterler……. 36
3.2.3.2. Zemin bileşimi ile ilgili kriterler…… 37
3.2.3.3. Gerilim şartları ve zemin yoğunluğu ile ilgili kriterler…….. 37
3.2.3.4. Geliştirilmiş Çin kriterleri……... 38
3.2.4. Sıvılaşma potansiyeli analizinde kullanılan arazi ve laboratuar deneyleri……... 39
3.2.4.1. Arazi deneyleri…….. 40
3.2.4.1.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT)……. 41
3.2.4.1.2. Koni penetrasyon deneyi (CPT)…….. 44
3.2.4.1.3. Sismik koni penetrasyon deneyi (SCPT)……. 45
3.2.4.1.4. Yassı dilatometre deneyi……. 47
3.2.4.2. Laboratuvar deneyleri…… 47
3.2.4.2.1. Dinamik üç eksenli deney……... 48
3.2.4.2.2. Burulmalı dinamik deney sistemi…… 50
3.2.4.2.3. Sarsma tablası deneyi…….. 51
3.2.5. Sıvılaşma potansiyeli ihtimaline karşılık kullanılan yöntemler ……..... 52
3.2.5.1. Sıvılaşma potansiyeli analiz yöntemleri…… 52
3.2.5.1.1. Periyodik kayma gerilmesi kriteri …….. 52
3.2.5.1.2. Sıvılaşma potansiyeli analizi……... 54
3.2.5.1.3. Çin milli kodu…….. 58
3.2.5.1.4. Enerji metodu…….. 59
3.2.5.1.5. Başlangıç ivmesi yöntemi……... 60
3.2.5.1.6. Sıvılaşma direnç faktörü…….. 63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA…….. 65
4.1. Araştırma Bulguları……..... 65
4.1.1. Türkiye için sıvılaşma inceleme modeli…….. 65
4.1.2. Deprem sonrası oluşan sıvılaşma etkilerinin değerlendirilmesi……... 67
4.1.2.1. 17 Ağustos Depremi'nin Adapazarı kent merkezindeki sıvılaşma etkisinin değerlendirilmesi…….. 67
4.1.2.1.1.Zemin ve temel mühendislik açısından değerlendirme…….. 68
4.1.2.2. Adana Ceyhan Depremi'nde meydana gelen zemin sıvılaşmasının ve etkilerinin incelenmesi……. 69
4.1.2.2.1. Zemin fiziksel ve dizin özelliklerinin incelenmesi…… 72
4.1.2.3. Erzincan Depremi'nin Erzincan – Ekşisu'daki sıvılaşma ve yerel zemin koşullarına etkisinin değerlendirilmesi……... 75
4.1.2.3.1. Zemin numunelerinin dinamik davranışı……. 76
4.1.2.4. Zemin sıvılaşması sonucunda meydana gelen hasarlarının değerlendirilmesi……. 78
4.1.2.4.1. Sıvılaşmanın zemin üzerindeki etkileri…… 79
4.1.2.5. Sıvılaşma ve etkisine karşı alınması gereken önlemler……. 81
4.1.2.5.1. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde yapı inşaasından kaçınılması……. 82
4.1.2.5.2. Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı inşaası……..... 82
4.1.2.5.2.1. Yüzeysel temeller…… 82
4.1.2.5.2.2. Derin temeller……. 83
4.1.2.5.3. Zemin iyileştirilmesi yoluyla sıvılaşma olasılığının ortadan kaldırılması…… 84
4.1.2.5.3.1. Zeminlerin sertleştirilmesi…….. 84
4.1.2.5.3.1.1. Elektro – osmoz……. 85

4.1.2.5.3.1.2. Dondurma yöntemi…… 86
4.1.2.5.3.1.3. Pişirme yöntemi……. 86
4.1.2.5.3.1.4. Çimentolama (enjeksiyon) yöntemi……..... 87
4.1.2.5.3.1.5. Kimyasal maddelerle enjeksiyon yöntemi……. 88
4.1.2.5.3.2. Dinamik kompaksiyon…… 88
4.1.2.5.3.3. Vibra flatasyon…… 89
4.1.2.5.3.4. Taş kolonlar……. 89
4.1.2.5.3.5. Sıkıştırma enjeksiyonu…… 89
4.1.2.5.3.6. Sıvılaşacak zeminin, sıvılaşmayacak bir zeminle yer değiştirmesi…….. 90
4.1.2.5.3.7. Drenaj teknikleri……..... 90
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER ……. 91
5.1. Sonuçlar ……..... 91
5.2. Öneriler…… 93
KAYNAKLAR……..... 95
ÖZGEÇMİŞ……. 98
EKLER……. 99
ÖZET…… 101
SUMMARY…….. 102

ÖZ

Yüksek Lisans Tezi

SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN ZEMİN YETERSİZLİKLERİNİN İRDELENMESİ

Z. Özgen YATMAN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Göksenin ESELLER
Yıl: 2006, Sayfa:102

Bu araştırmada, suya doygun kohezyonsuz zeminlerde boşluk suyu basıncının artışına bağlı olarak efektif gerilmelerin azalması ve zeminin kayma mukavemetini kaybetmesi sonucunda meydana gelen zemin sıvılaşması ve yüzeye yakın kum tabakalarında kum tanecikleri arasındaki boşluklara ani deprem kuvveti uygulandığı zaman oluşan sıvılaşma sonrasındaki hasarlar incelenmiştir.Sıvılaşma ortamları, sıvılaşma tipleri, sıvılaşmayı etkileyen faktörler, depremlerde rapor edilen bina oturma ve tilt değerleri, deprem kaynak büyüklükleriyle zemin sıvılaşması arasındaki ilişkiler, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan metodlar belirtilmiştir. Türkiye'de meydana gelen depremlerde oluşan zemin sıvılaşmalarıyla ilgili örneklemeler yapılmış; zemin sıvılaşma sonuçları, sıvılaşma hasarlarına karşı alınabilecek önlemler, sıvılaşmış zeminlerin iyileştirilme yöntemleri irdelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Zemin sıvılaşması, boşluk suyu basıncı, sıvılaşma potansiyeli.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION OF THE SOIL INSUFFICIENCY

RESULTED FROM LIQUEFACTION

Z. Özgen YATMAN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Göksenin ESELLER
Year: 2006, Page:102

In this study, decrease of effective stres depend on pore water pressure increase in water saturated non- cohesive soil, liquefaction resulted from the loss of shear strength of the soil and hazards developed due to sismic shock applied to the pores between the sand particles close to the surface are investigated. Liquefaction areas, types of liquefaction, factors effecting liquefaction values of the building settlement and tilting reported from the earthquakes, the relationship between liquefaction and earthquake magnitude and methods used in the determination of the liquefaction potential are investigatied. Case studies of the liquefaction resulted from earthquakes in Turkey are analyzied, the counter measures taken provent liquefaction damage and soil improvement methods for the liquefied soil were discussed.

KEY WORDS: Liquefaction of soil, pore water pressure, liquefaction potential

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna her aşamasında bana yardımcı olan, danışmanım Prof. Dr. Göksenin ESELLER'e, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Yrd. Doç. Dr. Mehmet GÜMÜŞÇÜ'ye, Arş. Gör. Sevgi DEMİREL'e ve Arş. Gör. A. Dilek ATASOY'a, ayrıca çalışmam sırasında, yoğun iş temposuna rağmen desteğini esirgemeyen eşim Dr. Murat YATMAN'a ve dünyalar tatlısı oğlum Arda YATMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1.	1979 California depreminin etkisiyle suya doygun kumlu arazide meydana gelen zemin sıvılaşması……..	13
Şekil 3.2.	1964 Niigata depreminde sıvılaşmanın yapılara olan etkisi…….	13
Şekil 3.3.	Sıvılaşmanın mekanizması……...	14
Şekil 3.4.	1998 Ceyhan-Misis depremi sıvılaşma (kum krater dizini)……..	16
Şekil 3.5.	Kohezyonlu zeminlerde V-w ilişkisi ve kıvam limitleri……...	19
Şekil 3.6.	17 Ağustos 1999 Adapazarı depreminde Adapazarı kent merkezinde sıvılaşma sonucu zemine gömülmüş bina…….	24
Şekil 3.7.	Depremin sıvılaşmaya etkisi…….	32
Şekil 3.8.	Sıvılaşmaya bağlı olarak yanal hareket……	34
Şekil 3.9.	17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi depreminde sıvılaşma sonucu devrilmiş bina……	35
Şekil 3.10.	Şahmerdana takılan koni sıkıştırma ucu……...	41
Şekil 3.11.	Dinamik üç eksenli deney aleti…….	49
Şekil 3.12.	Sınır periyodik gerilme oranı-N_l değerleri……...	53
Şekil 3.13.	Normalize edilmiş darbe sayısı ile çevrimsel gerilim oranı arasındaki ilişki……...	56
Şekil 3.14.	Başlangıç ivme değerleri önerisi……...	62
Şekil 4.1.	17 Ağustos 1999 Adapazarı depreminde sıvılaşma sonucu yan yatmış bina……...	67
Şekil 4.2.	Asmalı Köprü yakınlarındaki sıvılaşma……...	69
Şekil 4.3.	Abdioğlu Köyünde su deposu kulesi altındaki 5cm'lik farklı oturmalar……	70
Şekil 4.4.	Sıvılaşmış kuma ait dayk…….	71
Şekil 4.5.	1998 Ceyhan depreminde sıvılaşma…….	72
Şekil 4.6.	Ceyhan Havzası nehir yatağının üst tabakalarındaki sıvılaşmış zeminden alınan zemin numunelerinin granüleometri eğrisi……...	73
Şekil 4.7.	Ceyhan Havzası nehir yatağının üst tabakalarındaki sıvılaşmamış zeminden alınan zemin numunelerinin granüleometri eğrisi……...	75
Şekil 4.8.	SK.4A Sondajı enkesiti…….	77
Şekil 4.9.	Elektro-Osmoz yöntemi……	85
Şekil 4.10.	Pişirme yönteminin uygulanışı…….	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1.	Relatif sıkılığa (D_r) bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli…….....	25
Çizelge 3.2.	SPT-N değerleri ile relatif sıkılık ve nisbi yoğunluk sınıflaması……..	43
Çizelge 3.3.	SPT-N değerleri ile kıvam ve serbest basınç dayanımları sınıflaması……..	44
Çizelge 3.4.	Tasarım deprem şiddetine göre verilen P_{so}.....	45
Çizelge 3.5.	M= 7.5 dışındaki depremler için düzeltme katsayıları……..	55
Çizelge 3.6.	Sıvılaşma risk dereceleri…….	58
Çizelge 3.7.	N_0değerinin belirlenmesi……	58
Çizelge 4.1.	Derinlik ile ayarlama faktörü r_d arasındaki ilişki……	66
Çizelge 4.2.	Deprem bölgelerinde etkin ivme oranları……..	66
Çizelge 5.1.	Deprem şartnamesi zemin grupları…….....	99
Çizelge 5.2.	Deprem şartnamesi yerel zemin sınıfları…….....	100

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Maksimum Genlik
a	Deprem İvmesi
a_{max}	Maksimum İvme
a_d	Tasarım İvme Değeri
a_t	Başlangıç (eşik) İvmesi
C	Kil
C_c	Derecelenme Sayısı
C_N	Düzeltme Faktörü
C_U	Uniformluluk Sayısı
c	Kohezyon
d_w	Yeraltı Su Seviyesi
d_y	Üstteki Sıvılaşmayacak Tabakanın Kalınlığı (m)
d_s	Deney Yapılan Zeminin Derinliği (m)
d	İnce Dane (mm)
d_{50}	Ortalama Dane Boyutu
D	Granülometri Eğrisinde Elekgöz Çapı
D_{10}	Tane Büyüklüğü Dağılım Eğrisinde %10 Geçen Yüzdeye Karşılık Gelen Çap
D_{60}	% 60 Geçen Yüzdesine Karşılık Gelen Çap (mm)
D_{30}	% 30 Geçen Yüzdeye Karşılık Gelen Çap (mm)
D_r	Relatif Sıkılık
ε	Birim Deformasyon
E_R	Düşüş Enerjisi
e	Boşluk Oranı
e_{cr}	Kritik Boşluk Oranı
e_{min}	Minimum Boşluk Oranı
e_{max}	Maksimum Boşluk Oranı
Fa	Güvenlik sayısı
F_1	Güvenlik Katsayısı
F_s	Sıvılaşma Emniyet Faktörü
g	Yer İvmesi
G	Kayma Modülü
G_t	Zeminin Sekant Kayma Modülü
G_{max}	Dinamik Kayma Modülü
G	Çakıl
H	Yüksek (derece)
H	Seviye Kalınlığı (m)
I	Tasarım Deprem Şiddeti
I_L	Sıvılaşma İndeksi
I_o	Deprem Şiddeti
I_P	Plastisite İndisi
i	Derinlikle Artan Seviye Sayısı
L	Şiddetli Bir Depremde Meydana Gelebilecek Kayma Gerilmesi Oranı
L	Düşük (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine Göre)
LL	Likit Limit
M	Silt

ML	Düşük Plastisiteli Silt
M	Deprem Büyüklüğü
M_x	Herhangi Bir Depremin Büyüklüğü
M_l	Yüzey Dalgası Büyüklüğü
MH	Yüksek Plastisiteli Silt
M_w	Moment Büyüklüğü
n	Değerlendirilen Zemin Seviyelerinin Sayısının Toplamı
N	Darbe Sayısı
N_1	Düzeltilmiş Darbe Sayısı
N_{cr}	Kritik SPT Sayısı
$N_{o:}$	Tasarım Deprem Şiddetine Bağlı Ampirik N Değeri
N_{60}	Normalize Edilmiş Darbe Sayısı
N_{eq}	Tekrarlı Kayma Sayısına
O	Organik
OL	Düşük Plastisiteli Organik
OH	Yüksek Plastisiteli Organik
Pt	Turba ve Diğer Fazla Organik Zeminler
%P	Granülometri Eğrisinde Geçen Yüzde
P	Kötü Derecelenmiş
p_s	Penetrasyon Dayanımı
p_{so}	Kritik Penetrasyon Dayanımı
p_c	Yüzde Olarak İnce Dane
q_c	Uç Direnci
R	Odak Uzaklığı (km)
$_{rd}$	Zemin Tabakası Derinliği Azaltma Faktörü
S	Kum
SP	Çakıllı Kumlar
U	Boşluk Suyu Basıncı
V_S	Kayma Dalgası Hızı
V_P	Basınç Dalgası Hızı
W	Sıvılaşma Potansiyelini Azaltma Faktörü
W	İyi Derecelenmiş
w	Su Muhtevası
w_p	Plastik Durum
w_L	Likit Durum
w_S	Rötre (Büzülme) Limiti
z	Serbest Yüzeyden İtibaren Seviyelerin Orta Noktalarının Derinliği (m)
τ_1	Sıvılaşma dayanımı
τ	Kayma Gerilmesi
τ_p	Gerilme Seviyesi
τ_{max}	Maksimum Kayma Gerilmesi
τ_s	Sınır Kayma Gerilmesi
τ_o	Ortalama Kayma Gerilmesi
τ_{eq}	Eş tekrarlı kayma gerilmesinin
σ_o	Toplam Örtü Gerilimi
σ_o'	Efektif Düşey Örtü Gerilimi
σ_v	Toplam Düşey Gerilme
γ	Sismik Kayma Deformasyonu
γ_t	Başlangıç Kayma Deformasyonu
ρ	Zemin Yoğunluğu
α	Sınır Periyodik Gelişmesi Oranı
(Φ)	İçsel Sürtünme Açısı

Kısaltmalar

AKO	Aşırı Konsolidasyon Oranı (Over Consalidation Ratio)
CPT	Koni Pentrasyon Deneyi
CSRE	Depremin Neden Olacağı Tekrarlı Gerilme Oranı
DMT	Yassı Dilatometre Deneyi
SCPT	Sismik Koni Penetrasyon Deneyi
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
Y.A.S.S	Yeraltı Su Seviyesi
200 No.lu Elek	74 μm Çapındaki Zeminin Geçebildiği Elek

1. GİRİŞ

Sıvılaşmanın insan hayatına ve ekonomiye olan olumsuz etkilerinden dolayı bu konuda yapılan araştırmalar günden güne artmakta ve gittikçe önem kazanmaktadır. Özellikle deprem etkisiyle meydana gelen sıvılaşma geoteknik mühendisliğinin en önemli, ilginç ve tartışmaya açık konularının başında gelmektedir.17 Ağustos 1999 Adapazarı Depreminde zemin sıvılaşması ve zemin çökmesi sonucunda yüzlerce binanın temeli zeminin içine gömülmüş veya aşırı dönerek binaların kütle olarak devrilmesine neden olmuştur. Geçmişte meydana gelmiş büyük depremler, 1964 Alaska, 1964 Niigata, 1989 Loma-Prieta, 1995 Hyogoken-Nambu sıvılaşmanın hasara neden olan etkisini kanıtlamıştır. Bir çok büyük deprem tektonik plakaların sınırları çevresinde California'da (USA) ve Avusturya Kıta'sında meydana gelmiştir (Liyanapathirana ve Poulos, 2003).

1964 yılında üç ay içinde meydana gelen Alaska ve Niigata depremlerinde sıvılaşmadan kaynaklanan büyük yıkımlar, geoteknik mühendislerinin bu konuya olan ilgilerim arttırmıştır. Her iki depremde sıvılaşma sonucu şev kaymaları, köprü ve bina temellerinin göçmesi ve gömülü yapıların yüzmesi şeklinde sorunlar yaşanmıştır, Sıvılaşma, özellikle bu iki depremden sonra yüzlerce araştırmacı tarafından çalışma konusu yapılmış, değişik terminolojiler, yöntemler ve analiz metodları önerilmiştir. Tekrarlı yükleme durumlarında meydana gelen sıvılaşma olayı depremler sonucu anlaşılmış daha yeni bir kavram olsa da, statik yükler altındaki sıvılaşma Casagrande'nin 1936 yılında yaptığı çalışmalardan itibaren bilinmektedir. 1936 yılında meydana gelen Fort Peck, Montana Barajındaki kaymalar, Aşağı Mississippi Nehri kıyılarındaki akma kaymaları bu çalışmalara örnek teşkil etmişlerdir. Depremlerin dayanımsız zeminlerde ve sağlam zeminlerde yüzeyin hassasiyetini harekete geçirmesi, sıvılaşmadan kaynaklanan büyük hasarların meydana gelmesine neden olmaktadır. Kaliforniya Üniversitesi'nden H.B. Seed sıvılaşmanın nedenlerini ve mekanizmasını araştırmıştır.

Seed ve Idriss (1967) Japonya'daki 1964 Niigata depremi sırasında birçok binada oturma ve devrilmelerin, temellerin altındaki kumun sıvılaşmasından meydana geldiğini belirlemişlerdir. Bu ilk çalışmalardan sonra laboratuvar ve arazi deney yöntemlerinin geliştirilmesi ile tekrarlı yükler altında kumlu zemin tabakalarının davranışı, birçok araştırmacı tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Depremlerin yapılarda yol açtığı hasarların yerel zemin koşullarının değişik etkileri altında kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle yapıların inşaasından önce yapılan temel zemini etüdlerinde, arazideki temel zemini oluşturan tabakaların muhtemel bir deprem sırasında göstereceği davranışın da incelenmesi gerekli olmaktadır. Depremlerde suya doygun kumlu zemin tabakalarında sıvılaşmanın oluşmasına yol açan ana neden yer titreşimlerinden dolayı meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleri sonucunda boşluk suyu basıncının çevre basıncına eşit bir değere gelecek şekilde artmasıdır.

Kohezyonsuz zeminler, özellikle sıvılaşma olasılığı açısından kumlu zeminler, tekrarlı yükler altında, bulunduklarından daha sıkı bir konuma geçmek isterler. Kuru kumlar üzerinde birçok araştırmacı tarafından yapılmış değişik dinamik deneylerde bu hacim azalması ve sıkılığın artması her seferinde gözlenmiştir. Suya doygun zeminlerde ise tekrarlı yükler altında kuru zeminlerde gözlenen hacimsel sıkışmaya taneler arasını dolduran boşluk suyu basıncı engel olmaktadır. Zemin üst tabakalarda meydana gelen sıvılaşmayı ve tabakalarının davranış biçimlerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Zemin özelliklerinin belirlenmesinde arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır. Laboratuvarda hazırlanmış numunelerin tane dağılımı, sıkılığı ve etkisi altında kaldıkları konsolidasyon basıncı aynı olsa da, arazideki zemin yapısı ve gerilme geçmişi laboratuvar koşullarında tam anlamıyla oluşturulamamaktadır, Dolayısıyla laboratuvarda hazırlanmış numunelerin davranış biçimi arazideki davranış biçiminden farklı olmaktadır. Sıvılaşma konusunda bir çok araştırmacı tarafından, sıvılaşmanın neden ve nasıl olduğu laboratuar ve arazi deneyleri ile ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre sıvılaşmaya; rölatif sıkılık, tane yüklemenin durmasını izleyen sürede oluşmuş boşluk yapısı, tane özellikleri, zemin

tabakalarının sismik geçmişi, yatay toprak basıncı, ince tane oranı ve plastisite gibi faktörler etkili olmaktadır. Bu bölümde sıvılaşma ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır. Kum-siltli kum gibi zeminler içeren tabakaların, bir deprem esnasında sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek amacıyla arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilebilen zemin ve sismik parametrelerin bir arada kullanıldığı çeşitli kriterler ve ampirik formüller önerilmektedir. Aktif deprem kuşağı içerisinde yer alan yurdumuzda da sıvılaşma olayı büyük önem taşımakta ve bu konuda yapılacak çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu konuda bir örnek teşkil edeceği düşünülen bu çalışmada, ikinci bölümde sıvılaşma konusunda genel bilgiler verilmiş, sıvılaşma ile ilgili yapılan önceki çalışmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde sıvılaşma ile ilgili tanımlarla sıvılaşma kavramı değerlendirilmiş, zemin özelliklerinin sıvılaşmaya etkisi, deprem kaynak büyüklükleriyle zemin sıvılaşma arasındaki ilişkilerden ve sıvılaşma potansiyelinin analizinde kullanılan, arazi ve laboratuar deneylerinden ve irdeleme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde değerlendirme ve tartışma kapsamında, Türkiye için sıvılaşma inceleme modeli incelenmiş, Adapazarı Depremi, Adana -Ceyhan Depremi ve Erzincan Depremi sonucu meydana gelen zemin sıvılaşması ve etkileri, sıvılaşma potansiyeli ve yerel zemin koşulları incelenmiştir. Sıvılaşmaya karşı alınması gereken tedbirler anlatılmıştır. Beşinci bölümde sonuç ve öneriler şeklinde çalışma tamamlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sıvılaşmanın varlığının bilinmesine rağmen, öneminin anlaşılması ve araştırmaların başlatılması, depremlerin yıkıcı etkileri göz önünde tutularak yaklaşık otuz yıl önceye dayanmaktadır. Sıvılaşma sözcüğü ilk kez Mogami ve Kubo (1953) tarafından isimlendirilmiştir (Kramer, 1996).

Castro ve Paulos (1975), sıvılaşmayla ilgili yaptığı çalışmalara sabit bir kayma gerilmesi ve çevre gerilmesi altında kumun hacminin sabit kalarak sürekli olarak deforme olduğu durumu (dengeli durum) araştırmıştır.

Dowrick (1975), sıvılaşma potansiyelini incelemiş, yer ivmesinin relatif sıkılığın artışına bağlı olarak sıvılaşma potansiyelini arttırdığını gözlemlemiştir.

Seed (1976), sıvılaşmayı boşluk suyu basıncının tekrarlı yükler altında sürekli artması ve koruması ile zemin kayma mukavemetinin kayıp olması ve çok büyük şekil değiştirmelerin ve akmaların oluştuğu bir durum diye tanımlamıştır. Tekrarlı yükler altında boşluksuyu basıncının artarak bir yükleme çevrimi sonunda efektif çevre basıncına eşit olmasını ön sıvılaşma diye tanımlamıştır.

Castro ve Paulos (1976), tarafından suya doygun kohezyonsuz zeminlerde yapılan araştırmalarda, uygulanan konsolidasyon basınçları arttıkça numunelerin dinamik mukavemetleri azalarak sıvılaşabilirliğin artmakta olduğu gözlenmiştir.

Ishihara (1980), tarafından aynı tip kum numunelerini kullanarak burulmalı kesme deneylerinde aşırı yüklenmişliğin etkisi incelenmiş, aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığı belirtilmiştir.

Seed ve Idriss (1981), periyodik kayma gerilmesi kriteri yöntemiyle zemin tabakalarının sıvılaşma emniyet faktörü F_s' yi belirlemeye çalışmışlardır.

$F_s = \tau_s / \tau_o$ şeklinde ifade edilir.

Burada,

τ_s : Belli bir zeminde sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi,

τ_o : Aynı zeminde belli bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir.

$F_s \leqslant 1$ ise sıvılaşma potansiyeli yüksek,

$F_s > 1$ ise sıvılaşma potansiyeli yoktur.

Soydemir ve Özkan. (1981), tarafından yapılan bu çalışma ile Türkiye için bir taslak şartname önerilmiştir. Öneri düzenlendiği yıl gereği 1975 Deprem Yönetmeliği verileri esas alınmıştır. Bu model, Seed (1979), tarafından oluşturulmuş çalışmaların ilkeleri üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşımda incelenen arazi için, sahanın etkisi altında bulunduğu sismik durumun doğuracağı ortalama devirsel kayma gerilmesi derecesi incelenmekte ve bu derece ilgili arazide bulunan kum / kumlu zeminlerin sıkılık oranı ve yeraltı su seviyesi ile ilişkilendirilerek sıvılaşmanın gerçekleşeceği limit devirsel oranı ile karşılaştırılmaktadır

Das (1983), tekrarlı yüklerin kum tabakası içindeki boşluk suyu basıncını desteklediği zaman, toplam normal gerilmenin, boşluk suyu basıncına eşit değere ulaşabileceğini belirlemiştir. Suya doygun, gevşek kum ve kumlu zeminler, tekrarlı yükler etkisinde, sıkışma ve hacim daralması eğilimi gösterirler. Bu eğilim, drenajın olmadığı koşullarda, boşluk suyu basıncını artırır. Bu gibi durumda, kohezyonsuz zemin kayma dayanımını kayıp eder ve bir sıvı gibi davranarak büyük yer değiştirmelerine maruz kalır. Böylece sıvılaşma evresine geçilmiş olur.

Iwasaki ve ark. (1984), sıvılaşma indeksi kriteri yöntemiyle bir zemin tabakasının sıvılaşma emniyet faktörü F_L' yi incelemişlerdir.

$$F_L = R / L$$

Burada;

R:Zeminin sıvılaşma anındaki tekrarlı kayma oranı parametresi.

L: Şiddetli bir depremde meydana gelebilecek kayma gerilmesi oranıdır

Yukarıdaki eşitlikte, güvenlik sayısı F_L, birden küçük bir değer alırsa, zeminin deprem sırasında sıvılaşacağı kabul edilir.

Liao ve Whitman (1986)'da SPT deney sonuçlarına ilişkin düzenlemeler yapmışlar ve C_N jeolojik gerilme düzeltmesi için en çok kullanılan eşitliği önermişlerdir.

$$C_N = 1/ \sqrt{\sigma}$$

Bu formülde efektif düşey gerilmenin birimi $\sqrt{\sigma}$ kg/cm^2 olarak verilmektedir.

Das (1993), daneli zeminlerdeki sıvılaşma olayı incelemek için sarsma tablası deney aletiyle kumda tekrarlı gerilme durumu oluşturmuş ve deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır.

a) Başlangıç relatif sıkılık $\leq$ % 45 için ön sıvılaşma oluşturacak yükseklikteki tekrarlı gerilme oranı ayrıca limitsiz kayma uzamasına yol açar. Bu durum sıvılaşmaya karşılık gelir.

b) Başlangıç relatif sıkılık > % 45 için ön sıvılaşma oluşturacak yükseklikteki tekrarlı gerilme oranı sınırlı kayma uzamasına yol açar. Buna zemin sınırlı uzama potansiyeli veya çevrimsel hareketlilik durumu denir. Zeminin başlangıç relatif sıkılığının yükselmesiyle sınırlayıcı uzama potansiyeli düşer.

Wang ve Law (1994), sıvılaşabilir zeminlerin karakteristiklerini şu şekilde özetlemişlerdir.

Ortalama dane boyutu d_{50} = 0.02 – 1.00mm.
İnce dane (d < 0.005mm) içeriği % 10' dan az.
Üniformluk katsayısı (d_{60} / d_{10}) < 10
Plastisite indisi I_p < 10

Wang ve law (1994), tarafından bir zemin kütlesindeki aşırı boşluk suyu basıncından dolayı kum ve suyun borulanarak dışarı çıkmasını incelenmiştir.

Wang ve Law (1994), sıvılaşma potansiyelini etkileyen parametrelerden yeraltı suyu seviyesinin derinlik durumunu incelemiş ve yeraltı suyunun derinlinin 5m'nin altında olduğu kesimlerde sıvılaşma olayını gözlemlemişlerdir. Sıvılaşma potansiyelini etkileyen faktörlerden relatif sıkılık değeri arttıkça zeminlerde oturma ve boşluk suyu basıncının azaldığını gözlemlemiştir

Wang ve Law (1994), sıvılaşmaya yol açan depremin eşik şiddetinin büyüklüğü 5'in altında, şiddeti VI' nın altında, orta ve sığ derinlikteki bir deprem sonucu sıvılaşma olayının meydana geldiğini gözlemlemişler, sıvılaşmayı tetikleyen deprem etkisinin hissedilmediği maksimum odak uzaklığını belirtmişlerdir.

Wang ve Law (1994), enerji metodu yöntemiyle titreşim sırasındaki enerji kaybının, zeminin sismik harekete karşı tepkisini gösteren bir parametre olarak kullanılmasını incelemişlerdir.

Erken ve Ansal (1994), tarafından dinamik üç eksenli deney sisteminde örselenmemiş düşük plastisiteli siltli kum numunelerinin davranış biçimlerini incelenmiştir ve kumlu zeminin içerdiği silt oranının dinamik mukavemetini olumsuz olarak etkilediğini, silt oranı arttıkça mukavemette azalmanın olduğunu görülmüştür.

Kramer (1996), sıvılaşma terimini suya doygun kohezyonsuz zeminlerin drenajsız koşullarda statik, geçici veya tekrarlı şekillerde örselenmesiyle oluşan birtakım zemin deformasyonlarını ifade etmek için kullanmıştır.

Ishihara (1996), zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirleyebilmek için kumlu zeminlerde tekrarlı üç eksenli deney yardımıyla eksenel gerilme uygulandıkça boşluk suyu basıncı artışını incelemiştir. Gevşek, orta sıkı ve sıkı boşluk suyu basıncının oluşturulmasıyla zemin dayanımını belirlemeye çalışmıştır.

Özaydın (1996), CPT deneyinde zeminin cinsi ve sıkılık derecesi zemin profili derinliği boyunca sürekli olarak inceleyebilmiş, CPT koni direnci ile SPT darbe sayısı arasındaki korelasyonlardan kayma dalgası hızına geçilebildiğini araştırmıştır.

Penetrometre ölçümlerinde çok önemli bir gelişme 1980'lerde konik ucun hemen arkasına bir piyezometrenin yerleştirilmesiyle oluşmuştur. Önalp (1997), piyezokoni aletinde (CPTU) zeminin kayma direnci yanında aşırı konsolidasyon oranı ve sıvılaşma potansiyelini ölçmeyi başarmıştır.

Baykal ve Balcı.(1998), tarafından sıvılaşma sırasında zemin tarafından tüketilen enerji ve bunun yapıya etkisi araştırılmış ve aşağıdaki uygun sonuçlar bulunmuştur.

1) Sıvılaşan tabaka taban kayasından gelen sismik kayma dalgaları izole edici sıvı bir ortam gibi davranır.
2) Sıvılaşan tabakaya ulaşan sismik enerji, kum kaynamaları ve zemin kaynamaları yoluyla emilir. Rezidual sismik enerji büyük ölçüde zayıflar ve büyük yıkım gücü indirgenir.
3) Laboratuvarda yapılan dinamik deneylerde, sıvılaşma oluşmadan önce zemin numunelerinin önemli ölçüde dinamik gerilme aldıkları görülmüştür.

4) Sıvılaşma meydana gelir gelmez zemin yumuşar ve büyük gerilmeler alıp iletecek durumu kaybolur. Sıvılaşan kütle tarafından indirgenen gerilme seviyesi ile hasar oluşma potansiyeli düşer.

Durgunoğlu (2000), SCPT ve deneylerinde elde edilen değerlerin diğer kuyu içi yöntemlerle elde edilen dinamik zemin parametreleri ile büyük uyum içinde olduğunu belirlemiştir.

Ulusay (2001), en az şekilde örselenmemiş numune alınması için laboratuar deneyleri için alınan numunelerle ilgili sınırlamaları belirlemiştir. Bunlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. Numune alımı sırasında örselenme meydana gelir ve yerindeki gerilim durumunun değişimi, ayrıca örneklerin laboratuvara nakli sırasında örselenme olabilir.
2. Laboratuar örnekleri küçük olup, ölçek etkisi söz konusudur.
3. Sınır koşulları ilksel gerilim koşulları bozulan örnekler üzerinde laboratuvarda arazi koşullarının sağlanması mümkün olmamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Sıvılaşma kavramı ve sıvılaşma ile ilgili terimler için otuz yıllık tarihi süreçte yapılan tanımlamalar esas alınmıştır. Zemin yapısının değerlendirilmesi için zemin sınıflandırılması, kıvam (Atterberg) limitleri, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Sıvılaşma potansiyelini etkileyen faktörler; Deprem hareket özellikleri, sıvılaşmaya karşı dirençli örtü zeminlerinin sıvılaşma üzerindeki etkisi, sıvılaşma ortamları, sıvılaşabilir zemin derinliği, yeraltı suyu seviyesinin derinliği incelenmiştir.

Zeminin yapısal özelliklerini belirleyen parametrelerden; Relatif sıkılık, ince dane oranı ve plastisite, sismik geçmişin etkisi, yapay toprak basıncı, zeminin gerilme altında kaldığı süre, dane şekli, dane boyutu ve boyut dağılımının sıvılaşmaya etkisi irdelenmiştir. Deprem kaynak büyüklükleriyle sıvılaşma arasındaki ilişkilerin sonucunda; Zemin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde kaybı, zeminde yanal yayılmaların ve akma hareketinin oluştuğu belirtilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli tahmininde kullanılan fiziki kriterler, sıvılaşma potansiyeli ihtimaline karşılık kullanılan yöntemler, sıvılaşma potansiyeli analizinde kullanılan arazi ve laboratuar deneyleri incelenmiştir.

Türkiye için belirlenen sıvılaşma inceleme modeli ile deprem sonrası oluşan sıvılaşma etkilerinin genel değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme sonrasında, 17 Ağustos 1999 Adapazarı Depremi'nin Adapazarı kent merkezindeki sıvılaşmaya etkisi, zemin ve temel mühendisliği açısından, Adana-Ceyhan Depremi'nde meydana gelen zemin sıvılaşmasıyla, değişen zeminin fiziksel ve dizin özellikleri açısından, Erzincan Depremi sonrası Erzincan-Ekşisu'da meydana gelen zemin sıvılaşmasının, yerel zemin koşullarına etkisiyle birlikte zemin numunelerinin dinamik davranışı araştırılmıştır. Depremler sonucu oluşan sıvılaşmanın ve etkilerinin tespitinde, sıvılaşma potansiyeli analizinde kullanılan arazi deneyleri (SPT, CPT) ve irdeleme yöntemleri esas alınmıştır.

Zemin sıvılaşması sonucunda meydana gelen hasarlar, sıvılaşmanın zemin üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde tutularak detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Bu hasarların oluşmaması için alınması gereken önlemler ve yapısal tedbirler afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmeliğin zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin irdelenmesi ile ilgili hükümlerine bağlı kalınarak bütün yönleriyle incelenmiştir.

3.1. Sıvılaşma kavramı

3.1.1. Sıvılaşma

Sıvılaşma sözcüğü, ilk kez Mogami ve Kubo (1953) tarafından önerilmiştir (Kramer, 1996). Tarihsel süreçte, suyun zemin ortamından uzaklaşamadığı koşullar altında suya doygun kohezyonsuz zeminlerin, tekdüze geçici veya tekrarlanmalı şekilde örselenmesinden kaynaklanan zemin deformasyonlarını kapsayan, davranış biçimlerinin tümü için ayırım yapılmaksızın kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, 1964 Niigata Depremi (Japonya) sırasında yüzeyde gözlenen yaygın kum birikimleri ve yapılarda zemine bağlı olarak gelişen yana yatma, oturma vb davranışlar sıvılaşmanın özellikle dinamik bir yükleme ile drenajsız koşullarda su basınçlarının ani gelişimi gibi iki önemli faktörden etkilenen bir zemin davranışı olduğu düşünülmeye başlanmıştır (Youd, 1984; Ishihara, 1993; Kramer, 1996). Depremin oluşturduğu titreşimlerin etkisiyle gevşek, sature -suya doygun- durumdaki taneli zeminlerin taşıma kapasitelerin kaybederek "sıvı" gibi davranış göstermesine geoteknik literatüründe "zemin sıvılaşması" denilmektedir.1979 California depreminin etkisiyle kum ve kumlu tabakaların bulunduğu açık alanlarda Şekil 3.1.' de görüldüğü gibi sıvılaşma meydana gelmiştir. Sıvılaşma, geniş halk kitleleri arasında "kum fışkırması" ve "kum kaynaması" olarak bilinmektedir (Ulusay,2000). Sıvılaşma tipleri aşağıda sıralanmaktadır.

1. Kum fışkırması

-Kum volkanı

-Kum krateri

2. Yanal yayılmalar

3. Kademeli yarıklar



Şekil 3.1. 1979 California Depreminin etkisiyle suya doygun kumlu arazide meydana gelen zemin sıvılaşması (Liyanapathirana ve Poulos, 2003)

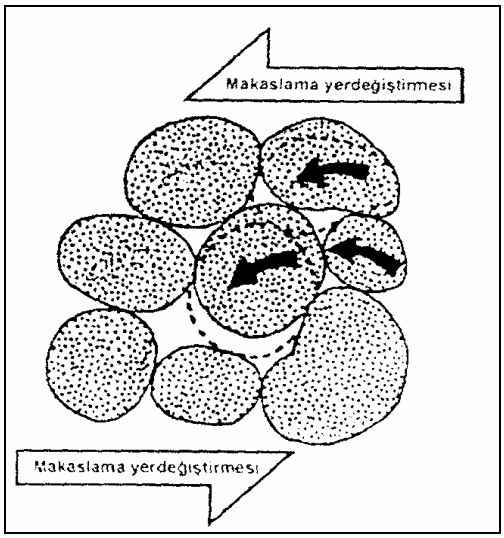
Geoteknik mühendisler, Alaska ve Niigata depreminden önce, depremin neden olduğu sıvılaşma olgusu üzerinde ciddi bir çalışma yapmamışlardır. 1964 Niigata depreminde sıvılaşmanın yapılarda meydana getirdiği büyük hasarlar göz önünde tutularak sıvılaşma potansiyelinin araştırılmasının nedenli önemli olduğu anlaşılmıştır. Şekil 3.2.' de 1964 Niigata depreminde sıvılaşmanın yapılar üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 3.2. 1964 Niigata depreminde sıvılaşmanın yapılara olan etkisi

(Liyanapathirana ve Poulos, 2003)

Şekil 3.3.' de görüldüğü gibi, deprem sırasında sismik dalgalar suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde yayılırken, tekrarlı makaslama kuvvetleri zemin tanelerinde yer değişimlerine neden olur. Bu koşullar altında gevşek halde bir arada bulunan taneli yapının bozulması, dolayısıyla zemin taneciklerinin birbirine yakınlaşması ve bu davranış sırasında tanelerin temas noktalarındaki gerilimin taneleri çevreleyen suya aktarılması söz konusudur. Sismik dalgaların etkisiyle gözenek suyu basıncının artması zemin tanelerinin bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek taneleri birbirinden uzaklaştırır ve böylece zemin dayanımım yitirir. Bu koşullar altında zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı malzeme davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak suyla birlikte yüzeye doğru hareket eder ve yüzeyden çıkmaya başlar. Böylece zemin sıvılaşma evresine geçmiş olur.



Şekil 3.3. Sıvılaşmanın mekanizması (Youd, 1984)

Zeminin sıvılaşması sonucu, yapı zemine batma veya hafif yapılarda yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi gösterebilir. Sıvılaşarak kayma dayanımı kaybolan zeminde, yön değiştiren küçük kayma gerilmeleri büyük şekil

değiştirmelerine sebep olur ve yapılarda zemin göçmesi hasarları ve meydana gelir. Zemin sıvılaşma olayı yaygın bir şekilde depremlerde gözlemlenebileceği gibi, sıvılaşma potansiyeli taşıyan daneli zeminlerin etrafında yaratılan yapay titreşimlerden de, örneğin çakma kazıkların çakımı sırasında oluşan titreşimler ve yakın açık maden işletmelerinde yapılan üretim/dekapaj patlatmalarından kaynaklanabilir. Ayrıca, maden mühendisliği literatüründe hidrolik dolgunun uygulandığı panolarda yapılan patlayıcı madde atımlarından oluşan "sıvılaşma olguları" da rapor edilmiştir (Ulusay, 2000).

3.1.2. Sıvılaşma ile ilgili terimler

3.1.2.1. Ön sıvılaşma

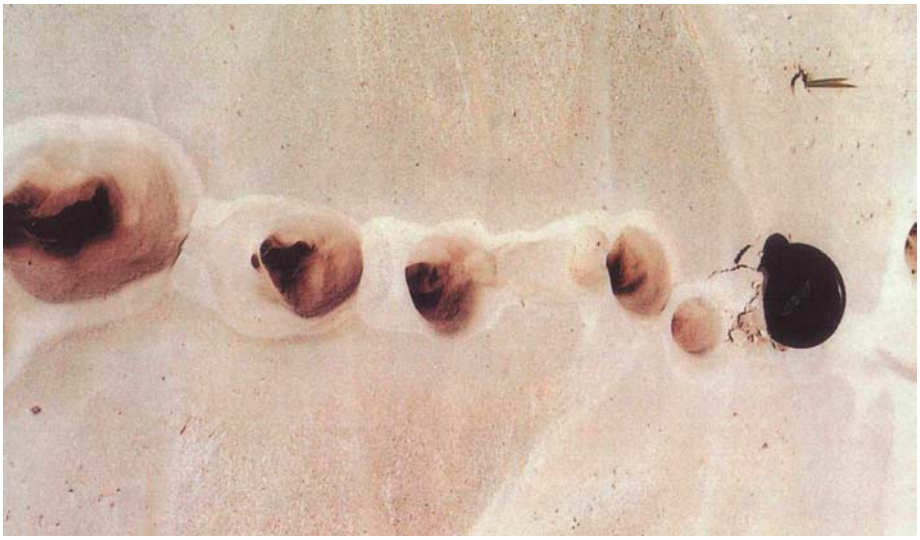
Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının bir yükleme çevirimi sonunda toplam çevre gerilmesine eşit olmasına ön sıvılaşma denir. Ön sıvılaşmanın meydana gelmesi, zemin elemanında oluşabilecek şekil değiştirmelerin boyutları ile ilgili bir bilgi vermez. Böyle bir tanım yapmaktaki amaç zemin elemanının tekrarlı yükler altında davranışlarının adlandırılması ve ön sıvılaşmadan sonraki davranışının değerlendirilmesine açıklık getirilmesidir (Seed ve ark.,1976).

3.1.2.2. Sınırlı sıvılaşma-çevrimsel hareketlilik

Tekrarlı yükler altında bir yükleme çevrimi sonunda ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu izleyen yükleme çevrimlerinde zemin elemanında artık dayanım bulunmasından veya hacim kabarmasından dolayı boşluk suyu basıncının düşmesi ile şekil değiştirmelerin sınırlı kalması ve zemin elemanının tekrarlı yükler altında duraylı bir konuma gelmesine sınırlı sıvılaşma veya çevrimsel hareketlilik denir (Seed ve ark., 1976).

3.1.2.3. Kum kaynaması

Bir zemin kütlesindeki aşırı boşluk suyu basıncından dolayı kum ve suyun borulanarak dışarı çıkmasıdır (Wang ve Law, 1994). Şekil 3.4.' de kum krater dizisi görülmektedir.



Şekil 3.4. 1998 Ceyhan-Misis Depremi sıvılaşma (kum krater dizisi)
(Demirtaş ve Erkmen, 2001)

3.1.2.4. Mikroskobik sıvılaşma

Sıvılaşmanın olduğu kısımdaki zeminin dinamik dayanımı ile aynı noktada tahmin edilen dinamik gerilme değerlerinin kıyaslanmasıyla sıvılaşma tanımına uyduğu anlaşılan durumdur (Wang ve Law,1994).

Zeminin dayanımı, sismik gerilme ve bölgesel jeoloji ve topografyanın etkilenmesi dikkate alınarak önemli bir zemin kısmı için sıvılaşma oluştuğu anlaşılan durum ise Makroskobik Sıvılaşma olarak isimlendirilir. Bu tür sıvılaşma genellikle yüzeyde meydana gelen kum kaynamaları sonucu anlaşılır. Bu bölgelerde boşluk suyu basıncı kum parçacıklarının yüzeye ittirecek seviyededir. Sıvılaşmayı değerlendirecek ampirik formülasyonlar, makroskobik sıvılaşmanın olduğu bölgelerden alınan kayıtlar yardımıyla oluşturulduğu için bu durum önemlidir (Wang ve Law, 1994).

3.1.2.5. Dengeli durum

Sabit bir kayma gerilmesi ve çevre gerilmesi altında kumun hacminin sabit kalarak sürekli olarak deforme olduğu durumdur (Castro, 1975). Bu durumdaki kumun kayma gerilmesine, dengeli durum mukavemeti veya kalıcı mukavemet denir.

3.1.3. Zemin yapısının belirlenmesi için zemin sınıflandırılması

Zeminlerde sıvılaşmanın oluşumuna temel etkenler;

(a) Zeminin sıkılığı

(b) Zeminin kohezyonu

(c) Taneler arasındaki çimentolanmanın miktarı,

(d) Drenaj koşullarıdır.

Zeminin sıvılaşmasına etken olan yukarıda sıralanan koşulların iyi kavranabilmesi için zemin sınıflandırılmasının yapılması önemli bir rol oynamaktadır (Şekercioğlu, 2002).

3.1.3.1. Zemin sınıflandırılması

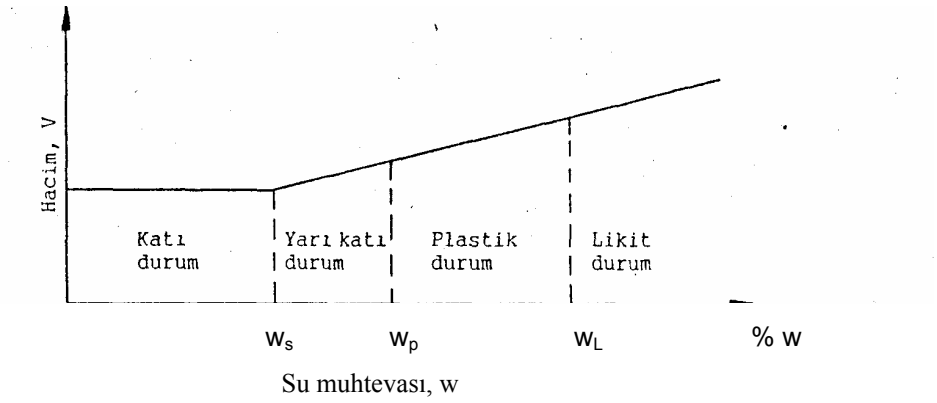
Zemin sınıflandırmanın amacı, zeminleri yapısal özelliklerine göre gruplandırmaktır. Belli sınıf zeminlerin belli özellikleri vardır. Zemin hem temel altında taşıyıcı ortamdır, hem de malzeme olarak kullanılır. Sınıflandırma sistemlerinin hepsinde, zemindeki tanelerin büyüklüğü ile bunların kuru ağırlık olarak, zemindeki yüzdelerinin bilinmesi gerekir. Bu bilgilerin elde edilmesi için tane büyüklüğü analizi veya mekanik analiz yapılır. Mekanik analiz; elek analizi ve ıslak analiz olmak üzere iki evrede yapılır. Genel olarak bir zemin hem iri hem de ince taneleri içerir. Elek analizi zeminin iri taneli kısmına yönelik iken, ıslak analiz, ince taneli kısma yöneliktir. Bu bakımdan, zemin için, her iki analiz de gerekli olabilir ve bunlar birbirini tamamlar. Tane büyüklüğü (çapı) dağılım eğrisi (granülometri eğrisi) yatay eksende tane çapı (mm) ve düşey eksende geçen yüzdeleri olmak üzere çizilen bir eğridir. Yatay eksen logaritmik olup; tane çapı, genellikle soldan sağa doğru büyür. Elekgöz çapı (tane çapı, D) ve geçen yüzde (% P) değerleri kullanılarak noktalar işaretlenir ve bu noktalar birleştirilerek tane büyüklüğü (çapı) dağılım eğrisi elde edilir.

D_{10}: Tane büyüklüğü dağılım eğrisinde, %10 geçen yüzdeye karşılık gelen çapa (mm), efektif çap. C_U: Üniformluluk sayısı. $C_{10}= D_{60} / D_{10.}$ D_{60}: % 60 geçen yüzdesine karşılık gelen çap (mm). C_c veya C_r: Eğirlik katsayısı (Derecelenme sayısı). C_c veya $C_r = D^2_{30} / D_{10} * D_{60}$. D_{30}: % 30 geçen yüzdeye karşılık gelen çap (mm).

İyi derecelenmiş zemin, tüm tane boyutlarından (iri, orta, ince) dengeli olarak içerir. İyi derecelenmemiş zemine, kötü derecelenmiş zemin denilir. Hemen hemen eşit çaplı tanelerden oluşan kötü derecelenmiş zemine üniform zemin, büyük ve küçük tanelerden içeren, ancak orta büyüklükteki taneleri eksik kötü derecelenmiş zemine aralıklı derecelenmiş zemin adları verilir. Üniform zeminde $C_{U,}$ 1 e yakındır. İyi derecelenmiş bir zeminde, C_c, 1ile 3 arasında olmak üzere,C_U çakıllarda 4'ten, kumlarda ise 6' dan büyüktür (Şekercioğlu, 2002).

3.1.3.2. Kıvam (Atterberg) limitleri

Kıvam limitleri ile kohezyonlu zeminlerde, zeminin sertlik- yumuşaklık durumu belirtilir. Zeminin su muhtevasına bağlı olan bu durumlar; kabaca, yumuşak, orta sert, sert gibi adlar alırlar. Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi, ince taneli kuru bir zemine, gittikçe artan miktarda su katıldığında, zeminin hacmi artar, sırayla katı durum, yarı katı durum, plastik durum, likit (sıvı) durum halleri görülür. Likit durumda, zemin bir sıvı gibi akabilir. Bu durumları ve bunları ayıran sınır su muhtevalarına, Atterberg limitleri veya kıvam limitleri denilir(Şekercioğlu, 2002).



Şekil 3.5. Kohezyonlu zeminlerde V-w ilişkisi ve kıvam limitleri (Uzuner, 1998)

3.1.3.3. Birleştirilmiş zemim sınıflandırma sistemi (USCS)

Bu sistemde, bazı semboller kullanılmaktadır. G: çakıl, S: kum, M: silt, C: kil, P_t: çok organik, O: organik, L: düşük plastisiteli, H: yüksek plastisiteli, W: iyi derecelenmiş, P: kötü derecelenmiş. Zeminin granülometri eğrisi çizildikten sonra; 200 No. Ve 4 No' lu eleklere ait geçen yüzdeleri, C_U, C_C, W_L, I_P bilgileri kullanılarak, zemin sınıflandırılır. Zeminin ince taneli kısmı veya ince taneli zeminler, plastisite grafiği kullanılarak sınıflandırılır. Plastisite grafiğinde, yatayda likit limit (W_L), düşeyde plastisite indisi (I_P) yer alır. A doğrusu, grafik alanını ikiye böler. Üst kısım kil, alt kısım silt bölgesidir. W_l = %50 sabit düşey doğrusu grafik alanını ikiye böler. Sol kısım düşük plastisite, sağ kısım yüksek plastisiteli bölgedir.

Plastisite grafiğinde, A doğrusunun altında kalan iki bölgenin her birinde iki olasılık vardır. (ML veya OL ile MH veya OH) (Şekercioğlu, 2002).

3.1.4. Sıvılaşma potansiyelini etkileyen faktörler

Sıvılaşmayı etkileyen faktörler; Deprem hareketi özellikleri, sıvılaşmaya karşı örtü zeminlerinin (kapak zemini) sıvılaşma üzerindeki etkisi, sıvılaşma ortamları, sıvılaşabilir zeminin derinliği, yeraltı suyu seviyesinin derinliği şeklinde sıralayabiliriz.

3.1.4.1. Deprem hareketi özellikleri

Deprem hareketinin özelliklerinin kavranabilmesi için deprem parametrelerinin incelenmesi gerekir. Herhangi bir deprem oluştuğunda, bu depremin tariflenmesi ve anlaşılabilmesi, için "Deprem Parametreleri " olarak tanımlanan bazı kavramların kısaca bilinmesinde yarar vardır. Aşağıda kısaca bu parametrelerin açıklaması yapılacaktır (Celep ve Kumbasar, 2000).

3.1.4.1.1. Odak noktası (Hiposantr)

Odak noktası yerin içinde depremin enerjisinin ortaya çıktığı noktadır. Bu noktaya odak noktası veya iç merkez de denir. Gerçekte, enerjinin ortaya çıktığı bir nokta olmayıp bir alandır, fakat pratik uygulamalarda nokta olarak kabul edilmektedir (Celep ve Kumbasar, 2000).

3.1.4.1.2. Dış merkez (Episantr)

Odak noktasına en yakın olan yer üzerindeki noktadır. Burası aynı zamanda depremin en çok hasar yaptığı veya en kuvvetli olarak hissedildiği noktadır. Aslında bu, bir noktadan çok bir alandır. Depremin dış merkez alanı depremin şiddetine bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde olabilir. Bazen büyük bir depremin odak noktasının boyutları yüzlerce kilometreyle de belirlenebilir. Bu nedenle Episantr Bölgesi" ya da "Episantr Alanı" olarak tanımlama yapılması gerçeğe daha yakın bir tanımlama olacaktır (Celep ve Kumbasar, 2000).

3.1.4.1.3. Odak derinliği

Deprem oluşum noktasında açığa çıkan enerjinin, yeryüzüne olan en kısa mesafesi, odak derinliği olarak tanımlanmaktadır. Depremler odak derinliğine göre sınıflandırılmaktadır (Celep ve Kumbasar, 2000).

Derinlik (km)	Açıklama
0 - 60	Sığ deprem
70 - 300	Orta derinlikteki deprem
>300	Derin deprem

Türkiye'deki depremler, genelde sığ depremlerdir.

3.1.4.1.4. Şiddet

Depremin, yeryüzünde hissedildiği noktadaki etkisinin ölçüsüdür. Depremin, insanlarca hissedilmesine, çeşitli tip yapılarda ve arazideki etkilerine göre şiddet belirlenir. Şiddet, alana bağlı bir değerdir. Depremin, hasar yaptığı ve hissedildiği, yani belirtilerinin olduğu her nokta için, bir şiddet değeri verilir (Bayülke, 1989).

Şiddet cetvelinde, I' den XII' ye kadar değerler vardır. Şiddet cetveli, I-V dereceleri arasında, insanlarca duyulma ve eşyalar üzerindeki etki aşamalarına göre

sınıflandırılmıştır. V şiddetinden sonra, yapılarda hasar başladığı kabul edilmiştir. Deprem şiddetinin en büyük olduğu nokta, maksimum şiddet bölgesi (l_o) olarak nitelenir.

Bir depremin, maksimum şiddet ile Richter ölçeğine göre magnitüdü arasında Türkiye için geçerli olan;

$$I_o=169 \times M - 2.75 \qquad (3.1)$$

I_o : Maksimum şiddet bölgesi.

M: Bir depremin, maksimum şiddet ile Richter ölçeğine göre magnitüdü.

Eşitliği ve buna benzer eşitlikler mevcuttur. Bu eşitlik ile şiddet ve Richter ölçeğine göre magnitüd aşağıdaki gibi olmaktadır (Bayülke, 1989).

Şiddet (l_o)	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Richter magnitüdü (M)	4.0	4.6	5.2	5.8	6.4	7.0	7.7	8.1	8.7

3.1.4.1.5. Deprem büyüklüğü (Magnitüd)

Deprem sırasında, açığa çıkan enerjinin ölçüsüdür. 1930 yılında Richter tarafından geliştirilmiştir. Richter, episantırdan 100 km mesafede ve sert zemine yerleştirilmiş özel bir sismografla kaydedilmiş zemin hareketinin, mikron cinsinden ölçülen maksimum genliğinin 10 tabanına göre logaritmasını, bir depremin "magnitüdü" olarak tanımlamıştır (Taban ve Gencoğlu, 1975).

$$M_1 = \log_{10} A \qquad (3.2)$$

Burada;

M_1: Yüzey dalgası büyüklüğü

A : Depremin merkezinden 100 km uzakta olan bir sismograftaki kayıttan ölçülen maksimum genlik (Bayülke, 1989).

Bugüne dek olan depremler istatistik olarak incelendiğinde kaydedilen en büyük magnitüd değerinin 8.9 olduğu görülmektedir (31 Ocak 1906 Colombiya – Ekvator ve 2 Mart 1933 Sanriku Japonya depremleri).

3.1.4.2. Sıvılaşmaya karşı dirençli örtü zeminlerinin sıvılaşma üzerindeki etkisi

Zemin profili boyunca belirli derinliklerde sıvılaşmanın gerçekleştiğinin anlaşılabilmesi için, örneğin kum kaynaması vb. gibi sıvılaşma izlerinin yüzeyde gözlenmesi gerektiği düşünülmektedir. Ancak, sıvılaşmaya yatkın bir zemin seviyesinin üzerinde sıvılaşmaya karşı dirençli örtü zeminlerinin bulunması, sıvılaşmanın yüzeyde neden olabileceği etkileri engelleyebilmektedir. Dolayısıyla, sıvılaşmaya karşı dirençli örtü zeminleri, sıvılaşma sırasında yüzeye doğru oluşan basıncı karşılayabilecek kadar yeterli bir kalınlığa sahipse ve sıvılaşan zeminin kalınlığı da bu zeminlere göre ince ise, bu durumda sıvılaşma izlerinin yüzeyde gözlenmesi mümkün olmayabilir. Örtü zemininin çok kalın olması durumunda, sıvılaşma olayı gerçekleşse dahi, sıvılaşma yüzeyde kum kaynamaları veya kum konileri şeklinde gözlenemez ve/veya yüzeyde zemin hasarı beklenmez (Ishihara, 1985).

3.1.4.3. Sıvılaşma ortamları

Zemin sıvılaşmasında ortaya çıkan büyük yer değiştirme ve şekil değiştirmeler, ayrıca sıvılaşan tabaka kalınlığına, yüzey eğimine ve yükleme durumuna bağlıdır. Genellikle, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yerlerdeki yakın zamana ait olan sıkışmamış kum ve siltlerin sıkışma potansiyeli yüksektir. Bunun yanında akarsuların yığdığı kumlar, boyutlarındaki düzgünlük nedeniyle sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Yeraltı su seviyesinin yüzeye 10 m' den daha yakın olması da sıvılaşma tehlikesini arttırır. Buna karşılık yeraltı su seviyesinin 20m'den daha derinde bulunması durumunda ve sıkı zeminlerde sıvılaşma

potansiyeli azalır. Sıvılaşma, deniz kenarlarında özellikle körfez çamurları ile kıyı düzlüklerinde, akarsuların özellikle menderesli akarsuların taşkın ovası düzlüklerinde ve göl kıyılarında depolanmış alüvyon zeminlerde, gevşek dolgularda ve maden atık barajlarında biriktirilen ince taneli malzemelerde yaygın olarak görülür (Ulusay, 2001).

3.1.4.4. Sıvılaşabilir zeminin derinliği

Efektif düşey gerilme sıvılaşma oluşumunu kontrol ettiği için yüksek basınç altında veya küçük kayma gerilmesi düşey efektif gerilme oranı dolayısıyla sıvılaşma olmayacak bir maksimum derinlik vardır. Sıvılaşma daykının gözlendiği birçok bölgede yerin 15 m altından daha derinde sıvılaşma olmadığı anlaşılmıştır (Wang ve Law, 1994).

3.1.4.5. Yeraltı suyu seviyesinin derinliği

Sıvılaşma olayının gözlendiği çoğu bölgelerde yeraltı suyu seviyesi 3 m' den daha derin değildir. Sadece birkaç olayda yeraltı suyu seviyesi 3-4 m arasındadır. Yeraltı suyu 5 m ' nin altında olduğu kesimlerde sıvılaşma olayı gözlemlenmemiştir (Wang ve Law,1994). Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi Adapazarı'nda yeraltı su seviyesinin yüksek olması ve zeminin siltli kil olması zemin sıvılaşmasının ortaya çıkmasında önemli rol oynamıştır.



Şekil 3.6. 17 Ağustos 1999 Adapazarı depreminde Adapazarı kent merkezinde sıvılaşma sonucu zemine gömülmüş bina (Demirtaş ve Erkmen, 2001)

3.2. İrdeleme Yöntemleri

3.2.1. Zemin özellikleri

3.2.1.1. Relatif sıkılık (D_r)

Kohezyonsuz zeminlerin, statik yükleme durumunda olduğu gibi, tekrarlı yükler altında da davranışlarını belirleyen en önemli ekenlerden biri zeminin sıkılık oranıdır. Relatif sıkılık, D_r, daneli zeminlerdeki oturma ve sıvılaşma riskinin belirlenmesindeki temel parametrelerden biridir.

Ayrık daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin saptanması için relatif sıkılık oranı. Dr, önemli bir veri olarak ele alınmaktadır. Sıkılık değerinin artmasıyla ön sıvılaşmaya ulaşmak için gerekli devir sayısının veya uygulanan kayma gerilmesinin artması gerekmektedir Sıkı zeminler gevşeyerek, gevşek zeminler de sıkışarak kırılır (Seed, 1976).

Başlangıç relatif sıkılık değeri arttıkça titreşim sırasında oturma ve boşluk suyu basıncının azaldığı bilinmektedir. Yer ivmesi ve relatif sıkılığa bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli durumu Çizelge 3.1.'de verilmiştir (Dowrick, 1975).

Çizelge 3.1. Relatif sıkılığa (Dr) bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli

Maksimum Yer ivmesi	Sıvılaşma Potansiyeli Yüksek	Sıvılaşma zemin tipine ve deprem magnitüdüne bağlıdır	Sıvılaşma Potansiyeli Düşük
0.10 g	D_r <%33	%33< D_r <%54	Dr > %54
0.15 g	D_r <%48	%48< Dr <%73	Dr > %73
0.20 g	D_r < %60	%60< Dr <%85	Dr > %85
0.25 g	Dr < %70	%70< Dr <%92	Dr > %92

Gevşek kumlar titreşimle sıkışır. Depremler sırasında bu sıkışma yapılara zarar veren oturmalara yol açar. Dolayısıyla kumlu bir zeminde sıkılaşmaya karşı hassaslığı derecesi değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmeyi tam bir doğrulukla yapmak mümkün olmasa da relatif sıkılığı %60'ın altında olan veya SPT değeri 15' den küçük olan kumlarda oturma riski yüksektir. 1964 Alaska Depreminde, bir kuyu çevresinde1.35 m 'lik oturma meydana gelmiştir (Tezcan ve Teri, 1996).

Relatif sıkılığın etkisini incelemek için Seed ve arkadaşları tarafından basit kesme deney sisteminde aynı konsolidasyon basıncında farklı relatif sıkılıklarda hazırlanmış deneysel numuneler kullanılmıştır.

3.2.1.2. İnce dane oranı ve plastisite

Yapılan ilk sıvılaşma çalışmalarında ince dane oranının etkileri araştırılmamasına rağmen, son yıllardaki birçok depremde suya duygun ince dane içeren kumlu zeminlerde de sıvılaşma olayı gözlenmiştir. Böylece ince danelerin sıvılaşmaya etkileri araştırılmaya başlanmıştır.

Sıvılaşma üzerinde dane çapı dağılımının etkisini belirtmek amacıyla geçmişte oluşan depremlerde, sıvılaşan zeminler incelenmiştir. Böylece ince dane içeren

kumların sıvılaşma olasılıkları ince dane içermeyen kumlara oranla daha fazladır (Ishihara, 1985).

Ishihara (1985) tarafından tekrarlı üç eksenli deney sisteminde plastik olmayan ve düşük plastisiteli silt içeren sıkı şartlar altındaki kumların dinamik davranışları incelenmiş, aynı gerilme seviyelerinde ve aynı çevrim sayılarında hem plastik olmayan hem de düşük plastisiteli silt oranlarının artmasıyla, boşluk suyu basınçlarında ve birim şekil değiştirmelerde büyük artışlar oluştuğunu belirlemişlerdir.

Prakash (1981) ise çalışmalarında aşağıdaki sonuçları elde etmiştir:

1. Düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma direnci, artan plastisite ile azalır,
2. Kil boyutlu dane yüzdesinin artması, tekrarlı gerilme oranını düşürmektedir,
3. Kil yüzdesi ne kadar fazla ise, %10'a kadar, tekrarlı gerilme oranı da o kadar düşüktür,
4. Düşük plastisiteli siltlerin eksenel deformasyonu, kil yüzdesinin artması ile artar. %5 kil için, ilk sıvılaşma durumuna, %5 göçme sınırından sonra erişilir.

3.2.1.3. Sismik geçmişin etkisi

Bir kum elemanının sıvışabilirliğinin, o kum elemanın daha önce tekrarlı yükler etkisi altında kalmış olmasından etkilendiği birçok araştırmacı tarafından gözlenmiştir. Bu etkinin ne yönde olacağını ve önemini daha iyi kavramak için aynı şekilde ve aynı sıkılıkta hazırlanmış numunelerden bir kısmı çok ufak titreşimlere tabi tutulmuştur. Bütün numuneler üzerinde yapılan gerekli gerilme oranlarının, hiç titreşim altında kalmamış numunelere göre % 50'den daha büyük olduğu gözlenmiştir. Daneli bir yapıya sahip olan kumlarda, küçük titreşimler danelerin ve dane yüzeylerindeki pürüzlülüklerin birbirine göre daha iyi yerleşmesine ve bundan

dolayı kayma mukavemetini belirleyen iki bileşenden biri olan danelerin kilitlenmesinin artmasına neden olduğundan sıvılaşmaya karşı dirençte bir artış görülür.

Sıvılaşmaya karşı en büyük direnci gösteren numuneler, yüksek frekanslı titreşim uygulanmış numunelerdir. En zayıf numunelerse havada ve suda yağmurlama ile hazırlanmış olanlardır. Burada sıvılaşmadan sonra numunenin suda yağmurlama yolu ile hazırlanmış numunelere benzer bir yol izlediği düşünülebilir. Benzer şekilde uzun süre jeolojik yük altında zemin tabakalarında, daneler arasında meydana gelen kaynama ve çimentolaşma sıvılaşma potansiyelini düşürebilir. Seed, 1978 yılında yapmış olduğu deneylerde böyle bir durumda sıvılaşmaya karşı dayanımın %75 oranında arttığını göstermiştir.

3.2.1.4. Yatay toprak basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı

Sıvılaşmaya etki eden faktörlerden bir diğeri yatay toprak basıncıdır. Ishihara (1980), tarafından aynı tip kum numuneleri kullanarak burulmalı kesme deneylerinde aşırı yüklenmişliğin etkisi incelenmiş ve deney sonuçlarına göre, aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığı belirlenmiştir. Suya doygun kohezyonsuz zeminlerde yapılan araştırmalarda uygulanan konsolidasyon basınçları arttıkça, numunelerin dinamik mukavemetleri azalarak sıvılaşabilirliğin artmakta olduğu gözlenmiştir (Castro ve Paulos, 1976).

3.2.1.5. Zeminin gerilme altında kaldığı süre

Yapılan deneyler sonucunda, sıvılaşmaya etki eden faktörlerden birisinin de zeminin jeolojik yükten kaynaklanan gerilme altında kaldığı sürenin olduğu belirlenmiştir. Bu süre tesirinin ölçülebilmesi için benzer şekilde hazırlanmış numuneler 0,01 günden 95 güne kadar değişen zaman dilimleri içinde belirli bir basınç altında bırakılmış ve ön sıvılaşmaya yol açabilecek gerilme oranları

arasında %25'e varan farklar bulunmuştur. Daha uzun zaman dilimlerinin etkisini anlayabilmek için araziden alınan örselenmemiş numunelerin davranışı ile aynı tip kum kullanılarak laboratuarda hazırlanmış numunelerin sıvılaşmaya karşı davranışlarının karşılaştırılması gerekmektedir. Böyle bir durumda ise sıvılaşmaya karşı direnim, %75 oranında artabilmekledir. Buna neden olarak da uzun süre yük altında kalmanın bir sonucu olarak, daneler arasında bir kaynamanın ve çimentolaşmanın oluşması gösterilmektedir (Seed, 1976).

3.2.1.6. Dane şekli, dane boyutu ve boyut dağılımı

Sıvılaşmaya uğrayan zeminin dane şekli konusundaki genel anlayış, daneleri köşeli olan zeminlerin belirli bir konsolidasyon basıncına kadar sıvılaşmaya karşı daha dirençli olacağı yönündedir. Daha büyük basınçlarda ise, köşelerin, kırılıp ince dane oluşturmaları nedeni ile sıvılaşmayı kolaylaştırıcı yönde bir etki yaptıkları gözlenmiştir (Vaid ve ark. 1990).

Ayrıca, 0.005 mm. çapındaki dane oranı % 15'ten büyük, likit limit değeri %35'ten küçük ve su içeriği likit limit değerinin 0.9 katından büyük ise bu tür zeminler için sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu söylenir (Seed ve ark., 1981). Bugüne kadar meydana gelmiş depremlerde, dar derecelenmiş zeminlerin, iyi derecelenmiş zeminlere göre, boşluk oranlarının çok yüksek olması nedeni ile sıvılaşma açısından daha hassas oldukları görülmüştür.

Yapılan araştırmalar, şimdiye kadar meydana gelmiş depremlerde, aşağıdaki zemin cinslerinin sıvılaşma konusunda hassas olduğunu ortaya koymuştur;

• 20 m' den daha az derinliğe kadar uzanan, farklı dane dağılımına sahip kum tabakaları,

• Altında ve üstünde kil veya silt tabakaları bulunan, 3- 10 m. kalınlığındaki kum tabakaları,

• İri daneli kum tabakası üzerinde yer alan ince daneli kum tabakaları sıvılaşma potansiyeli yüksek tabakalardır (Ishihara, 1980).

3.2.1.7. Kumların fiziksel özelliklerinin etkisi

Kumların en önemli fiziksel özellikleri dane boyutu, dane şekli ve derecelenme olarak düşünülebilir. Bulun araştırmalar ve geçmişteki tüm depremler, sıvılaşan zeminlerin dane boyutlarının belirli sınırlar içinde kalmayıp geniş bir aralıkta değişebileceğini göstermektedir. Buna göre düşük relalif sıkılıklarda, kötü derecelenmiş kumlar iyi derecelenmiş kumlara göre daha düşük dinamik mukavemete sahiptir (Wang ve Law,1994).

Yüksek relatif sıkılıklarda ise tam tersi bir davranış görülmüştür. Kumların dane şekilleri de sıvılaşma özelliklerini etkilemektedir. Yuvarlak şekilli daneler, köşeli danelere göre daha çabuk bir araya gelme eğilimi gösterdikleri için sıvılaşmaya daha yatkınlardır. Daneleri köşeli olan zeminlerin belirli bir konsolidasyon basıncına kadar sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğu fakat büyük basınçlarda köşelerin kırılıp ince dane oluşturmaları nedeniyle sıvılaşmayı kolaylaştırıcı yönde etki yaptıkları gözlenmiştir. Wang ve Law (1994) sıvılaşabilir zeminlerin karakteristiklerini şu şekilde özetlemişlerdir:

- Ortalama dane boyutu d_{50} = 0.02-1.00 mm
- İnce dane (d<0.005 mm) içeriği %10'dan az
- Üniformluluk katsayısı (d_{60}/d_{10}) < 10
- Plastisite indisi I_p < 10

3.2.1.8. Kritik boşluk oranı

Farklı kumlu zemin numuneleri üzerinde yapılan drenajlı kesme deneylerinde, kumların sıkılık oranlarına göre, hacimsel değişimlerinin farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Sıkı kumlarda hacimsel olarak bir artış olurken, gevşek kumlarda hacimsel olarak bir azalma meydana gelir. Bu iki durumun arasında, hacimsel bir değişikliğin olmadığı ve kırılmanın gerçekleştiği boşluk oranı, kritik boşluk oranı, e_{cr} olarak tanımlanmaktadır (Casagrande, 1936). Konsolidasyonlu drenajsız kayma durumunda, eğer $e_e < e_{cr}$ ise negatif boşluk suyu basıncı eğer $e_{o.} > e_{cr}$ ise pozitif boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Zeminin boşluk oranı kritik boşluk oranından küçük iken zemin için sıvılaşma potansiyeli düşük olarak kabul edilirken, kayma anında drenajın mümkün olmadığı ve zeminin boşluk oranının kritik boşluk oranından büyük olduğu gevşek kumlar için sıvılaşma potansiyeli büyüktür. Kritik boşluk oranı, Casagrande'nin (1936) önerdiği, aşağıdaki eşitlikten bulunabilir (Seed, 1976).

$$e_{cr} = e_{min} + (e_{max} - e_{min}) * e^{[-0.75\ a/g]} \qquad (3.3)$$

Burada;

e_{min} : Deney sonuçlarından elde edilmiş minimum boşluk oranı, %

e_{max} : Maksimum boşluk oranı, %

a : Maksimum deprem ivmesi, m/sn^2

g : Yerçekimi ivmesi, m/sn^2

Mühendislik uygulamasında, çeşitli gerilmelerde drenajsız yükleme yapılması durumunda ne kadar fazla boşluk suyu basıncı oluşacağını tahmin etmek genellikle gereklidir.

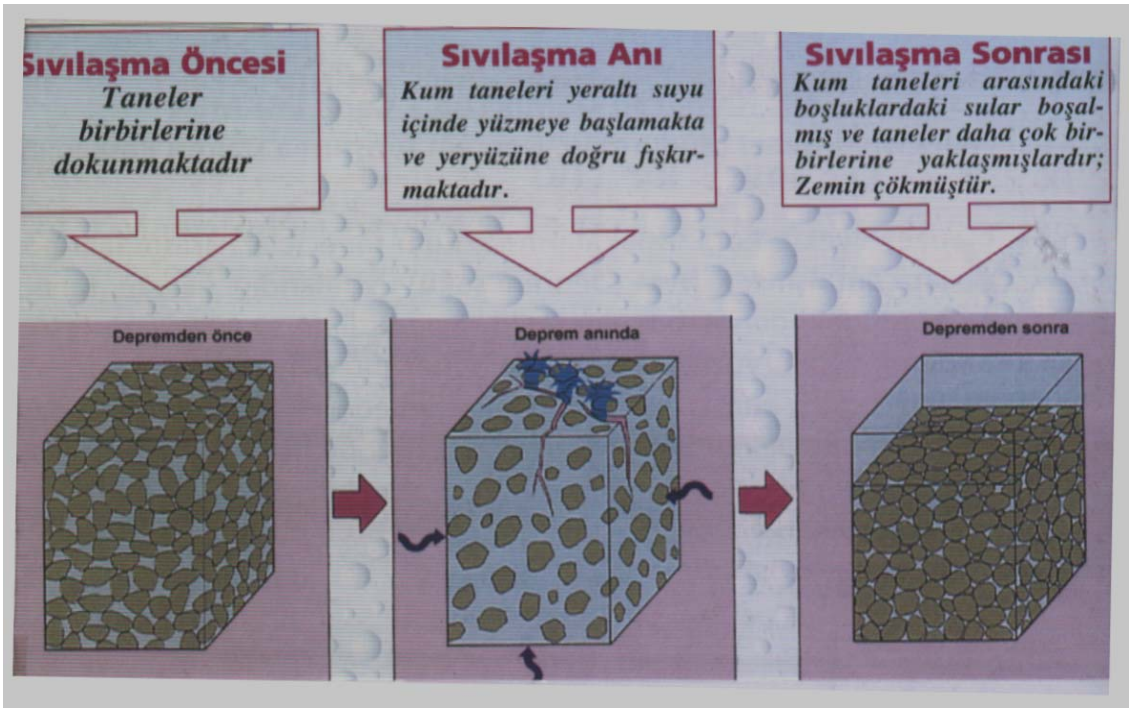
3.2.1.9. Titreşim

Zeminlerde sıvılaşma ve yer değiştirme; dinamik yüklemenin tipi, büyüklüğü ve yapısı ile ilgilidir. Düzenli titreşim altındaki sıvılaşmalar, zemin tabakasında üstten başlayıp aşağıya doğru ilerlerken, bazen titreşim etkisi ile tüm tabaka aynı anda sıvılaşabilmektedir. Kuru kumlarda, genellikle yatay titreşim, düşey titreşimden daha büyük yer değiştirmeler meydana getirmektedir (Vaid ve ark., 1990).

3.2.2. Deprem kaynak büyüklükleriyle zemin sıvılaşması arasındaki ilişkiler

Depremin iç-merkezinde (odak noktası) faylanma sonucu sert kayaçlar kırılarak yırtılmaya başlar ve sismik dalgalar yayılmaya başlar. Sismik dalgalar, yeryüzüne ulaştıkları zaman, gevşek ve suya doygun zeminlerde soğurularak (absorbe olarak) oldukça karmaşık kırılma, yansıma ve karışıma uğrarlar. Sismik dalgaların hareketleri, yeryüzüne yakın tabakaların bileşimi ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir. Genellikle yüzeye yakın tabakalar ne kadar yumuşak ve kalın olursa, sismik hareketler de o kadar büyük ve hareket süresi de o kadar fazla olur (Demirtaş ve Erkmen, 2001).

Bu nedenle bu tür zeminlerde kuvvetli yer-hareketi birkaç kat büyütülür, deprem titreşimleri altında sıkışarak oturur ve hasar oldukça ağır olarak sonuçlanır. Şekil 3.7.' de zemin üzerinde kuvvetli yer hareketi sonucu kum tanelerinin değişen yapısına, deprem etkisinin nedenli büyük olduğu görülmektedir (Demirtaş ve Erkmen, 2001).



Şekil 3.7. Depremin sıvılaşmaya etkisi görülmektedir (Demirtaş ve Erkmen, 2001)

Örneğin; 17 Ağustos 1999 Adapazarı Depreminde, gevşek ve suya doygun oldukça kalın genç çökeller üzerinde bulunan Adapazarı, Düzce, Akyazı ve Gölyaka gibi yerleşim yerlerinde, kuvvetli yer-hareketi 4 kat büyütülmüş ve hasar ağır olmuştur. Adapazarı kent merkezinde bulunan kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonunda en büyük ivme 0.4 g olarak kaydedilmiştir. Buna karşıt, İzmit Körfezi sahilinden uzak yüksek ve sert kayalık zeminler üzerinde bulunan İzmit, Gölcük, Karamürsel, Yalova ile Adapazarı'nın kenar semtlerinde yıkılan bina olmamış ve hasar hafif olmuştur (Demirtaş ve Erkmen, 2001).

Zemin sıvılaşması konusuna pratik mühendislik açısından bakıldığında, aşağıda sıralanan şu konular önem kazanmaktadır:

• Deprem üretebilecek aktif fay ile sıvılaşma potansiyeli taşıyan bölge arasındaki uzaklıkların belirlenmesi

• Sıvılaşmaya yol açabilecek yatay yer ivmesinin kritik değerinin belirlenmesi.

• Deprem kaynak büyüklükleriyle sıvılaşma potansiyeli bulunan kum katmanlarına ilişkin geoteknik parametreler (tekrarlı kayma gerilmesi, standart penetrasyon değeri) arasındaki ilişkilerin ortaya çıkartılması (Arıoğlu ve ark., 2000).

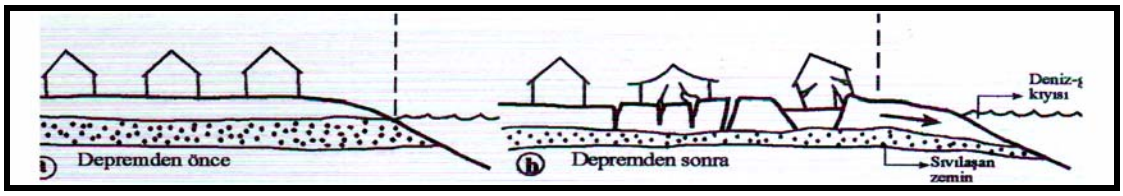
Depremin fiziksel etkileri arasında önemli bir yeri olan zemin sıvılaşması olgusunun boyutları ilkin 1964 Niigata ve 1964 Alaska depremlerinde ciddi bir şekilde algılanmaya başlanmıştır. Genel olarak "zemin sıvılaşması"nın yol açtığı üç tür arazi stabilite sorunu söz konusudur. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır (Arıoğlu ve ark., 2000).

3.2.2.1. Zemin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde kaybı

Sıvılaşan katmanlar üzerinde bulunan binalarda ciddi boyutlarda düşey oturmalar, farklı oturmalar, ötelemeler, devrilmeler belirlenmiştir. Örnek olarak 1964 Niigata depremi ve 1999 Doğu Marmara depreminde Adapazarı'ndaki alüvyal malzemeler içeren katmanlarda gözlenen ciddi bina oturmaları gösterilmektedir (Arıoğlu ve ark., 2000).

3.2.2.2. Yanal yayılmalar

Genellikle % 5 eğimden küçük arazide gözlenen yanal yayılma, sıvılaşmadan kaynaklanan kayma dayanımı kaybının neden olduğu bir yüzey hareketidir. Yüzeyde belirli kalınlıktaki katman "sıvılaşan katman"ın üzerinde hareket eder. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, 1999 Doğu Marmara depreminde Gölcük Körfezi ve Sapanca göl kıyısında yanal yayılma hareketleri yaygın bir şekilde gözlenmiştir.



Şekil 3.8. Sıvılaşmaya bağlı olarak yanal hareket (Maual, 1993)

Yüzeyde gözlenen yanal yayılma sonucunda binalar özellikle rijit binalarda çekme gerilmelerinden kaynaklanan ciddi çatlaklar-farklı oturmalar oluşur. Örneğin, 1999 Doğu Marmara depreminde Gölcük- Çınarcık kıyı şeridi içinde özellikle Kavaklı sahilinde körfeze doğru kayan alanlarda zemin sıvılaşmasından kaynaklanan önemli yanal hareketler oluşmuştur (Arıoğlu ve ark., 2000).

3.2.2.3. Akma hareketi

Akma hareketi prensip olarak yanal hareketin daha geniş bir bölgeye yayılmış biçimi olup, genellikle % 5 eğimden daha büyük arazide oluşur. Binalarda yanal yer değiştirmeler, farklı oturmalardan dolayı ciddi yapısal hasarlar söz konusudur. Binaların maruz kalacağı "farklı oturma" değerleri "yapısal hasarların düzeyini belirler. Gerek yanal yayılmada gerekse akma hareketinde gözlenen maksimum çökme değerleri binalarda izin verilebilir çökme değerlerinden (50-60 mm) daha büyüktür (Arıoğlu ve ark., 2000). Depremin tetiklediği sıvılaşma sonrasında zeminde meydana gelen akma hareketi sonucu Şekil 3.9.'da devrilmiş bir bina görülmektedir.



Şekil 3.9. 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi depreminde sıvılaşma sonucu devrilmiş bina (Demirtaş ve Erkmen, 2001)

3.2.3. Sıvılaşma potansiyeli tahmininde kullanılan fiziki kriterler

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirleyen etkenler, diğer bir ifadeyle sıvılaşma için gerekli kriterler aşağıda sıralanmıştır.

a)Jeolojik kriterler,
b)Zemin bileşimi ile ilgili kriterler,
c)Gerilim şartları ve zemin yoğunluğu ile ilgili kriterler,
d)Geliştirilmiş Çin kriterleri.

3.2.3.1. Jeolojik kriterler

Sıvılaşmaya karşı en duyarlı çökeller; Halosenler (1000 yıldan daha genç) delta akarsu taşkın havzası taraça, kıyı ve çöl ortamlardaki çökelme süreçleri sonucunda birikmiş çökellerdir. Çünkü bu ortamlarda egemen olan çökelme süreçleri tanelerin üniform şekilde
(hemen, hemen aynı tane boyundan oluşan tanelerin bir araya gelmesi) ve gevşek halde depolanmasına olanak sağlamaktadır.

Ülkemizdeki depremler sırasında gözlenen sıvılaşmaların halosen, yaşlı çok genç alüvyal çökellerin bulunduğu alanlarda gözlemlenmesi bu olguyu desteklemektedir. Ayrıca yol ve baraj çalışmalarında inşaa edilen ince taneli ve iyi sıkıştırılmamış dolgular ve suyla birlikte atık barajlarına akıtılıp biriktirilen çok ince maden atıkları da sıvılaşmaya karşı duyarlı olan malzemelerdir. Sıvılaşma yeraltı suyu tablasının yüzeyden itibaren en fazla 10 m derinlikte bulunduğu ortamlarda yaygın şekilde meydana gelmektedir. Ender olmakla birlikte yer altı suyu tablasının 20 m' den daha derin olduğu yerlerde de sınırlı miktarda sıvılaşmanın meydana geldiği bilinmektedir (Pınar, 1952; Özaydın, 1982).

3.2.3.2. Zemin bileşimi ile ilgili kriterler

Zeminlerin tane boyu dağılımı açısından sıvılaşma potansiyeline sahip olup olmadıkları zemini oluşturan tanelerin boyları ve dağılımları elek ve hidrometre analizi gibi laboratuvar teknikleriyle araştırılarak belirlenir, yıllardır sıvılaşma olgusunun bunlarla ilişkili olduğu bilinmekteydi. Bununla birlikte çakıllarda plastik olmayan siltlerde de sıvılaşma davranışına rastlanılmıştır, 0.002 mm' den küçük taneciklerden oluşan ve tane boyu tanımı açısından kil olarak adlandırılan zeminler ise, bir kaç yıl öncesine kadar sıvılaşmaya karşı duyarlı olmayan zeminler olarak bilinmekteydi. Ancak 1995 yılında Japonya'da meydana gelen 7. 2 büyüklüğündeki Kobe depreminde deniz kıyısındaki killerde de yerel olarak sıvılaşmanın gözlemlenmesi, sıvılaşan zemin türüyle ilgili mevcut görüşlere yeni bir boyut getirmiştir. Kilin, depremin neden olduğu sarsıntıyla yumuşayıp, sıvılaşan kumlarla

birlikte yükselerek yüzeye çıktığı şeklindeki görüşün killerde ilk kez rastlanan bu sıvılaşma davranışı için en muhtemel gerekçe olacağı öne sürülmektedir. Zemini oluşturan tanelerin şeklide sıvılaşma duyarlılığı üzerinde etkilidir. Yuvarlak tanelerden oluşan zeminler köşeli taneleri içeren zeminlere oranla daha kolay sıkışma (bir araya gelme) eğilimi gösterdikleri için bu tür zeminlerin sıvılaşma potansiyeli daha yüksektir, iri taneli ve çakıllı zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilirler (Pınar, 1952; Özaydın, 1982).

3.2.3.3. Gerilim şartları ve zemin yoğunluğu ile ilgili kriterler

Yukarıda belirtilen kriterlerin ön gördüğü şartlar sağlansa bile zeminler sıvılaşmaya karşı duyarlı olmayabilir. Çünkü sıvılaşma duyarlılığı aynı zamanda zeminlerin deprem sırasında içinde bulunduğu gerilim şartlarına ve yoğunluğuna (sıkılığına) da bağlıdır. Uzun süreli gerilim şartlarının etkisinde kalmış bir zeminde taneler arasındaki kenetlenme bozulabileceği gibi rölatif yoğunluğu (sıkılığı) "47" nin altında olan zeminler daha gevşek bir konumda bulunacakları için sıvılaşmaya daha yatkındırlar (Pınar, 1952; Özaydın, 1982).

3.2.3.4. Geliştirilmiş Çin kriterleri

Bu kriterlere göre aşağıda belirtilen durumlarda zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilirler ve geliştirilmiş Çin kriterleri;

1. %15'den daha az killi malzeme içeriyorsa , (Killi malzeme Çin kriterlerine göre 0.005 mm den küçük malzeme olarak tanımlanır)

2. likit limit (LL) $\leqslant$ 35%.

3. Su muhtevası likit limitin %90'na eşit yada daha fazla ise.

%10 ' dan az killi (<0.002 mm) malzeme içeren ve 40'nolu elek den geçen malzemenin likit limitinin (LL) % 32 'den az olduğu durumlarda, sıvılaşmanın olası olduğu durumlarda, sıvılaşmanın olası olduğu kil muhtevası %10 'dan fazla

ve % 40 no' lu elek den geçen malzemenin likit limitinin %32 'den fazla olduğu durumlarda, sıvılaşma olasılığının çok düşük olduğu ve bu iki uç arasında kalan malzemelerden numune alınarak sıvılaşabilirliğinin belirlenmesi için test edilmesini önermektedir ve likit limit değerleriyle ilgili kriterler belirtilmesi gerekmektedir (Çetin, 2001). Geliştirilmiş Çin kriterleri bir parça da olsa basitleştirdiği benimsenmiş standart malzeme tanımları kullandığı için yaygın olarak kullanılabilir. İnce taneli (siltli ve killi) zemin parçacıklarının iri taneleri birbirinden ayıracak yada genel zemin davranışını kontrol edebilecek miktarda olduğu durumlarda, bu tür malzemelerin sıvılaşması ince taneli siltli yada killi malzemenin plastik olmadığı yada düşük plastisiteli olduğu (Pl< 10-12%) durumlarda rastlanır.

Aslında düşük plastisiteli silt ve siltli kumlar hem sıvılaşabilir olmaları hem de boşluk suyu basıncının düşmesini engelleyebilecek kadar düşük geçirimlilik göstermeleri sebebiyle en tehlikeli zemin türleridir (Çetin, 2001).

Belirtilen kriterlere ek olarak sıvılaşmanın olabilmesi için;

1. Malzeme doygun (yada doyguna çok yakın olmalı
2. Yük hızlı uygulanmalıdır. (drenajsız olmalı)

Su tablasındaki değişimlerin mevsimsel olduğu ve sulamanın bu koşulları değiştirebileceği ve hızlı yükler için deprem kayma dalgalarının en güzel örnek olduğu unutulmamalıdır (Çetin, 2001).

3.2.4. Sıvılaşma potansiyeli analizinde kullanılan arazi ve laboratuvar deneyleri

Deprem yüklemesinin (yer sarsıntısının) etkisi ile suya doygun gevşek kumlu zeminlerde sıvılaşma olması, zemin tabakalarının mukavemetini kaybetmesine sebep

olmaktadır. Bu olay, zemin yüzeyinde bulunan yapılarda hasar meydana getirmektedir. Zemine oturtulan söz konusu yapıların güvenliğinin sağlanması için, gevşek kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin önceden bilinmesi gerekir. Kumlu zeminlerde, sıvılaşma olayının incelenmesi ve mühendislik uygulamalarında, bir bölgenin sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi isteniyor ise, laboratuar dinamik deney metotları, bu amaç için kullanılabilir. Bu deneylerin dışında, sıvılaşma potansiyeli'nin belirlenmesi için, bazı arazi deneylerinden de yararlanılmaktadır (Seed, 1976).

Sıvılaşma analizinde kullanılan arazı çalışmaları genel olarak:

a) Arazi deneyleri.

b) Jeofizik (sismik) deneyler olarak gruplandırılabilir.

Başlıca arazi deneyleri, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) (Seed, 1976). Konik Penetrasyon Deneyi (CPT). Sismik Koni Penetrasyon Deneyi (SCPT). Yassı Dilatometre Deneyi(DMT)'dir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan ve diğerlerine nazaran tarihçesi oldukça eski olan "SPT" dir (Kayabalı ve ark., 1995; Aydan ve Hasgür, 1997).

3.2.4.1. Arazi deneyleri

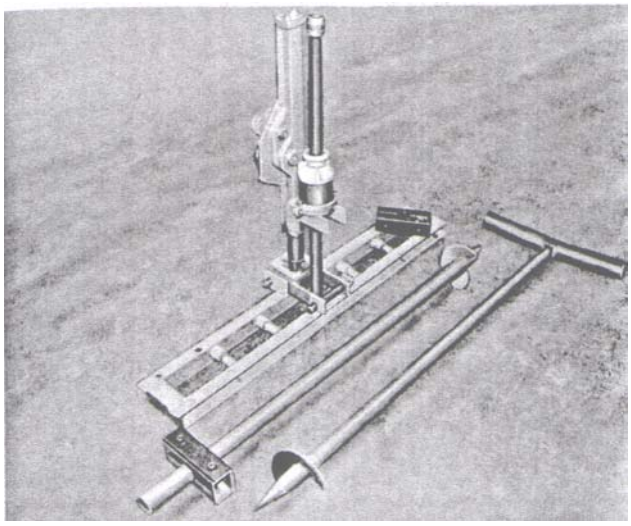
Arazi deneylerinin avantajı zemini tabii durumda test etmemizi sağlamasıdır. Daha büyük bir hacimde deney yapılarak ölçek etkisi dikkate alınabilmektedir. Yüzeyden itibaren istenilen derinliğe ulaşılabilir ve sürekli tanımlama yapılabilir. Fakat arazide sismik aktiviteyi göstermek zor olduğu için sıvılaşma potansiyelini ölçmek için yapılan deneylerde, sıvılaşma dayanımıyla doğrudan ilgili zemin parametrelerine ulaşılamaz. Değerlendirme kriterlerine ulaşmak için sıvılaşma meydana gelmiş geçmiş depremler incelenerek ampirik bağıntılar geliştirilmiştir (Wang ve Law, 1994). Yüzeysel jeoloji ile yerel zemin koşulları arasında tekil bir ilişki olmamasından dolayı, inceleme konusu olan alanlarda beklenebilecek sismik davranışın gerçeğe daha yakın olarak analiz edilebilmesi için geoteknik araştırmalara

ihtiyaç duyulmaktadır. Arazi zemin koşulları hakkında ayrıntılı bilgiler elde etmek amacıyla yapılacak geoteknik araştırmalar, taban kayası derinliğine kadar gerçekleştirilmelidir. Genellikle kayma dalgası hızı 700 m/s' den büyük olan formasyonlar "taban kayası" olarak kabul edilebilmektedir. Zemin profilinin sismik davranış açısından tanımlanabilmesi için kohezyonsuz zeminlerde ve katı zeminlerde Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), yumuşak zeminlerde ise Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) gibi arazi deneyleri çok yararlı bilgiler vermektedir.

SPT deneyi, sınıflandırma için numune alınması ve zeminin sıkılık derecesinin belirlenmesi için bilgiler vermesi yanında, darbe sayısı (N) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasında kurulan korelasyonlar açısından da yararlı olmaktadır. CPT deneyinde de zeminin cinsi ve sıkılık derecesi zemin profili derinliği boyunca sürekli olarak belirlenebilmekte, CPT koni direnci ile SPT darbe sayısı arasındaki korelasyonlardan, kayma dalgası hızına geçilebilmektedir (Özaydın, 1996).

3.2.4.1.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT)

Bu deney, sondaj tijlerine takılmış, ortasından ikiye ayrılabilen ve içinde pirinçten yapılmış bir iç tüpün bulunduğu örnekleyicinin, 63.5 kg ağırlığında bir şahmerdanın 760 mm yükseklikten tijlerin üzerine düşürülerek zemine sokulması ilkesine dayanır. Şekil 3.10.'da koni sıkıştırma ucu görülmektedir. Ortadan ayrılabilen tübün dış çapı 50 mm, iç çapı 35 mm ve uzunluğu 650 mm olup, tijlere monte edilir.



Şekil 3.10. Şahmerdana takılan koni sıkıştırma ucu (Ele, 2006)

Uygulamada, kuyu deneyin yapılacağı seviyeye kadar temizlenir ve deney seviyesinde örselenmiş bir kısmın kalmamasına özen gösterilir. Tüp, kuyu tabanına kadar indirilip zemine 45 cm çakılır. İlk 15 cm' lik darbe sayısı dikkate alınmaz, daha sonraki 30 cm çakma için toplam darbe sayısı (N) deney sonucu olarak kaydedilir. Eğer tüp, 30 cm' lik bir penetrasyona ulaşmadan önce elde edilen darbe sayısı 50 ise daha fazla darbe uygulanmaz. Türkiye'deki uygulamaya göre deney her l.5 m' de bir yapılır. Standart Penetrasyon değerleri, N_{30} tokmağın düşüş enerjisine (ER/60%) ve efektif düşey basınca bağlı bir düzeltme faktörü C_N ile düzeltilmektedir (Ulusay, 2001).

Yeraltı suyu tablası altında yer alan ince kum veya siltli kumlarda, eğer N>15 ise N aşağıdaki eşitlik kullanılarak su düzeltmesi yapılır.

$$N=15+0.5\ (N-15) \qquad (3.4)$$

Bu düzeltmenin amacı, çakma işlemi sırasında kısa sürede uzaklaşması mümkün olmayan suyun, negatif bir boşluk suyu basıncı yaratmasından dolayı zeminin direncine oranla meydana gelen artışın giderilmesidir(Ulusay, 2001).
Darbenin uygulandığı metal bloğun tipi ve sondaj tijlerinin uzunluğu elde edilen N darbe sayısı değerlerinde farklılıklara neden olur. Bunun standart haline

getirilebilmesi amacıyla enerji oranı (ER) kavramı geliştirilmiştir. Enerji oranı dikkate alınarak, N değerleri aşağıdaki ifade kullanılıp normalize edilir ve normalize edilmiş darbe sayıları (N_{60}) hesaplanır.

. $$N_{60}= N^{*} (ER/60) \quad (3.5)$$

Düzeltme katsayısı C_N aşağıdaki ifadede yerine konularak düzeltilmiş darbe sayısı N_1 elde edilir.

$$N_1=C_N{}^{*} N \quad (3.6)$$

Diğer düzeltmelerle birlikte,

$$(N_1)_{60} =C_N{}^{*} N_{60}$$ ifadesi kullanılır. (3.7)

$$(N_1)_{60}= N_{30} \times (ER / 60\%) \times C_N \quad (3.8)$$

Burada C_N değişik yöntemler ile bulunabilmektedir. Bu araştırmada Liao ve Whitman (1986) tarafından verilen düzeltme faktörü kullanılmıştır (Kayabalı ve ark., 1995; Aydan ve Hasgür, 1997).

.

Bu ifade;

$$C_N = 1/ \sqrt{\sigma} \quad (3.9)$$

Olarak verilmektedir. Bu formülde efektif düşey gerilmenin birimi $\sqrt{\sigma}$ kg/cm^2 olmaktadır. Bu yöntemde sıvılaşma sınırları M= 7.5 magnetüdlü deprem için 200 nolu elekten geçen ince taneli zeminin oranına bağlı olarak elde edilmiştir "SPT" nin kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Kayabalı ve ark. 1995; Aydan ve Hasgür, 1997).

1. Yapı zeminlerinin taşıma gücü (zemin emniyet gerilmesi) hesaplarında,
2. Kumlu zeminlerde inşa edilen temellerin oturma miktarlarının belirlenmesinde,
3. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik analizlerde,
4. Zeminin relatif sıkılığının belirlenmesinde,
5. Zeminin içsel sürtünme açısının tahmininde kullanılmaktadır.

Özellikle kohezyonsuz zeminler için darbe sayıları ile relatif sıkılık arasında değişik korelasyonlar verilmektedir. SPT deneyi ancak kohezyonsuz zeminlerde sıkılığı güvenli şekilde verebilir.

Kohezyonsuz zeminlerde darbe sayısı ile relatif sıkılık arasında Çizelge 3.2.' de gösterilen bağıntı vardır.

Çizelge 3.2. SPT - N değerleri ile relatif sıkılık ve nisbi yoğunluk sınıflaması (Köleoğlu, 2002)

N	Relatif Sıkılık	Yerleşim Sıkılığı
<4	< 0.15	Çok gevşek
5-10	0.15-0.30	Gevşek
11-30	0.35-0.65	Orta
31-50	0.65-0.85	Sıkı
>50	>0.85	Çok sıkı

Kohezyonlu zeminlerde ise darbe sayısı ile zeminlerin kıvamları ve serbest basınç dayanımları arasında Çizelge 3.3.' deki bağıntıdan yararlanılabilir.

Çizelge 3.3. SPT - N değerleri ile kıvam ve serbest basınç dayanımları sınıflaması (Köleoğlu, 2002)

N	Kıvam	Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm^2)
0-2	Çok Yumuşak	0-0.25
3-4	Yumuşak	0.25-0.50
5-8	Orta	0.50-1.00
9-13	Katı	1.00-2.00

14-30	Çok katı	2.00-4.00

3.2.4.1.2. Koni penetrasyon deneyi (CPT)

Bu yöntemde sondalama 10 cm kesitli 60° açılı bir konik ucun, 2 cm/sn sabit hızla zemine penetre edilmesi ile yapılmaktadır. Bu deney kum ve siltlerde en iyi sonucu verir. Ancak günümüzde çakıllar ve bloklu zeminler dışında her tür zeminde uygulanmaktadır. Konik sonda hidrolik olarak sürekli itilirken dışarıdan okunan uç direnci q_c ile kumun taşıma gücünü ölçmektedir. Bu deney SPT deneyine göre daha ekonomik ve basit olup zemin tabakası içerisinde derinliğe bağlı olarak uç direnç ve sürtünmelerin ölçmesine rağmen zeminin endeks özellikleri ve tane dağılım hakkında bilgi analizlerinde sınırlı olarak kullanılmış olması olumsuz yanını oluşturmaktadır. SPT-N değerlerinde olduğu gibi koni penetrasyon direnci de zemin yapısı ve sıkılığından, gerilme durumu ve gerilme geçmişinden, çimentolaşmadan etkilenmektedir. Penetrometre ölçümlerinde çok önemli bir gelişme 1980'lerde konik ucun hemen arkasına bir piyezometrenin yerleştirilmesiyle olmuştur. Piyezokoni aletinde (CPTU) zeminin kayma direnci yanında aşırı konsolidasyon oranı ve sıvılaşma potansiyeli ölçülebilmektedir (Önalp, 1997).

Sıvılaşma potansiyelim ölçmek için Çin'de bir koni penetrometre geliştirilmiştir (Wang, 1978; Wang, 1983). Ölçülen penetrasyon dayanımı p_s, aşağıda verilen eşitlikteki kritik değer p_s' ile karşılaştırılır.

$$p_s' = p_{so} [\ 1-0.065\ (d_w-2)\ ] * [\ 1-0.05\ (d_y-3)\ ] \qquad (3.10)$$

Burada,

d_w : Yeraltı su seviyesinin derinliği (m)

d_y : Üstteki sıvılaşmayacak tabakanın kalınlığı (m)

p_{so}: Çizelge 3.4.de d_w = 2m ve d_y =3m için verilen kritik penetrasyon dayanımı (Mpa)

Çizelge 3.4. Tasarım deprem şiddetine göre verilen P_{so} (Wang ve Law, 1994)

I	VII	VIII	IX
p_{so} (Mpa)	5-6	11.5-13	18-20

Eğer ölçülen koni penetrasyon dayanımı p_S, kritik değer p_S' den daha düşükse, sıvılaşma potansiyeli yüksektir denir. Aksi halde sıvılaşma potansiyeli düşüktür (Wang ve Law, 1994).

3.2.4.1.3. Sismik koni penetrasyon deneyi (SCPT)

Temel zeminlerinin yerinde kayma dalgası hızlarının belirlenmesine yönelik olarak kuyu içi ve cross-hole teknikleri yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Kuyu içi tekniklerinde yapay olarak oluşturulan bir kayma dalgasının bilinen mesafeler içinde yol almasının ve bu dalganın kaynak ile bilinen bir noktada yerleştirilen jeofonlar aracılığı ile yol alma süresinin belirlenmesi esas alınmaktadır. Elastik teori kayma dalgası hızı, V_s, zemin yoğunluğu ρ ve kayma modülünün, G, aşağıdaki bağıntı ile ilişkilendirilmesini sağlamaktadır.

$$G = \rho * V_s^{\,2} \qquad (3.11)$$

Böylelikle, kayma modülü yerinde kayma dalgası hızlarının ölçülmesi aracılığı ile ölçülebilmektedir. Yerinde sismik deneylerde elde edilen kayma birim deformasyonunun genelde $\%10^{-4}$ mertebesinde küçük genliklere sahip olması nedeniyle, düşük deformasyon seviyelerinde dinamik kayma modülü, G_{max}'ın bulunmasına olanak tanımaktadır. Bu tür bir deneyin alışılagelmiş sondaj teknikleri

ve kuyu içi yöntemleri ile gerçekleştirilmesi birden fazla sondaj kuyusu gerektirmesi nedeniyle oldukça yüksek maliyetli ve uzun süre gerektirmektedir (Durgunoğlu ve ark., 2000).

Yerinde kayma dalgası hızlarının ölçülmesine olanak tanıyan yeni bir deney yöntemi olarak sismik statik penetrasyon deneyi (SCPT) maliyetleri önemli oranda düşürdüğü gibi zemin profilinin geoteknik ve geodinamik parametrelerinin aynı zamanda ve süratli bir şekilde ölçülmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemde sondalama 10 cm^2 konik uç ve 150 cm^2 çevre alanına sahip 60° açılı elektronik bir konik ucun, 10 ton kapasiteli bir hidrolik baskı yoluyla, 2 cm/sn sabit hızla zemine penetre edilmesi ile yapılmaktadır. Bu penetrasyon sırasında 2 cm ara ile ölçülen uç ve çevre mukavemeti verileri bilgisayarda kaydedilmektedir. Boşluk suyu basınçlarının ölçümünde kullanılan "piezocone" elemanı, uç mukavemetinin kaydedildiği konik ucun hemen arkasında, 7.5 cm^2 kesit elemanlı poroz bir elemana sahiptir. Buna ilaveten, penetrometre konik uçunun hemen arkasında birbirine 1.0m ara mesafe ile yerleştirilmiş olan, yatayda iki yönde (x,y) ve düşeyde bir yönde (z)üçlü bir jeofon sistemine sahip iki sismometre aracılığı ile kayma dalgası hızı, V_s ve basınç dalgası hızı, V_p arzu edilen derinlikte ölçülebilmektedir. Sismik penetrasyon deneyinde (SCPT) uç mukavemeti ve çeper sürtünmesi zemin profilinin zemin tipleri ve kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde hızlı ve güvenilir bir yöntemdir. Kuyu içi sismik deneyleri SCPT deneyinde arzu edilen derinlikte kısa süreli aralar verilerek yapılabilmektedir. SCPT deneyinden elde edilen kayma dalgası hızı verileri maksimum dinamik kayma modülünün hesaplanmasında kullanılmaktadır (Durgunoğlu ve ark., 2000).

3.2.4.1.4. Yassı dilatometre deneyi

Yassı dilatometre merkezi genişleyen bir çelik kesici kaşık uca sahip bir cihazla yapılan bir deneydir. Dilatometre numune alınacak yere getirilir ve cihazın çevresi yüzeye çakılır, numune alınacak yüzeyin çevresi basınçlı su ile temizlenir, 10 cm aralıklarla penetrasyon

gerçekleştirilir ve memberanlar basınçlı hava ile şişirilir. Burada basınca dayalı membran hareket etmeye başlar, oluşan basınç değişmeleri kayıt edilir. Kaydedilen basınçlar düzeltilir ve korale edilir, hidrostatik basınçla kullanılarak zeminin malzemeye dayalı malzeme indeksi, yatay basınç indeksi, dilatometre modülü elde edilir. Bu elde edilen değerlere göre aralarındaki parametrelerle korale edilerek sıvılaşma potansiyeli analizinde kullanılır (Ateş, 2003).

3.2.4.2. Laboratuvar deneyleri

Laboratuarda sıvılaşma olayının incelenmesi ve bir bölgenin sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi amacı ile dinamik üç eksenli deneyi, burulmalı dinamik deney sistemi, sarsma tablası deneyi gibi deneyler yapılabilir. Arazi koşullarına benzeşimin laboratuarda sağlanabilmesi açısından bu deney aletlerinin olumlu ve olumsuz birtakım yönleri vardır. Çoğunlukla laboratuarda üzerinde deney yapılan zemin numunesine, o zemin tabakasını temsil eden sonsuz küçük bir elemanı olarak bakılır. Bu durumda yapılacak deneyler mümkün olduğunca arazi sınır şartlarına ve arazide oluşacağı tahmin edilen yükleme şekline eşdeğer bir biçimde yapılmalıdır. Genellikle, arazide bulunan değerler arazi şartlarını ve doğadaki zemin koşullarını yansıtması bakımından gerçeğe daha yakın olmaktadır. Zeminlerin belirli yüklemeler altında nasıl davranacağı hakkında bilgiler çoğunlukla laboratuar deneylerini gerektirir ve nadiren arazi deneylerinden bulunabilir. Diğer yönden incelenen olayın esaslarını açıklamak açısından arazi deneylerinin faydaları, arazideki etkenlerin çokluğu bakımından sınırlıdır. Sıvılaşma araştırmalarında kullanılan laboratuar deney yöntemlerinin duyarlılığından öte, asıl önemli olan konu, kohezyonsuz zeminlerden örselenmemiş numune almanın zorlukları ve alınan numunelerde meydana gelen örselenmenin sıvılaşmaya etkisidir (Ateş, 2003).

Son yıllarda arazideki, davranış biçimini belirleyebilmek için örselenmemiş kumlu zemin numuneleri üzerinde yapılan araştırmalar büyük bir ağırlık kazanmaya başlamıştır. Laboratuar çalışmalarında önemli olan nokta sıvılaşma olasılığı incelenecek olan zemin tabakalarından örselenmemiş numuneler alınmasını

sağlamak, arazideki gerilme ve sınır şartlarına uygun, eldeki dinamik deney yöntemlerinden yararlanılarak sıvılaşma olasılığını değerlendirmektir. Burada tecrübe ve bilgi gerektiren asıl işlem eldeki deneylerden arazideki şartların tahmin edilmesidir. Bu nedenle laboratuar deneyleri için alınan numunelerle ilgili bazı sınırlamalar yapılmaktadır.

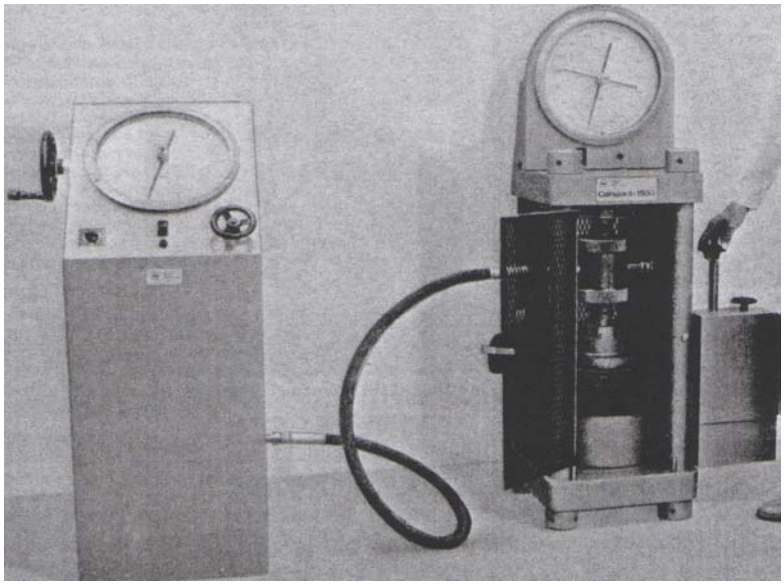
1-Numune alımı sırasında örselenme meydana gelir ve yerindeki gerilim durumu değişir, ayrıca örneklerin laboratuara nakli sırasında örselenme olabilir.

2-Laboratuar örnekleri küçük olup, ölçek etkisi söz konusudur.

3-İlksel gerilim koşulları bozulan örnekler üzerinde laboratuarda arazi koşullarının sağlanması mümkün olmamaktadır (Ulusay, 2001).

3.2.4.2.1. Dinamik üç eksenli deney

Sıvılaşma kavramını çalışmak için Seed, 1966 yılında dinamik üç eksenli testlerin yapılmasını önermiştir. Üç eksenli deney hücresi, bir zemin numunesinde deprem öncesi arazi şartlarında meydana gelen konsolidasyona izin verir. Dinamik kaymayı oluşturmak için tekrarlı deviatorik gerilme uygulanır. Çalışmalar sonucu düşeyle 45°lik açı yapan bir düzlem boyunca gerilme durumunun gerçeğe yakın olduğu görülmüştür (Seed ve ark., 1966). Şekil 3.11.'de dinamik üç eksenli deney aleti görülmektedir.



Şekil 3.11. Dinamik üç eksenli deney aleti (Ele, 2006)

Sıvılaşma, boşluk suyu basıncının çevre basıncına eşit olduğu veya dinamik eksenel uzamanın pik durumda, örneğin %10 gibi belirli bir değeri aştığında oluşur. Uygulanan tekrarlı kayma gerilmeleri sıvılaşma dayanımı τ_l olarak alınır ve sıvılaşmaya yol açan tekrarlı kayma sayısına (N_{eq}) karşılık gelir (Wang ve Law,1994).

Depremin neden olduğu eş tekrarlı kayma gerilmesinin (τ_{eq}), sıvılaşma dayanımını (τ_l) aşması durumu sıvılaşma olarak ifade edilir. Çalışmalar sonucu τ_{eq} aşağıdaki şekilde elde edilmiştir (Seed ve Idriss, 1971).

$$\tau_{eq} = 0.65 * a_{max} / g * \sigma_o * r_d \quad (3.12)$$

Bu denklem, zemin yapısında düşünülen belirli derinlik için hesaplanacak efektif düşey basınca ($\sigma_{ó}$) göre normalize edildiğinde, ortalama tekrarlı kayma gerilmesi ile efektif düşey gerilmenin oranı olarak değerlendirilmiş olacaktır.

$$\tau_{eq} / \sigma_o' = 0.65 * a_{max} / g * \sigma_o/\sigma_o' * r_d \quad (3.13)$$

Burada,

a_{max} : Maksimum ivme

g : Yerçekimi ivmesi

r_d : Zemin tabakası derinliği için azaltma faktörüdür.

Shibata ve Teperaksa (1988) r_d düzeltme faktörünü,

$$r_d = l - 0.015 * z \quad (3.14)$$

olarak ifade etmişlerdir.

Dinamik üç eksenli deney uzun zaman alan pahalı bir deney olması nedeniyle, daha çok araştırma amaçlı kullanılmaktadır. Dinamik üç eksenli deneye paralel olarak dinamik basit kesme deneyi de yapılmaktadır. Bu deney yöntemiyle; Dinamik kayma gerilmesi, toplam düşey gerilme, dinamik kayma uzaması, boşluk suyu basıncı elde edilmektedir. Kıyaslama yapmak gerekirse dinamik basit kayma deneyi, dinamik üç eksenli deneye göre tabii haldeki sıvılaşma olayını daha gerçekçi olarak açıklar. Fakat bu deneyde zemin numunesine uygulanan kayma gerilmesi üniform olarak dağılmamaktadır (Seed ve Idrıss, 1971).

3.2.4.2.2. Burulmalı dinamik deney sistemi

Dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemlerindeki birçok zorluk burulmalı dinamik deney sistemiyle ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Büyük ölçekli deformasyon şartlarında zemin özelliklerini incelerken bu deney sistemi kullanılabilmektedir. Ishihara (1972), geliştirilen deney sisteminde içi dolu zemin numuneleri kullanılmaktaydı. Fakat bu sistemlerde kullanılan içi dolu zemin numunelerinde açısal üniformluk sağlanamadığından, bu etkiyi azaltmak maksadıyla araştırmacılar deneylerde içi boş silindirik numuneler kullanmayı tercih etmişlerdir.

Zeminlerin sıvılaşmaya veya tekrarlı yumuşamaya karşı direnci bazı ampirik formüller kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı F_1, Yasuda ve ark. (1998), tarafından aşağıda verilen ifade ile bulunabilmektedir

$$F_l = \tau_l / \tau_p \quad (3.15)$$

Burada τ_l , 20 tekrarda kumun sıvılaşmasına neden olan gerilme seviyesidir. τ_p ise uygulanan gerilme seviyesidir. F_l değerinin 1 den küçük olması durumunda sıvılaşma ihtimalinden söz etmek mümkündür. Burulmalı dinamik deney sistemiyle zeminlerin deformasyon özelliklerinin temel kavramları araştırılırken drenaj ve gerilmelerin kontrolü ve üniformluğu üst düzeyde olmasına karşın numune hazırlama güçlüğü gibi sebeplerden dolayı bu sistem pratik amaçlar için çok uygun olmamaktadır (Yasuda ve ark., 1998).

3.2.4.2.3. Sarsma tablası deneyi

Sarsma tablası araştırmaları sıvılaşma çalışmalarına, deprem ötesi oturmalara, temel tepkilerine ve yatay toprak basıncı problemlerine önemli kazanımlar getirmiştir. Çoğu sarsma tablası tek yönlü hareket kabiliyetine sahipken son yıllardaki yapılan çalışmalarda çok yönlü hareket kabiliyetine sahip sarsma tablaları gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablaları genel olarak servo hidrolik çalıştırıcılarla gerçekleştirilir.

Bu deney yapılırken dinamik yükleme kapasiteleri hidrolik pompalar yardımıyla kontrol edilir. Sarsma tablasının çeşitli modelleri geoteknik deprem mühendisliği alanında kullanılmaktadır. Sarsma tablaları, zemin prototiplerini daha alt gruplara ayrıştırılarak, daha küçük tane dağılımları oluşturularak gerçekleştirilir. Bu deneyler yapılırken, zemin numuneleri kolayca sarsma tablalarına yerleştirilebilir ve düzenek ayarlanabilir. Bu deney sarsma tablası yardımıyla yatay yönde oluşan basınç dayanımlarını ve deplasmanları bulmak için kullanılır. Sıvılaşma çalışmalarında bu deneyden elde edilen sonuçlardan yararlanılır.

3.2.5. Sıvılaşma potansiyeli ihtimaline karşılık kullanılan yöntemler

3.2.5.1. Sıvılaşma potansiyeli analiz yöntemleri

İnce-orta daneli, siltli kum veya az killi kum tabakalarının sıvılaşma olasılığının saptanabilmesi için arazi ve laboratuar deneylerinin bir arada kullanıldığı çeşitli bağıntılar ve formüller geliştirilmiştir.

3.2.5.1.1. Periyodik kayma gerilmesi kriteri

Bu yöntemde, zemin tabakalarının sıvılaşma emniyet faktörü (Fs),

$$F_s = \tau_s / \tau_o \qquad (3.16)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada,

τ_s : Belli bir zeminde sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi,

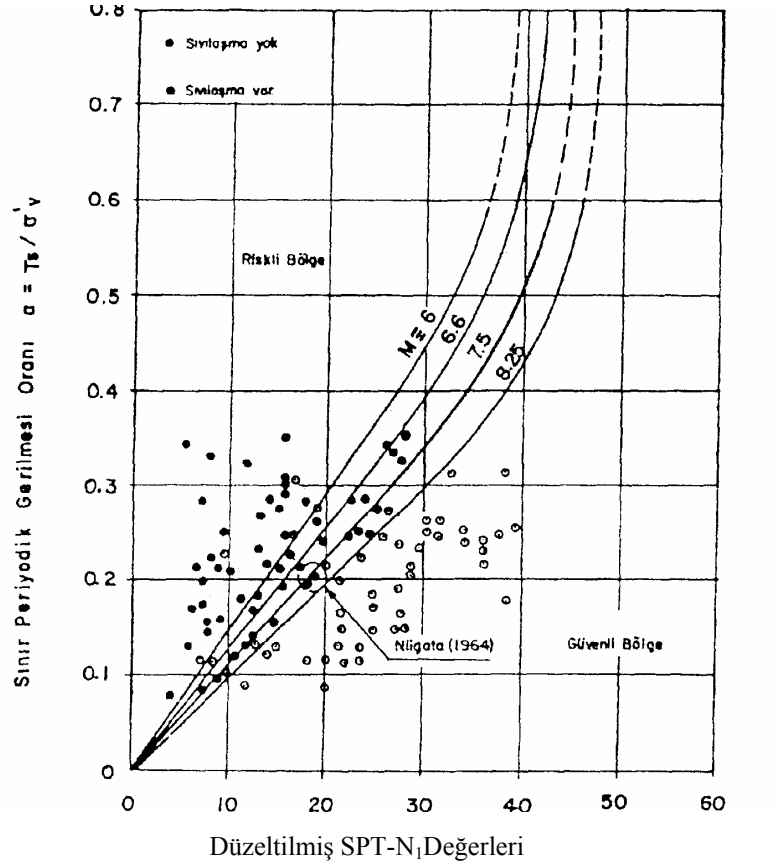
τ_o : Aynı zeminde belli bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir (Seed ve Idriss, 1981).

$F_s \leq 1$ ise sıvılaşma potansiyeli yüksektir

$F_s > 1$ ise sıvılaşma potansiyeli yoktur.

Çeşitli depremlerden elde edilen sıvılaşma anındaki, periyodik yatay kayma gerilmesi τ_s'nin efektif düşey gerilmeye oranı olarak ifade edilen periyodik sıvılaşma

gerilmesi oranı ($\alpha = \tau_s / \sigma_v'$) ile standart penetrasyon değeri arasındaki ilişki grafik olarak Seed ve Idriss (1981) tarafından Şekil 3.12 'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Sınır periyodik gerilme oranı – N_1 değerleri
(Seed ve Idriss, 1981)

1964 yılında meydana gelen Alaska ve Niigata depremlerinden sonra sıvılaşma olayına açıklık getirmek için ciddi araştırmalar yapılmış ve sıvılaşmayı oluşturan faktörler belirlenmeye çalışılmıştır. Deprem sonucu yatay yüzeyde oluşan ortalama kayma gerilmesinin, deprem öncesi düşey efektif gerilmeye oranının kum tabakalardaki sıvılaşmayı ifade edecek uygun bir parametre olduğu görülmüştür. Bu parametrenin avantajı, kum tabakasının kalınlığını, su tablasının derinliğini ve depremin şiddetini göz önünde bulunduruyor olmasından kaynaklanmaktadır.

3.2.5.1.2. Sıvılaşma potansiyeli analizi

Bu metot; zeminin standart penetrasyon direnci ve deprem yükünden dolayı zeminde meydana gelen devirsel gerilme oranının, korelasyonunu kullanmaktadır. Bu korelasyon için esas olan veriler, büyük ölçekli basit kesme kutusu deneylerinden elde edilmektedir (Seed, 1976). Suya doygun kumların arazideki özelliklerini deneyler vasıtası ile öğrenmek mümkündür. Ayrıca, sözü edilen zeminin deprem sarsıntısı sırasında gösterdiği davranışlar, devirsel gerilme oranları vasıtası ile hesap edilebilir.

Bu iki bilinen özelliğin korele edilmesi ile doygun kum tabakasının sıvılaşma dirençleri kolaylıkla bulunabilir. Japon mühendisler tarafından, Niigata depreminde Niigata kumu üzerinde, standart penetrasyon dirençlerine bağlı olarak, kumun sıvılaşabilme yeteneği korale edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar ile suya doygun kumların sıvılaşma potansiyeli için gerekli veriler elde edilmiştir (Seed, 1979).

Seed ve DeAlba (1986)'nın yönteminde, standart penetrasyon darbe sayısı esas alınarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmektedir. Sıvılaşma analizi yapılacak noktada depremin oluşturacağı en büyük yatay yer ivmesi değeri kullanılarak, depremin o noktada neden olacağı tekrarlı (çevrimsel) gerilim oranı aşağıdaki ilişkiden hesaplanır.

$$(CSRE) = 0.65 \ (a_{max} / g)(\sigma_o/\acute{\sigma}_o) \ r_d \qquad (3.17)$$

Burada;

(CSRE): Depremin neden olacağı tekrarlı (çevrimsel) gerilim oranı

a_{max} : En büyük yatay yer ivmesi

σ_o': Efektif düşey örtü gerilimi

σ_o : Toplam örtü gerilimi

z : Derinlik (m)

r_d: Derinliğe bağlı olarak değişen gerilim azaltma faktörü

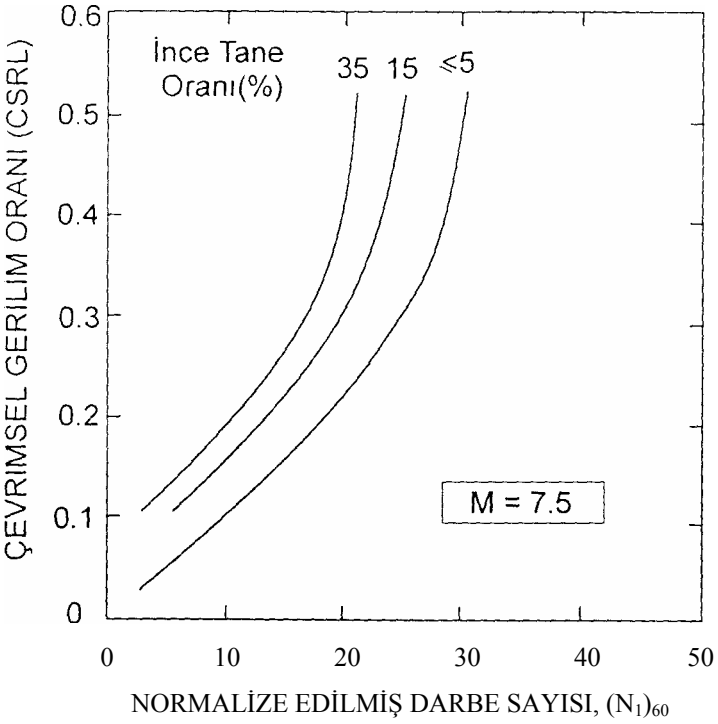
$$(r_d = 1 - 0.015_z) \quad (3.18)$$

Seed ve DeAlba (1986), belirli bir büyüklükteki deprem sırasında zeminin karşılayabileceği tekrarlı gerilim oranının (CSRL) normalize edilmiş SPT-N değeri, $(N_1)_{60}$ ve zeminin içerdiği ince tane yüzdesine göre Şekil 3.13 'de verilen grafikten belirlenmesini önermişlerdir. Ancak bu grafik, büyüklüğü 7.5 olan depremler için geçerli olup, 7.5'ten farklı büyüklükteki depremler için Çizelge 3.5.'de verilen düzeltme katsayılarının grafikten belirlenen CSRL değerine uygulanması gerekir.

Çizelge 3.5. M=7.5 dışındaki depremler için düzeltme katsayıları (Seed ve ark., 1985)

Depremin büyüklüğü, M	0.65 τ_{max}'taki temsil edici çevrimlerin sayısı	M = M_x için (CSRL) / M = 7.5 için (CSRL)
8.5	26	0.89
7.5	15	1.00
6.75	10	1.13
6.0	5-6	1.32
5.25	2-3	1.50

M_x : Herhangi bir depremin büyüklüğü



Şekil 3.13. Normalize edilmiş darbe sayısı ile çevrimsel gerilim oranı arasındaki ilişki (Seed ve DeAlba, 1986)

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_L) ise, CSRL ve CSRE değerleri karşılaştırılarak aşağıdaki ifadeden belirlenir

$$F_L = (CSRL) / (CSRE) \qquad (3.19)$$

Eğer,

$F \leq 1$ Sıvılaşma gelişebilir

$1 < F_L \leq 1.2$ Potansiyel sıvılaşma söz konusu

$F_L > 1.2$ Sıvılaşma beklenmez şeklinde değerlendirilir (Seed ve Idriss, 1982).

Güvenlik katsayısı (F_L) ile birlikte, zemin sıvılaşmasından kaynaklanan hasarların sıvılaşma derecesine de bağlı olduğu görülmüştür.

Dolayısıyla Iwasaki ve ark. (1984), zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin göreceli olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamak amacıyla aşağıdaki ifade ile verilen sıvılaşma indeksini (I_L) önermişlerdir (Tezcan ve Teri, 1996).

$$I_L = \sum_{i}^{n} (FWH)i \qquad (3.20)$$

Burada

Eğer $F_L < 1$ ise, $F = 1 - F_L$

Eğer $F_L \geq 1$ ise, $F = 0$

Eğer $z < 20$ m ise, $W = 10 - 0.5z$

Eğer $z \geq 20$ m ise, $W = 0$

n = Değerlendirilen zemin seviyelerinin sayısının toplamı

i = Derinlikle artan seviye sayısı

z = Serbest yüzeyden itibaren seviyelerin orta noktalarının derinliği (m)

H = Seviye kalınlığı (m)

W = Sıvılaşma potansiyelini azaltma faktörü.

Sıvılaşma indeksi (I_L), farklı sayıda ve farklı seviyelerde oluşan bir zemin istifinde, her seviye için ayrı ayrı hesaplanır ve I_L değerleri bir önceki tabakanın I_L değeriyle toplanarak o zemine ait toplam sıvılaşma indeksi değeri elde edilir.

Sonuç olarak, elde edilen toplam sıvılaşma indeksinin (ΣI_L) değerlendirilmesi, Çizelge 3.6.'da verilen sıvılaşma indeksi değerine karşılık gelen sıvılaşma potansiyeli derecesiyle ifade edilebilmektedir.

Çizelge 3.6. Sıvılaşma risk dereceleri (Tezcan ve Teri,1996)

Sıvılaşma indeksi (I_L)	Sıvılaşma Potansiyeli Derecesi
0	Çok Düşük
$0 < I_L \leq 5$	Düşük
$5< I_L \leq 15$	Yüksek
$15< I_L$	Çok Yüksek

3.2.5.1.3. Çin milli kodu

a) ″ The Chinese National Code of Aseismic Design for Buildings" aşağıdaki denklemi önermiştir (Wang ve Law, 1994).

$$N_{cr} = N_o * [\ 0.9 + 0.1(d_s - d_w)\ ] * \sqrt{(3/p_c)} \qquad (3.21)$$

Burada,

d_w : Yeraltı su seviyesi derinliği (m)

d_s : Deney yapılan zeminin derinliği (m)

p_c : Yüzde olarak ince dane ($D \leq 0.005$ mm) miktarı, eğer $p_c< 3$ ise $p_c = 3$ alınır.

N_o: Çizelge 3.7.' de gösterildiği şekilde tasarım deprem şiddetine bağlı ampirik N değeri

Çizelge 3.7. N_o Değerinin Belirlenmesi (Wang ve Law, 1994)

Deprem alanına yakınlık/uzaklık	Tasarım Deprem Şiddeti (I)		
	VII	VIII	IX
Yakın Alan	6	10	16
Uzak Alan	8	12	-

Zeminde 15 m içinde ölçülen N değeri yukarıdaki denklemden bulunan N_{cr} değeri ile karşılaştırılır. Eğer $N < N_{cr}$ ise "zeminin sıvılaşma riski" vardır.

3.2.5.1.4. Enerji metodu (Wang ve Law, 1994)

Bu metodun temel ilkesi, deprem sırasında meydana gelen titreşimlere karşı zeminin enerji kaybını, sismik harekete karşı bir parametre olarak kullanılması prensibidir. Laboratuarda dinamik yüklemeyle elde edilen enerji kaybı ile boşluk suyu basıncı arasındaki ilişki ve arazi verilerinin regresyon analizleriyle korelasyonu yardımıyla sıvılaşma potansiyeli
değerlendirilmektedir. Buna göre suya doygun kum zeminlerde sıvılaşmayı tanımlamak için aşağıdaki ifade verilmiştir.

$$\frac{10^{1.5M}}{2.28 * 10^{-10} * N_1^{11.5} * R^{4.3}} \geq 1 \qquad (3.22)$$

Burada;

M: Depremin büyüklüğü ,

R: Odak uzaklığı (km)

N_1: 100 kPa efektif basınç ve %60 enerji oranına göre düzeltilmiş standart penetrasyon dayanımıdır.

3.2.5.1.5. Başlangıç ivmesi yöntemi

Bu yöntemde kullanılan güvenlik sayısı, F_a aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F_a = a_d / a_{max} = 1.6 * a_t / a_{max} \quad (3.23)$$

a_t : Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç (eşik) ivmesi.

a_{max}:Depremin meydana getirebileceği varsayılan maksimum ivme.

a_d : Tasarım ivme değeri.

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak güvenlik sayısı Fa, hesaplanır ve sıvılaşma potansiyeli belirlenebilir:

$F_a \leq 1$ ise sıvılaşma riski yüksek

$F_a \geq 1$ ise sıvılaşma riski düşük olarak kabul edilir.

Arazideki başlangıç yüzey ivmesi başlangıç deformasyonu γ_t 'nin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvılaşabilen kum tabakası için, herhangi bir (z) derinliğinde oluşan yatay yüzey ivmesi (a), ivmeyle orantılı olacak şekilde, tabaka üzerinde sismik kayma gerilmesine neden olur.

$$\tau = a / g * \sigma_v * r_d \quad (3.24)$$

σ_v : Toplam düşey gerilme

g : Yerçekimi ivmesi

r_d : Derinliğe bağlı olarak değişen gerilme düzeltme sayısı (Çizelge 4.1).

Gerilme azaltma katsayısı r_d, zeminin sıvılaşmaya karşı direncini gösteren bir parametredir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$r_d = 1\text{-}0.015 * z \qquad (3.25)$$

Kum tabakası içindeki sismik kayma deformasyonu γ ise;

$$\gamma = \tau / G \qquad (3.26)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada G, zeminin kayma modülü olup, bu değer deprem sırasında değişkendir. Değişim, deformasyon ve aşırı boşluk suyu basıncına bağlıdır. Deprem süresince $\gamma < \gamma_t$ olduğu kabul edildiğinde boşluk basıncı oluşmaz, $\gamma = \gamma_t$ limit kabulu için, maksimum ivme, başlangıç ivmesi a_t olarak tanımlanır.

Başlangıç deformasyonu ve başlangıç ivmesi aşağıdaki bağıntı ile açıklanabilir:

$$\gamma_t = [a_t / g] / G_t * \sigma_v * r_d \qquad (3.27)$$

Burada G_t zeminin sekant kayma modülüdür. Aşağıdaki formülle sekant kayma modülüne ulaşılabilir:

$$Gt = G_{max} * [G / G_{max}]t \qquad (3.28)$$

G_{max} : Zeminin küçük kayma gerilmelerinde ölçülmüş maksimum kayma modülü olup,

$(G / G_{max})t$: Başlangıç deformasyonu sırasındaki modül azaltma faktörü olarak tanımlanır .

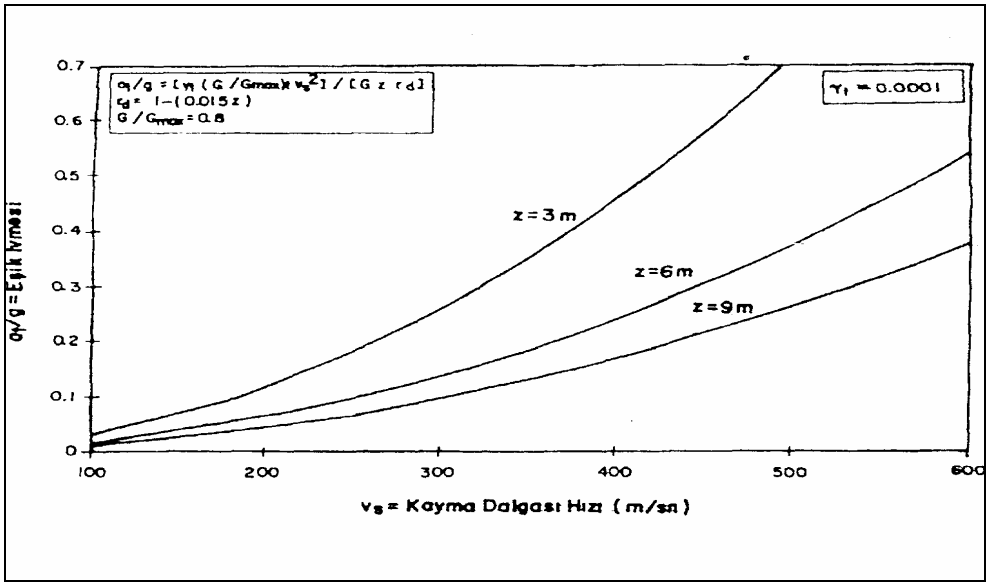
Maksimum kayma modülü, toplam yoğunluk (ρ) ve kayma dalgası hızı V_s yardımıyla hesaplanabilir:

$$G_{max} = \rho * V_s^2 \qquad (3.29)$$

Eşitlik 3.25 3.27 ve 3.28 kullanılıp $\sigma = p^* g^* z$ olarak yerine konulduğunda aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$a_t / g = \gamma_t^* [G]_t / Gmax / g * z * rd * V_s^2 \quad (3.30)$$

Şekil 5.8.'de verilen eğride başlangıç deformasyonu $\gamma_t = 0.0001$ olarak alınmış olup, bu şekil değiştirme değerine karşılık gelen, $(G / G_{max})_t = 0.8$ kabulü yapılmıştır. Diğer γ yüzdeleri için a_t /g oranı yukarıdaki denklemden hesaplanabilir (Hardin ve ark.1972). Şekil 3.14.'de görüleceği üzere zeminin kayma dalgası hızı V_s büyüdükçe, başlangıç ivmesi değeri, a_t artmaktadır.



Şekil 3.14. Başlangıç ivme değerleri önerisi ($\gamma_1 = 0.0001$) (Dobry ve ark. 1981)

Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için a_t değerini ayrıca, 1.6 gibi bir güvenlik faktörü ile çarparak sıvılaşmaya meydan verecek maksimum "tasarım ivme değeri" tanımlanır:

$$a_d = 1.6 * a_t \quad (3.31)$$

Başlangıç ivme güvenlik faktörü tek başına sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek için yeterli değildir. Buradan elde edilen sonuç diğer kriterlerle denetlenmelidir (Dobry ve ark. 1981)

3.2.5.1.6. Sıvılaşma direnç faktörü

Herhangi bir zemin elemanının sıvılaşmaya karşı direnç yeteneği, sıvılaşma güvenlik sayısı F_L ile açıklanabilir.

$$F_L = R / L \quad (3.32)$$

Burada;

R :Zeminin sıvılaşma anındaki tekrarlı kayma oranı parametresi.

L : Şiddetli bir depremde meydana gelebilecek kayma gerilmesi oranıdır.

Yukarıdaki eşitlikte, güvenlik sayısı F_L, birden küçük bir değer alırsa, zeminin deprem sırasında sıvılaşacağı kabul edilir.

Eşitlik 3.32'de yer alan R parametresi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R = 0.0882 * \sqrt{N_1 / \sigma_v' + 0.7} + B \qquad (3.33)$$

$0.04\ mm \leq D_{50} \leq 0.60\ mm$ için $B = 0.225 * \log_{10} * 0.35 / D_{50}$

$0.60mm \leq D_{50} \leq 1.50\ mm$ için B= -0 05 olarak alınmalıdır.

Burada;

N_1 : Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı

σ_v' : Efektif düşey gerilme (kg/cm^2).

D_{50} : Ortalama dane çapı (milimetre).

Eşitlik 5.30 'daki L parametresi ise, Eşitlik 5.22'deki basit ilişkilendirme ile verilebilir:

$$L = \tau_{max} / \sigma_v' = a_{max} / g * \sigma_v / \sigma_v' * r_d \qquad (3.34)$$

Burada;

τ_{max} : Maksimum kayma gerilmesi

a_{max} : Maksimum yüzey ivmesi

g : Yerçekimi ivmesi

σ_v : Toplam düşey gerilme

r_d : Düzeltme sayısı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Araştırma Bulguları

4.1.1. Türkiye için sıvılaşma inceleme modeli

Soydemir ve Özkan (1981) tarafından yapılan bu çalışma ile Türkiye için bir taslak şartname önerilmiştir. Öneri, düzenlendiği yıl gereği 1975 Deprem Yönetmeliği verilerini esas almıştır. Önerilen bu model, Seed (1979) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmanın ilkeleri üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşımda incelenen arazi için, sahanın etkisi altında bulunduğu sismik durumun doğuracağı ortalama devirsel kayma gerilmesi derecesi incelenmekte, ve bu derece ile ilgili arazide bulunan kum / kumlu zeminlerin sıkılık oranı ve yeraltı su seviyesi ile ilişkilendirilerek sıvılaşmanın gerçekleşeceği limit devirsel gerilme oranı ile karşılaştırılmaktadır. İlgilenilen zemin şartlarındaki limit devirsel gerilme oranı, özellikle 1964 yılından sonra gözlenmiş sıvılaşma olaylarına dayandırılmıştır. Yatay yüzeye sahip zemin yapısı için ana sismik etken taban kayadan zemin yüzeyi yönünde ilerleyen kayma dalgalarıdır.

Bu kayma dalgaları zeminin yapısında kayma gerilmeleri ve kayma deformasyonları oluşturmaktadır. Zemin yüzeyinden uygun derinlikteki karakteristik bir zemin elemanı için deprem süresince oluşacak ortalama devirsel kayma gerilmesi oranı (Seed 1979):

$$\tau_{ort} = 0.65 * a_{max} * \sigma_o * r_d \quad \text{olup,} \qquad (4.1)$$

Burada;

τ_{ort} : Ortalama devirsel kayma gerilmesi (kg/cm^2)

σ_o : İncelenen derinlikte zemin toplam basıncı (kg/cm^2)

r_d : Zemin yapısının rijit olmaması nedeni ile ilgili düzeltme faktörü

a_{max} : İncelenen arazi için zemin yüzeyinde etkimesi olası sismik ivme (cm/sn^2

Çizelge 4.1. Derinlik ile ayarlama faktörü,r_d, arasındaki ilişki (Seed, 1979)

Derinlik (metre)	r_d
0	1.00
3	0.98
6	0.95
9	0.90
15	0.75

İncelenen arazi için a_{max} değerinin saptanması bir deprem mühendisliği değerlendirmesini gerektirmektedir. 1975 Yönetmeliği'ne göre, Türkiye dört sismik bölgeye ayrılmış olup bu bölgelerin maksimum ivme beklentileri Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Deprem bölgelerinde etkin ivme oranları (Soydemir ark. 1981)

Deprem Bölgesi	Karakteristik Deprem (Richter Magnitude)	Maksimum ivme
I	7 -7.5	0.24 -0.32
2	6 -6.5	0.16 -0.24
3,4	5 -5.5	0.08 -0.16

Eşitlik 4.1. zemin yapısında düşünülen belirli derinlik için hesaplanacak efektif düşey gerilmeye göre normalize edildiğinde Eşitlik 4.2 elde edilir.

$$\tau_{ort} / \sigma_o' = 0.65 * a_{max} * \sigma_o / \sigma_o' * r_d \qquad (4.2)$$

4.1.2. Deprem sonrası oluşan sıvılaşma etkilerinin değerlendirilmesi

4.1.2.1. 17 Ağustos 1999 depreminin Adapazarı kent merkezindeki sıvılaşmaya etkisinin değerlendirilmesi

17 Ağustos 1999 tarihinde saat 3.02'de, Kuzey Anadolu Fay Hatt'ında yer alan Adapazarí nda moment büyüklüğü Mw=7.4 ve yaklaşık 45- 50 saniye süren bir deprem meydana gelmiştir. Deprem, Marmara Bölgesinin tamamı ile Kuzey Anadolu Fay Hattının doğu yönündeki uzantısında yer alan Düzce ve Bolu gibi şehirleri de etkilemiştir. 17 Ağustos depremi, Kuzey Anadolu Fayı olarak anılan ve Marmara'nın batısından Erzincan'a kadar uzanan, toplam uzunluğu 1000 km'yi aşan fayın Gölyaka –Yalova arasında kalan yaklaşık 120 km' lik kısmının yırtılması sonucunda meydana gelmiştir. Fay kırılması tek parçadan değil 3 parçadan meydana gelmiş, bu nedenle yer hareketlerinin şiddeti beklenenden düşük ama süreleri uzun olmuştur (Sucuoğlu, 2000). Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi depremin etkisiyle Adapazarı'nda çok sayıda binada büyük hasarlar meydana gelmiş önemli ölçüde can ve mal kaybı olmuştur.



Şekil 4.1. 17 Ağustos 1999 Adapazarı depreminde sıvılaşma sonucu yan yatmış bina (Demirtaş ve Erkmen, 2001)

Depremin odağı Gölcük yakınlarında 40.70 N ve 29.99 E koordinatlarındadır. Deprem merkezinin derinliği 17 km'dir. Kuzey Anadolu Fayı Kuzey Anadolu'yu

Orta Anadolu'dan ayırmaktadır. Yani Anadolu'nun kuzeyi ile ortası farklı tektonik levhalarda bulunmaktadır ve Orta Anadolu'nun bulunduğu levha batıya doğru yılda 10-20 mm arasında hareket etme eğilimindedir, Adapazarı depreminde 120 km'lik yırtılma boyunca Orta Anadolu'nun bu kısmı kuzeydeki kısmına göreceli olarak 2.5 metre batıya doğru ilerlemiştir. Bu durumda yaklaşık 150-200 yıllık bir gerilme birikiminin aniden boşaldığı sonucuna ulaşabiliriz. Gerçekten de fayın kırılan bölgesindeki son büyük depremin bu kadar süre önce olduğu sanılmaktadır. Fay atımı olarak anılan ilerleme miktarı Gölcük'te 4 metreye ulaşmıştır. Tüm bu ölçüler Adapazarı depreminin büyük bir deprem olduğunu göstermektedir (Köleoğlu, 2002).

4.1.2.1.1. Zemin ve temel mühendisliği açısından değerlendirme

17 Ağustos 1999 Adapazarı depreminde; Adapazarı, Gölcük ve Yalova'da meydana gelen hasarların başlıca sebebinin zemin problemlerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Buna karşılık, ciddi ve bilimsel zemin araştırmalarına dayanan temel mühendisliği çözümlerinin uygulandığı projelerde örneğin, yumuşak zemin koşullarında kazıklı temel sistemlerine taşıtılan binalarda ve sanayi tesislerinde, fay hattına çok yakın olsa bile herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Adapazarı örneğinde olduğu gibi, zemin koşulları elverişsiz ve yeraltı su seviyesi çok yüksek olduğu halde ağır yapıların bile tekil veya sürekli temellere taşıtıldığı yerlerde ise binaların farklı oturma yaptığı, devrildiği, yana yattığı veya zemin katların bodrum kata dönüştüğü tespit edilmiştir. Alüviyal zeminlerin yaygın şekilde gözlendiği deprem bölgesinde, deprem sırasında meydana gelen titreşimler bu zeminlerin içerdiği suya doygun kumlu-siltli düzeylerde sıvılaşma davranışının gelişmesine neden olmuştur. Yeraltı suyu seviyesinin de son derece sığ konumlu olması bu süreci kolaylaştırıcı rol oynamıştır. Sıvılaşmalar Adapazarı, Arifiye, Sapanca Gölü'nün güney kıyısı Gölcük ve Hersek deltasında gözlenmiştir. Alüvyonlarda sığ derinliklerde ve su tablasının altında bulunan ince kum ve siltli kum düzeylerinde gözenekler arasındaki boşluk suyu basıncı titreşim sırasında kritik değerlere yükselerek zeminin taşıma gücünü yitirmesine neden olmuş ve üzerinde bulunan yapıların yana yatmasına, oturmasına veya belirli ölçüde zeminin içine

girmesine yol açmış olup, yapıların yakın çevresinde yüzeyde kum kaynamaları şeklinde kendini göstermiştir (Köleoğlu, 2002).

4.1.2.2. Adana Ceyhan Depreminde meydana gelen zemin sıvılaşmasının ve etkilerinin incelenmesi

Adana Ceyhan depreminde mühendislik açısından önem taşıyan zemin sıvılaşması olgusuna Ceyhan Nehri boyunca sıkça rastlanılmıştır. Alüviyal islifin yaygın olarak gözlendiği deprem bölgesinde özellikle Ceyhan Nehri kıyısına paralel 50 km' lik bir hat boyunca ve Ceyhan ile yakın civarındaki bazı yerleşim birimlerinde deprem sırasında meydana gelen titreşimler, bu çökellerin içerdiği suya doygun kum ve siltli kum düzeylerinde sıvılaşma davranışının gelişmesine neden olmuştur. Yeraltı suyu seviyesinin Ceyhan Nehri civarında oldukça sığ konumda olması bu süreci kolaylaştırıcı bir rol oynamıştır. Alüvyal zeminlerde gözlenen sıvılaşma olgusu: zeminlerde oturma ve yanal yayılma gibi deformasyonların gelişmesine neden olurken, yüzeydeki yapılarda da eğilmelere, oturmalara ve boru su tankı vb. gibi gömülü hatif yapılarda ise yükselmeye yol açmaktadır. Şekil 4.2.'de kum volkanları ve kum akmaları hala net olarak farklı mevkilerde gözlenebilmektedir.



Şekil 4.2. Asmalı Köprü yakınlarındaki sıvılaşma (Aydan ve Ulusay, 1998)

Adana ve Ceyhan arasındaki bölgede sıvılaşmanın geniş bir alana yayılması, depremin büyük ölçüde zarar verici etkilerinin meydana gelmesine neden olmuştur. Bu etkiler metrelerce genişlikte çatlakları ve onlara eşlik eden kum kaynamalarını içermektedir.

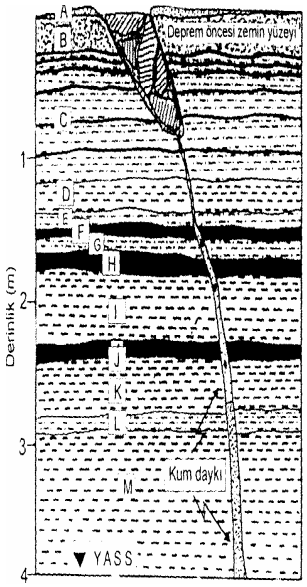
Yöre insanlarına göre; sıvılaşan toprak ve su esas şok süresince yüzeyden 7 – 8 m yukarıya yükselmiştir. Çok geniş ve devamlı yer altı çatlakları ve kum kaynamalarının yüzey etkileri incelenmiş, deprem bölgesinde hasara uğramış yapıların olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.3.' de görüldüğü gibi Abdioğlu yerleşim bölgesinde hasara uğramış yapılar arasında bir ilkokulun bahçesin yan yatan çeşmede bulunmaktadır.



Şekil 4.3. Abdioğlu Köyünde su deposu kulesi altındaki 5 cm' lik farklı oturmalar (Aydan ve Ulusay, 1998)

Bu bölgede, kumlu toprak sıvılaşma süresince fisürlar içinde yükselmiş ve sıvılaşmamış toprak etrafında tabaka oluşturmuştur. Bu nedenle açıktır ki, kum tabakaları üzerinde mevcut olan ince siltli ve killi tabakaların her ikisi de sıvılaşmadan çabuk etkilenmektedir ve yüksek yeraltı su seviyesi (genellikle 3 m den 5 m ye kadar) sıvılaşmanın oluşmasına uygun koşulu meydana getirmektedir.

Ceyhan ilçesinde yapılan hendek çalışmasında sıvılaşmış kum daykının genişliği yüzeyin hemen altında 1-2 cm civarında iken 4 m derinde 10 cm' ye erişmiştir Şekil 4.4.'de Abdioğlu Köyünde Demirtaş (1998) tarafından açılan hendeğin duvarındaki yüzeye kadar ulaşamayan kuma ait dayk görülmektedir. Genişliğin artması sıvılaşmış kumun 7 m derinlikte bulunduğu şeklinde değerlendirilmiştir Sıvılaşmış kum; gelişen gözenek suyu basıncının büyüklüğüne, sıvılaşan zeminin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlı olduğu gibi, ayrıca sıvılaşan zeminin üzerinde yer alan ve sıvılaşmaya yatkın olmayan örtü zeminlerinin kalınlığı ile geçirgenliğine de bağlı olarak yüzeye kadar erişememekte ve yüzeyin birkaç metre altında dayk ve sil şeklinde yükselerek kalmaktadır (Kuru, 2001).



A: Sıvılaşmış kum
B : Kumlu silt
C : Kahverenkli kil ve killi silt ardalanması
D : Kahverenkli kil
E : İnce tabakalı kahverenkli kil aratabakalı silt
F : Kahverenkli kil
G : Silt
H : Kahverenkli kil
l : Gri-yeşil kil
J : Kahverenkli kil
K : Kalın tabakalı gri yeşil kil
L : Siltli kum
M : Kalın tabakalı gri-yeşil kil

Şekil 4.4. Sıvılaşmış kuma ait dayk

Bu tür durumlarda, yüzeyde sıvılaşmanın göstergesi olabilecek herhangi bir kum fışkırması veya kum volkanı gözlenmezken, derinde düşey veya yatay yöndeki yayılma sonucu yüzeyde farklı oturmalar meydana gelebilmektedir. Sıvılaşma sonucu gelişen bir diğer zemin yenilme türü ise yanal yayılmadır. Şekil 4.5.' de zeminde meydana gelen yanal yayılma hareketi görülmektedir. Yanal yayılma, zeminin sıvılaşmaya bağlı olarak nisbeten sığ bloklar halinde ayrılarak ve depremden kaynaklanan kuvvetlerin etkisi altında yanal yönde hareket etmesidir. Bu hareket, genellikle son derece düşük eğimli yamaçlarda (0.3-3 arasında) akarsu yatağı, göl ve deniz kıyısı gibi serbest yüzeylere doğru gelişir (Aydan ve Ulusay, 1998).



Şekil 4.5. 1998 Ceyhan depreminde sıvılaşma (Yanal yayılma) (Aydan ve Ulusay, 1998)

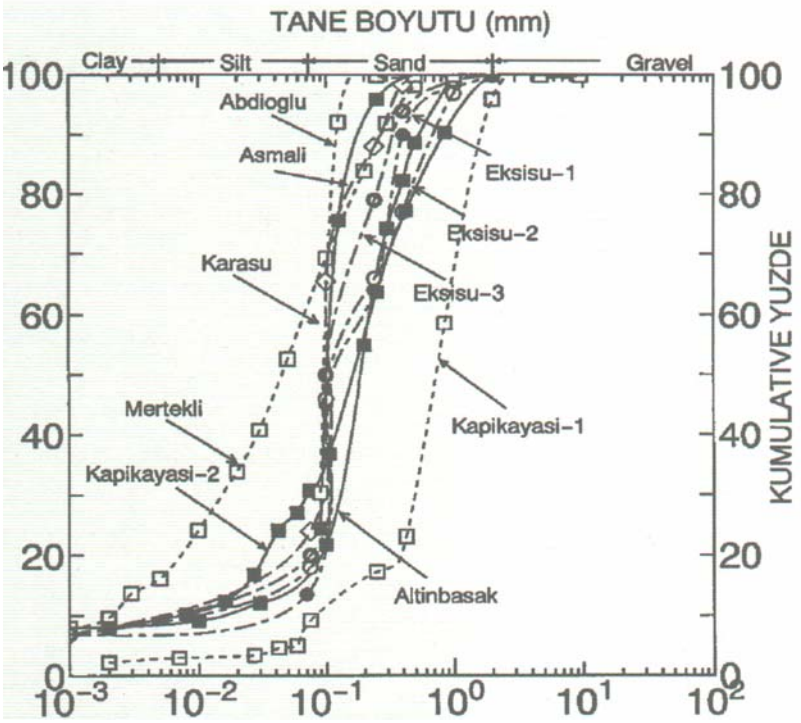
Ceyhan Nehrindeki toprak set boyunca gözlenen şev kayması alışılmış şev kaymalarından farklı olarak, zeminin yan yayılmasının sonucudur. Çok geniş alanda zemin hareketleri gözlenmiştir. Depremin yan yataklanmasının çok önemli yapısal hasar meydana getirmemesi sevindiricidir. Bununla beraber bu depremde gözlenen sıvılaşmanın büyüklüğü ve yan yayılma hareketleri, Türkiye de deprem sonrası mühendislik yapılarının tasarlanmasında şüphesiz büyük bir etki oluşturmuştur (Aydan ve Ulusay, 1998).

4.1.2.2.1. Zeminin fiziksel ve dizin özelliklerinin incelenmesi

Sıvılaşmış ve sıvılaşmamış numunelerin sırasıyla, birim ağırlıkları laboratuvar şartlarında tüp ve blok numunelerle belirlenmektedir. Depremden iki hafta sonra sıvılaşmış zeminden alınan numuneler, Ceyhan Nehri Kıyısından alınan nem içeren numuneler yeraltı su seviyesinin üstünden sıvılaşmamış zeminden alınan blok numunelerden oluşmaktadır. Özgül yoğunluk değerleri sıvılaşmış ve sıvılaşmamış zemin tabakalarında sırasıyla, 2.59-2.70 ve 2.39- 2.57 bulunmuştur. Sıvılaşmış zeminlerin büyük çoğunluğunun, kaynamanın hemen sonrasında doğal nem

miktarının azalmış olmasına rağmen sıvılaşmamış zemin numunelerinin nem miktarından daha büyük ölçüde nem miktarı değerlerine sahip oldukları görülmüştür (Aydan ve Ulusay, 1998).

Granülometri etüdü sıvılaşmış ve sıvılaşmamış her iki zeminde 8 numunede yapılmıştır. Şekil 4.6.' da Türkiye de daha önceki depremlerde sıvılaşmış zeminlere ait granülometri eğrisi gösterilmiştir. Açıktır ki sıvılaşmış tabakalardan alınan numuneler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre, iyi derecelenmiş kumlu zeminlerde Cu>6 ve Cc 1-3 arasında olması gereken değerlerle buluşmamıştır. Bu numunelerin özellikleri zeminlerin kötü derecelenmiş kumlarla düşük yüzdeli ince taneleri içerdiğini belirmektedir (Aydan ve Ulusay, 1998).



Şekil 4.6. Ceyhan Havzası nehir yatağının üst tabakalarındaki sıvılaşmış zeminden alınan zemin numunelerinin granüleometri eğrisi (Aydan ve Ulusay, 1998)

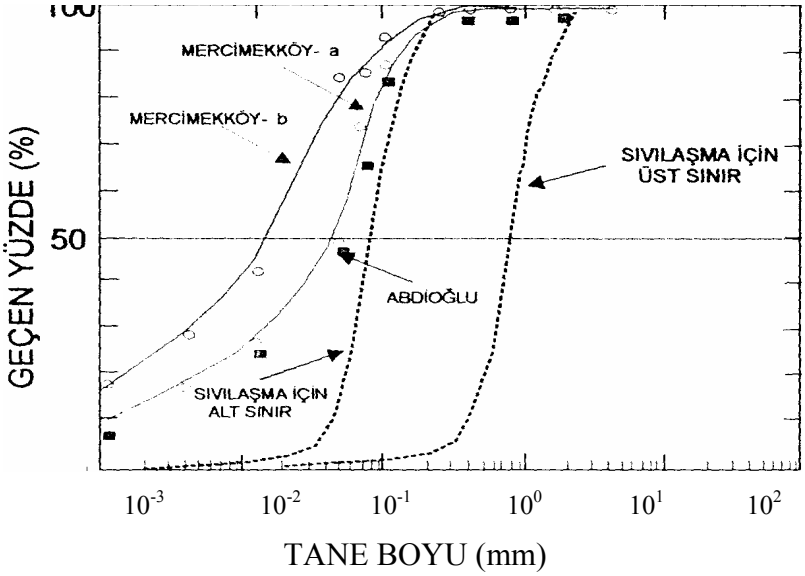
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminin ileri sürdüğü prosedüre göre bu bölgedeki zemin numuneleri SP (kötü derecelenmiş kumlar ve çakıllı kumlar; ince taneleri az veya hiç olmayan) grubuna girmektedir. Bölgenin göze

çarpan aktif sismik niteliğinin yüksek yeraltı su seviyesi ve zemin karakteristik özelliklerinin bir araya gelmesi sıvılaşmanın oluşmasını sağlayan etkenler arasındadır (Aydan ve Ulusay, 1998).

Bu seviyede bulunan D değeri, 0.019 ve 0.07 mm arasında değişmektedir. Plastik olmayan numune dışında, ince taneli bu zeminin sırasıyla likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerleri 27.4-35.7 % ve 6.4-8.8 % olarak belirtilmiştir. Görülmüştür ki düşük plastisite içeren tüm numuneler % 50 ‘ den daha az likit limite sahiptir.

ML (inorganik silt ve çok ince kumlar, kaya tozu çok az plastik siltli veya killi ince kumlar.) gurubu olarak sınıflandırılan bu zemin gurupları siltli kil olarak tanımlanır. Bu tabakada sıvılaşma olayının meydana gelmesinin nedeni, ince taneler ile orta büyüklükte tanelerin bir araya gelmesi ve sıvılaşmanın yer altı su seviyesi ve hızlanan dalgaların genliğiyle olan durumdur. Ayrıca, alınan örneklerin ortalama tane boyları (D_{50}) da genellikle 0.11 mm ile 0.3 mm arasında değişmekte olup, Iwasaki(1986)' nin önerdiği D_{50} aralığında göre sıvılaşma olasılığı yüksek zemin sınıfına girmektedirler. Dolayısıyla, alüvyal düzlüklerde gevşek zeminlerin bu özelliklerinin yanısıra, yeraltı suyu tablasının da çok sığ bir konumda olması, bölgenin depremselliği de gözönüne alındığında, sıvılaşma açısından uygun ortamları oluşturmuştur (Kuru, 2001).

Şekil 4.7.’de tane boyu dağılımı eğrileri esas alındığında, bu zeminlerin tane boyu dağılımlarının, sıvılaşabilen zeminler için önerilen alt ve üst sınırların dışında kaldığı görülmektedir. Zeminlerde ince tane oranlarının %35' den fazla olması ve bu seviyelerin su tablasının üzerinde bulunmaları nedeniyle sıvılaşma gözlenmemiştir.



Şekil 4.7. Ceyhan Havzası nehir yatağının üst tabakalarındaki sıvılaşmamış zeminden alınan zemin numunelerinin granüleometri eğrisi grafiği (Aydan ve ark. 1998)

4.1.2.3. Erzincan Depremi'nin Erzincan-Ekşisu'daki sıvılaşmaya ve yerel zemin koşullarına etkisinin değerlendirilmesi

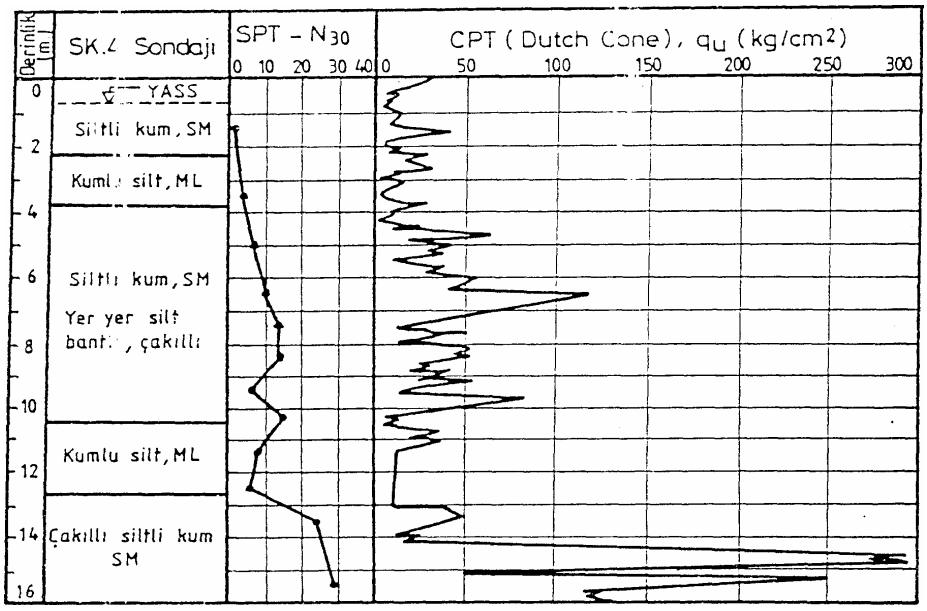
Aktif bir deprem bölgesinde yer alan Ekşisu 'da 1992 Erzincan depremi sonrası, bir çok yerde zemin yüzeyinde sıvılaşma sonucu oluşmuş kum konileri gözlenmiştir. Bu alan, Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde fay doğrultusunda yer alan , yaklaşık 50 km uzunluğunda, ve 15 km genişliğinde olan Erzincan Ovasının kuzeyinde bulunmaktadır. Ovanın ortasında Fırat Nehri geçmektedir. Ovada genel zemin koşulları, dağ yamaçlarına yakın olan kısımlarda çakıl ağırlıklı kaba daneli, ova ortalarında ise siltli, killi, kumlu zemin tabakalarından oluşmaktadır. Yapılan incelemelerde, sıvılaşan bölgenin birbirine yaklaşık 2 km uzunlukta bulunan iki aktif fay arasında yer almakta olduğu belirlenmiştir. Yapılan sondajlarda zemin yüzeyinden yaklaşık 15 metre derinlikte değişik kaynaklardan beslenen artezyen su tabakasının bulunduğu gözlenmiştir. Bölgede kullanım alanlı pek çok su kaynağı bulunmaktadır. Bölgenin kuzeyinde Ekşisu Maden suyu, ova tarafında ise kükürtlü su (ılıca) çıkmaktadır.

Zeminin tabakalaşma durumu ve özelliklerini belirlemek için sıvılaşan alan içerisinde derinliği 12 ile 20 metre arasında değişen 8, sıvılaşma alanı dışında (fayların diğer tarafında) ise derinliği 11 ile 19.5 metre arasında değişen 3 sondaj yapılarak örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır. Ayrıca sondajlarda (SPT) standart penetrasyon deneyi ve bir kısmı farklı yerlerde olmak üzere sondaj yanlarında (CPT) koni penetrasyon deneyi yapılmıştır. Elde edilen verilere göre sıvılaşma alanında zemin tabakaları, değişik oranlarda silt içeren kum ile farklı plastisitede olan, kumlu siltlerden ve organik zeminlerden oluşmakta, alanın batı kısmında ise tamamen yumuşak silt ve organik zemin tabakaları bulunmaktadır. Sıvılaşma alanı içerisinde yapılan SPT ve CPT deneyleri kumlu zeminlerin sıkılıklarının çok gevşekten orta sıkıya değiştiğini, silt ve organik zeminlerin ise yumuşak kıvamda olduğunu göstermiştir. Sıvılaşma alanı dışında zemin özellikleri tamamen değişmekte, sıkı kum, çakıl ve katı kilden oluşmuş zemin tabakaları hakim duruma geçmektedir (Erken ve ark., 1985).

4.1.2.3.1. Zemin numunelerinin dinamik davranışı

Erzincan ovasında yer alan Ekşisu bölgesinde 13 Mart 1992 Erzincan deprem sonrası sıvılaşan kumlu zemin tabakalarının zemin yüzeyinde oluşturduğu kum konilerinin gözlenmesi üzerine, bu bölgedeki zemin koşullarını belirleyebilmek için bölge ve civarında sondaj ile SPT ve CPT deneylerini içeren ayrıntılı geoteknik inceleme yapılmıştır. Yapılan sondaj ve arazi deneyleri (SPT ve CPT) sonucunda zemin tabakalarının gevşek siltli kum tabakaları ile yumuşak siltli, killi ve organik zeminlerden oluştuğu belirlenmiştir. İki aktif fay arasında yer alan sıvılaşma bölgesinin dışında ise zemin koşulları büyük bir farklılık göstermekte olup katı kil, sıkı kum, çakıl, kumtaşı, ve kiltaşı oluşmuş tabakalar hakim duruma geçmektedir. Sıvılaşan alandaki zemin koşullarının bölgedeki genel zemin koşullarından bu kadar farklılıklar göstermesi, iki fay arasında kalan bölgenin bir deprem sırasında çökmesinden ve çöken alan üzerinde yer alan silt kum ardalı gevşek alüvyon zemin tabakaların sonradan bu bölgeye taşınarak oluşmasından kaynaklanmaktadır (Erken ve ark., 1985).

Erzincan - Ekşisu ‘ da sondajlar sırasında alınan örselenmemiş zeminlerin (shelby tüp numuneler) depremler sırasında gösterebileceği davranış biçimlerini belirleyebilmek için dinamik basit kesme deney sisteminde drenajsız koşullarda gerilme kontrollü dinamik deneyler yapılmıştır. Tekrarlı yükler, 1hz frekasta (1 saniyede 1 yük tekrarı) konsolidasyonu tamamlamış suya doygun numuneler sıvılaşıncaya kadar uygulanmış, boşluk suyu basınçları ve birim kaymaların zamana bağlı değişimleri incelenmiştir (Erken ve ark., 1985). Şekil 4.8.’de SK. 4A sondajına ait örselenmemiş bir zemin numunesinin $+\tau/\ \sigma=0.353$ tekrarlı gerilmesi altındaki davranış biçimi görülmektedir.



Şekil 4.8. SK.4A Sondajı en kesiti (Erken ve ark., 1985)

σ= 100 kPa konsolide edildikten sonra dinamik yük uygulanan suya doygun olan bu zemin numunesinin plastisite indisi Ip=%8, likit limit değeri w_L =% 36, konsolidasyon sonu su muhtevası w =% 31, tabi birim hacim ağırlığı γ =1.77 gr /cm ve içerdiği kaba dane oranı % 38 ‘dir.

Düşük plastisiteli silt (ML) olan bu numune ilk 20 yük tekrarında (20 saniyede) oluşan boşluk suyu basıncı oranı $\Delta u/\sigma$ = 0.85 kPa, birim kayma ise $+\gamma$ = % 3.6 olmaktadır. Boşluk suyu basıncının bu değeri zemin numunesinin sıvılaşma sonucu göçmesine neden olacak bir seviyededir (Erken ve ark., 1985).

4.1.2.4. Zemin sıvılaşması sonucunda meydana gelen hasarların değerlendirilmesi

Öncelikle bilinmelidir ki, zemin sıvılaşmasının kendisi hasara sebep olan bir olay değildir. Ancak, bu olayın büyük yer değiştirmelere sebep olması, büyük hasarları doğuran temel göçmelerine sebep olur. Bunun yanında sıvılaşma, şev ve yamaç kaymalarına ve istinat duvarlarında yatay zemin basıncının artmasına sebep olur. Deprem hareketiyle oluşan zemin sıvılaşması, büyük kütleler halinde şev akmalarına sebep olabilir. Tamamen sıvılaşmış zemin ve böyle bir tabaka üstündeki zemin blokları onlarca kilometrelik mesafede saatte onlarca kilometre hızla akar. Bu tür akmaya, özellikle gevşek, suya doymuş kum ve siltli, nispeten dik şevlerde ve yamaçlarda rastlanır. Yataya yakın zemin tabakalarının sıvılaşmasında, eğime doğru akış meydana gelir. Akan zeminin yapısı bozulurken, mevcut temellerde ve köprü ayaklarında önemli hasarlar oluşur ve ortaya çıkan göreceli yer değiştirme dolayısıyla köprü tabliyelerinde hasar ve boru hatlarında burkulmalar meydana gelir. Bir yapıyı taşıyan zemin sıvılaşıp taşıma gücünü kaybederse, yapıda hasara yol açan, önemli ölçüde oturma ve dönme meydana gelebilir. Böyle bir hasar 1964 Niigata (Japonya) depreminde meydana gelmiş ve çok sayıda dört katlı apartman binalarında 60 °'ye varan dönmeler ortaya çıkmıştır. Betonarme binalar 0-250 cm oturma, (0-8)°′ lik tilt hareketi yapmıştır. Bu depremde rapor edilen en fazla bina oturma ve tilt değerleri sırasıyla 250 cm ve yaklaşık 8° 'dir.

17 Ağustos 1999 Doğu Marmara depreminde fay hattının 4 km kuzeyinde yer alan Adapazarı'nda gözlenen sıvılaşma olaylarında maksimum bina oturmaları 50-70 cm mertebesinde kalırken tilt hareketinin değişim aralığı (0-6)° olmuştur. Yapılan incelemeler, zemin yüzünün birkaç metre altında bulunan kum tabakasında sıvılaşmanın meydana geldiğini, bu durumun yukarı doğru üstteki kum tabakalarına yayılmasıyla temel altı zeminin taşıma gücünü zayıflattığını ve binalarda oturma ve dönmelere sebep olduğunu göstermiştir. Özellikle, 1999 Kocaeli Depremi'nde Adapazarı'nda meydana gelen, zemin sıvılaşması binalarda şimdiye kadar görülmemiş ölçüde hasar meydana getirmiştir (Arıoğlu ve ark., 2000).

Özet olarak, sıvılaşma sonucunda zeminde meydana gelen yetersizlikleri ve yapılarda oluşan hasarları aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralayabiliriz.

1. Zeminde oturmalar
2. Yüzeye kum ve su fışkırması
3. Zeminde kalıcı yatay deformasyonlar (yayılma)
4. Büyük genlikli yer hareketi
5. Şevlerde akma
6. Taşıma gücü kaybı
7. İstinat duvarları ve rıhtım hasarları
8. Yeraltı yapılarının yüzmesi
9. Sıvılaşmış zemin üzerindeki yapıda çökme, oturma, dönme meydana gelmesidir (Bakır,2001).

4.1.2.4.1. Sıvılaşmanın zemin üzerindeki etkileri

Depremlerin zemin ve mühendislik yapıları üzerinde yol açtığı hasarlar arasında en dramatik olanı, suya doygun gevşek kum tabakalarının sıvılaşması sonucu ortaya çıkmaktadır. Sıvılaşma sonucunda zemin yüzeyindeki yapılar zemin içerisine batarken, zemine gömülü yapılar zemin yüzeyine çıkabilmektedir.

Genellikle, suya doygun bir kum tabakası, deprem titreşimlerine uğradığı zaman sıkışmaya ve hacmini azaltmaya çalışmakta, eğer drenaj mümkün değilse hacim azalması eğilimi boşluk suyu basıncım artırmakta ve boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncına eşit olunca, efektif gerilmeler sıfır olmakta ve kum tabakası mukavemetini tamamen kaybederek sıvılaşma meydana gelmektedir. Sıvılaşma nedeni ile en şiddetli hasarın gözlendiği bölgelerde temel zemini genellikle kalın, uniform, suya doygun kum depozitlerinden oluşmaktadır. Bu bölgelerdeki kumların granülümetresi incelendiğinde efetkif çapın D_{10} = 0.01-0.025 arasında olduğu ve uniformluk katsayısının Cu=2-10 arasında değiştiği ifade edilmiştir (Özaydın, 1982).

Sıvılaşma titreşimlerin şiddeti, titreşim sayısı kumun boşluk oranı (relatif sıkılığı), başlangıç gerilme durumu gibi fakörlerden etkilenmektedir. Depremler sırasında sıvılaşma, zemin yüzeyinde kabarmalara veya oturmalara yol açması nedeniyle, zemin üzerindeki binalarda yıkılmalara veya ağır hasarlara neden olmaktadır. Deprem sırasında, sıvılaşma yanında büyük toprak kaymaları ve şev göçmelerinin olduğu bilinmektedir. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma sonucu oluşan akma tipi kaymalar, kil tabakaları içinde ve altında yer alan ince kum ve silt tabakalarında boşluk suyu basıncı artışları veya sıvılaşma sonucu üstteki tabakaların kayması veya göçmesi sonucu üstünde yer alan toprak dolgularda kaymalar olmuştur. 17 Ağustos depreminde özellikle deprem merkezine yakınlığı nedeniyle Gölcük ve civarında oluşan büyük orandaki toprak kayması sonucu, şehrin büyük bir kısmı tamamen denize kaymış ve bunun sonucunda binalarda yıkılmalar ve ağır hasarlar oluşmuştur. Fay üzerinde yer alan otoyol, demiryolu bağlantıları ve geçitlerde önemli hasarlar oluşmuştur. Fayın geçtiği dağlık arazi üzerinde toprak ve arazı kayması gözlenmiştir. Ayrıca Gölyaka'da dağlık arazide şev kaymaları tespit edilmiştir (Ateş, 2003).

Sıvılaşma sonucunda, boşluk suyu basıncı çevre basıncına (efektif basınca) eşit ve zeminlerin taşıma kapasiteleri sıfır olmakta, zemin davranışı sıvı davranışına benzer bir davranış göstermektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak da zemin yüzeyindeki yapılar duyarlılığım kısmen veya tamamen kaybetmektedir. Bu da mühendislik yapılarında ağır hasarlara sebep olmaktadır. Bu hasar ve kayıpları önlemek veya en aza indirgemek için özellikle yerleşim bölgeleri açısından zeminin yapısı ve sıvılaşma potansiyeli riskini tanımak ve risk haritasını ortaya çıkarmak gerekmektedir. Bu elde edilen risk haritasına uygun mühendislik yapıları inşaa edilerek yapı güvenliği sağlanabilir. Bunun yanında yeni yerleşime açılacak bölgelerin imar çalışmalarında bölgenin riskini kontrol altına almak ve imar yoğunluğunu oluşturmak için sıvılaşma çalışmaları yapılmalıdır (Aydan ve Kumsar, 1997).

4.1.2.5. Sıvılaşma ve etkisine karşı alınması gereken önlemler

Zemin sıvılaşması, zemin yüzeyinde ve yapılar üzerinde önemli hasarları meydana getirmektedir. Yukarıda bölüm bu hasarlar maddeler halinde belirtilmiştir. Örnek olarak, Adapazarı'nda inşa edilecek yapıların zeminlerinde sıvılaşmaya karşı alınabilecek önlemler olarak kazıklı temel veya zemin iyileştirmesi olarak iki ana alternatif önerilebilir. Yerleşim bölgesi olması, zeminin ince daneli, gevşek ve suya doygun olması ve ekonomi gibi nedenlerle çakma kazıklar sorunludur. Kent merkezinde yoğun bir şekilde silt ve yer yer kil tabakalarının bulunduğu düşünülürse taş kolon dolgu tekniği ile beraber uygulama yapılabilir. Gerek depremden hasar gören yerleşim birimlerinde, gerekse diğer bölgelerimizde bundan böyle yer seçimi çalışmalarına gereken önem verilmelidir. Yer seçimi çalışmaları, imara açılacak bölgelerde geniş alanları kapsayacak şekilde jeolojik, geoteknik etütler yapılarak yürütülmeli, zemin koşullarının gerektirdiği durumlarda sıvılaşma potansiyeli belirlenmelidir. Yapıların tasarımında ve inşaasında meydana gelebilecek olan olası bir sıvılaşmadan kaynaklanabilecek zararların en aza indirilebilmesi için esas alınabilecek yöntemleri şöyle sıralayabiliriz (Pınar ve Lahn, 1952; Özaydın, 1982).

1. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde yapı inşaasından kaçınılması,
2. Sıvılaşmaya karşı dayanaklı yapı inşaası,
3. Zemin iyileştirilmesi yoluyla sıvılaşma riskinin ortadan kaldırılması.

4.1.2.5.1. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde yapı inşaasından kaçınılması

Sıvılaşmaya karşı önlem olarak akla ilk gelen ve en ekonomik yöntem sıvılaşabilir zeminlerde inşaat yapılmasından kaçınılmasıdır. Bu amaçla öncelikle sahanın jeolojik ve hidrojeolojik (yeraltı suyuna ilişkin) özellikleri, belirlenmekte daha sonra belirli teknikler ve ölçütler kullanılarak, zemin mekaniği biliminin esaslarından yararlanılarak zeminin sıvılaşmaya yatkın olup olmadığı tayin edilmektedir. Değerlendirme sonuçlarının zeminin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğunu göstermesi halinde planlanan yapının inşaasının bu zeminlerde yapılmasından vazgeçilerek başka inşaat alanı seçenekleri araştırılır. İnşaat alanının terk edilemediği bu tür durumlarda aşağıda belirtilen yapı teknikleri veya zemin iyileştirme yöntemlerinden yararlanılır (Pınar ve Lahn, 1952; Özaydın, 1982).

4.1.2.5.2. Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı inşaası

Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı inşaasında yapının temelini oluşturan yapı elamanları sıvılaşmanın etkilerini karşılayabilecek şekilde tasarlanır. Temeller taşıyıcı sistemin yüklerini zemine aktaran kısımlardır. Temel tipi seçimine; Üst yapıdan gelen yükün nitelik ve niceliği, yapının önemi, zeminin özellikleri göz önünde bulundurularak karar verilmelidir. Derinliklerine göre temeller ikiye ayrılır.

4.1.2.5.2.1. Yüzeysel temeller

Yüzeyden itibaren sığ derinliklerde yer alan yapı temellerinde tüm temel elamanları temelin harekete maruz kalması halinde yapının zemine aynı miktarda oturmasını (üniform oturma) sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Böylece temelin üzerindeki yapısal elemanlarda oluşacak makaslama kuvvetlerinin (birbirine ters yönde etkiyen kuvvet çiftleri) miktarı azaltılmaktadır. Bu amaçla, radye temel tipi seçimi iyi bir yüzeysel temel modeli olarak bilinir. Temelin altında yerel olarak bulunan bir sıvılaşma zonundan kaynaklanacak yükler, bu tür bir temel tarafından

sıvılaşan zonun çevresindeki daha sağlam zemine aktarılarak, yapının görebileceği hasarlar en aza indirilir veya önlenir (Pınar ve lahn, 1952; Özaydın, 1982).

Radye temelin tercih edilmesi gereken durumlar maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir (Celep ve Kumbasar,1998).

1. Zeminin taşıma gücü düşük ise,
2. Zemin kötü ise,
3. Zeminde toplam oturmaların etkisi varsa,
4. Üst yapı önemliyse,
5. Deprem bölgesi ise, radye temel tercih edilmesi gerekir.

4.1.2.5.2.2. Derin temeller

Yapı temellerinin içine yerleştirileceği zeminin taşıma kapasitesinin çok düşük ve sağlam zemin seviyesinin derin olduğu durumlarda yapının yüzeysel temeller üzerine inşaa edilmesi tercih edilmez. Bu tür şartlarda sağlam zemine veya sıvılaşma derinliğinin altına indirerek ana kayaya kadar inen kazıklı temeller oluşturarak yapılar bu temellerin üzerine inşaa edilmelidir, zemin sıvılaşması, kazıklı temellerin üzerinde büyük yanal yüklerin etkimesine neden olur. Bu nedenle zayıf ve sıvılaşmaya yatkın zeminler içinde yapılan kazıklı temeller sadece yapının aktardığı yükleri taşımakla kalmayacak aynı zamanda zayıf zeminin sıvılaşması halinde yatay yönde etkiyen yüklere ve bükülme momentlerine de karşı koyacak şekilde tasarlanır. Ayrıca, iki katlı ve tek katlı yapıların temellerini üst yapı ile birlikte daha rijit hale getirerek deprem esnasında bir bütün olarak davranır hale getirilir, gömme derinliği artırılır, kuyu temel (bodrumlu yapılar) teşkil edilir. Sıvılaşmanın etkisine karşı yeterli derecede direnç gösterebilmesi için kazıklar daha büyük boyutlarda ve takviyeli olarak yapılır. Kazık temel uygulamasında dikkat edilen diğer önemli bir husus da, kazıkların yapının tabanındaki bağlantılarının esnek bir şekilde yapılmasıdır. Böylelikle yapının herhangi bir rotasyona uğraması engellenmiş olur. Eğer kazıkların bağlantı noktaları yenilirse (hasar görürse) yapı döndürücü

momentlere karşı koyamayarak hasara uğrayabilir (Pınar ve Lahn, 1952; Özaydın, 1982).

4.1.2.5.3. Zemin iyileştirilmesi yoluyla sıvılaşma olasılığının ortadan kaldırılması

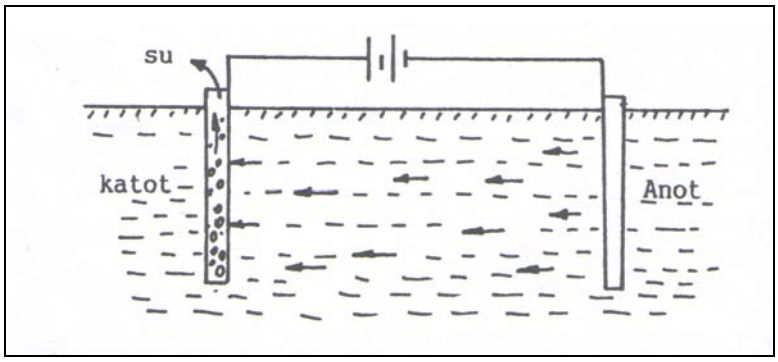
Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirilmesi (ıslahı) tekniklerinin esas hedefi, deprem sırasında aşırı gözenek suyu basınçlarının gelişmesini önlemektir. Hedefe ulaşılması için doğal durumuna oranla zeminin sıkılığı artırılır veya drenaj kapasitesi (suyu uzaklaştırma kapasitesi) geliştirilir. Bu amaçla çeşitli teknikler uygulanmakla birlikte bu teknikler özellikle geniş alanlarda yapılacak iyileştirme çalışmaları için oldukça pahalı tekniklerdir, ve ayrıca siltli zeminlerde İyi sonuç vermeyebilir. Sıvılaşmanın vereceği hasarlara karşı mühendislik projelerinin güvenliğini sağlamak amacıyla, sıvılaşma ihtimali olan zemin tabakalarında aşağıdaki bazı önlemler alınabilir (Ateş, 2003).

4.1.2.5.3.1. Zeminlerin sertleştirilmesi

Zeminlerin sertleştirilmesinden amaç, zeminin kohezyonunu ve içsel sürtünmesini arttırmaktır. Bu da zemin içindeki suyun uzaklaştırılması ile sağlanabilir. Zemin ya da kaya ortamlardaki su düşey ve yatay kuyularla, galerilerle uzaklaştırıldığı gibi aşağıda anlatılacak usuller ile de gerçekleştirilebilir. Bu usullerin bir kısmı kalıcı bir kısmı ise geçici önlemlerdir. Geçici önlemler daha ziyade, kazıların emniyetli bir şekilde yapılması ve gerekli emniyet yapılarının inşasından sonra kaldırılırlar. Duraylılığın sağlanmasında uygulanan kalıcı ve geçici usuller daha çok temel mühendisliğinde (baraj, bina, yol, vb.) uygulanır. Bu usuller kısa ve özet olarak aşağıda verilmiştir (Tarhan, 1989).

4.1.2.5.3.1.1. Elektro-osmoz

Bu usul genelde tane boyutu 0.05-0.005 mm arasında olan siltli killerde uygulanır. Teori 1809 da Reuss tarafından ortaya atılmış ve ilk pratik uygulanası 1941'de Cassagrande tarafından yapılmıştır. Bu usulde zemine yerleştirilen iki elektroca (anot ve katot) akım verilir. Elektrik akımıyla birlikte zemindeki su anottan katoda doğru hareket eder. Katot delinmiş boru olarak yapılır, katoda gelen su delikli boruda toplanır ve pompalarla yüzeye çıkarılır. Bu şekilde diğer yollarla suyu alınamayan zeminlerin sudan arındırılması ve zeminin içsel sürtünme açısının ve kohezyonunun yükseltilmesi, dolayısıyla da kazı şevlerinin duraylılığı sağlanmış olur. Şekil 4.9.'da elektro-osmoz yoluyla siltli killerdeki suyun alınması görülmektedir. Bu usul geçici bir usul olup, kazı şevi diğer yollarla emniyete alındıktan sonra uygulamaya son verilir (Özbayoğlu ve mollamahmutoğlu, 1987).



Şekil 4.9. Elektro-Osmoz yöntemi (Tarhan, 1989)

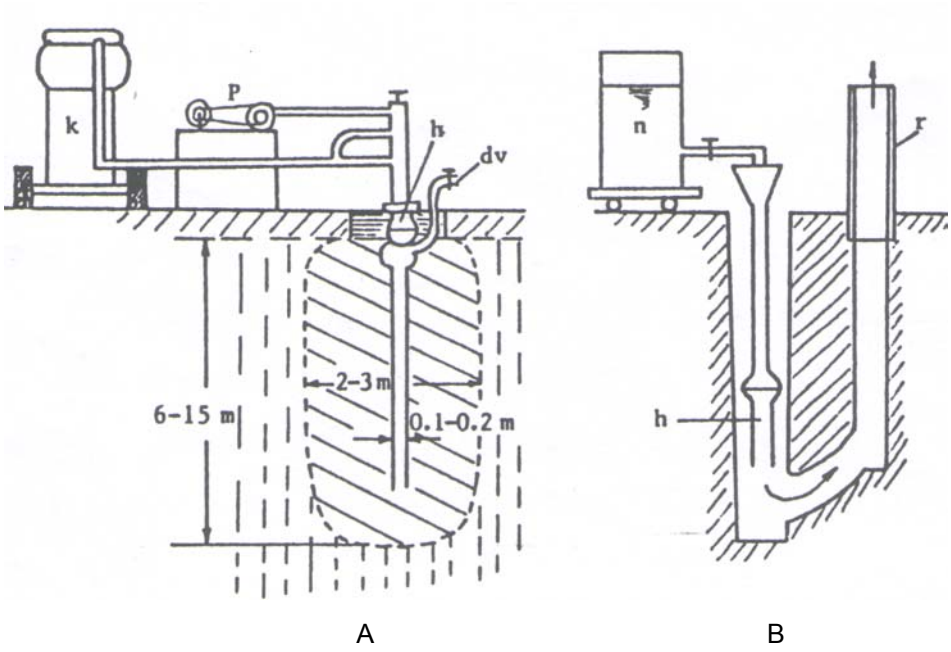
4.1.2.5.3.1.2. Dondurma yöntemi

Temel, şaft (kuyu) ve tünel gibi kazıların yapıldığı ortamlarda oluşturulan kazı duvar ve tavanları kendini tutamayacak kadar zayıf olan zeminlerde duraylılığın sağlanması için uygulanan geçici bir yöntemdir. Zemin ya da kayaç dondurulduğu süre içinde yüksek kayma direnci kazandığı bilinmektedir. Kayma direncindeki artma zemin ya da kayacın içerdiği suyun donması sonucudur. Dolayısıyla burada dikkat edilmesi gereken iki husus vardır. Birincisi dondurulmak istenen ortamın ısı durumunun bilinmesi gerekir. Örneğin derin (et kalınlığı fazla) ya da magmatik faaliyetlere yakın yerlerde açılan tünellerde ısı oldukça yüksekti, yüzeyde yapılacak kazılarda böyle bir durum söz konuşu değildir. İkincisi ise zemin ya da kayaç dondurulduğunda yani içindeki su buz haline geldiğinde artan hacme bağlı olarak oluşacak gerilmelerin duraylılık üzerindeki etkisinin önceden bilinmesi gerekir. Genel olarak yeraltı su akımının olmadığı (2 $_{m}^{3}$ /gün'den az) her ortamda dondurma yolu uygulanabilir, ancak maliyeti yüksek olur. Yumuşak zeminlerde, 7- 8 m derinliklerde ekonomik olarak uygulanabilir. İşin önemine göre bu derinlik arttırılabilir. Soğutucu olarak amonyak, freon gazları ve kalsiyum klorürlü su kullanılmaktadır (Tarhan, 1989).

4.1.2.5.3.1.3. Pişirme yöntemi

Pişirme yöntemi, zemin ve kayaçların içerdiği suyun sıcaklıkla (110°C de) buharlaştırarak ya da zemini pişirerek geçici ve kalıcı olarak uygulanan bir yöntemdir. Bu usulde de amaç zeminlerin içsel sürtünme açışım (Φ) ve kohezyonu (c) arttırmaktadır. Özellikle killer 400- 600 °C ye kadar ısıtıldıklarında rutubet almayacak kadar değişikliğe, 9QO°C ye kadar ısıtıldıklarında ise tuğlaya dönüşmektedir.

Pişirme sonucunda killerin plastisitesi kaybolmakta ve basınç dirençleri artmaktadır (Tarhan, 1989). Şekil 4.10.' da pişirme yöntemi görülmektedir.



Şekil 4.10. Pişirme yönteminin uygulanışı A- Siltli, B-Killi zeminlerde, k- Kompresör, P- Petrol pompası, h- Karıştırıcı (petrol ile havayı) ve yakıcı, dv- Hava girişi, n- Petrol tankı, r- Baca (Tarhan, 1989)

4.1.2.5.3.1.4. Çimentolama (enjeksiyon) yöntemi

Çimento enjeksiyonu ile kumlu, çakıllı bloklu zeminler ile parçalı, çatlaklı kayaçlar sağlamlaştırılmaktadır. Tane ve parçalar çimento şerbeti ile birbirine yapıştırılmakta ve sürtünme direnci hem de kohezyon arttırılmaktadır. Aynı zamanda boşluk suyu basıncı ve hidrostatik basınçların oluşması önlenmektedir. Enjeksiyonun esası, kayaç ya da zeminin boşluk boyutları göz önüne alınarak, enjeksiyonun türüne, amacına ve kayacın özelliklerine göre; su ile belirli oranlarda karıştırılmış su + çimento, çimento + kil + su, çimento + kil + kaya tuzu + su karışımı, belirli bir basınçta boşluklara doldurmaktan ibarettir. Çimento enjeksiyonu ile kalıcı bir sertleştirme elde edilir (Şahinoğlu, 1987).

4.1.2.5.3.1.5. Kimyasal maddelerle enjeksiyon yöntemi

Çimento enjeksiyonunun başarılı olamadığı hareketli yeraltı su zonlarında çoğu zaman kimyasal maddelerle yapılan enjeksiyonlardan yararlanılır. Kimyasal enjeksiyon; şerbetin en yüksek mukavemet gösterecek ve formasyonun en ince süreksizliklerine kadar enjekte edilebilecek hale gelmesi için çimento şerbetine kimyasal şerbet ilave edilerek yapılan enjeksiyondur. Kimyasal enjeksiyonda reaksiyon; kullanılan farklı solüsyonların bir araya gelmesiyle başlar. Şerbetin katılaşması, partiküllerin dibe çökelmesi ve boşlukların cidarında bulunan iri kristallerle kaynaşarak karışması ile olabileceği gibi bir merhem gibi katılaşarak da çatlayabilirler. Sodyum silikat ve alüminyum sülfat maddeleri muhtelif oran ve şekillerde kullanarak çeşitli kimyasal şerbetler yapmak mümkündür. Kimyasal enjeksiyonun en çok kullanıldığı yerler; orta ve ince kumlar ile kumlu çakıllı, zayıf çimentolu, içsel sürtünme açısı (kohezyonu) son derece düşük formasyonlardır. Deniz altındaki kömür işletmeleri de yaygın olarak kullanıldığı yerlerdir (Şahinoğlu, 1987).

4.1.2.5.3.2. Dinamik kompaksiyon

Bu yöntem şahmerdan adı verilen metalden yapılmış bir ağırlığı 10 m ile 30 m arasında değişen yüksekliklerden ard arda düşürülerek darbe etkisiyle sıkıştırılması asasına dayanır. Bu amaçla iyileştirilecek zemin yüzeyi kare şeklinde alanlara bölünür ve her karenin içinde kalan alandaki zemine darbe uygulanır. Yöntem, kum zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncin arttırılmasında ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Dinamik yüklemeden dolayı zemindeki aşırı gözenek suyu basıncı kaybolduğunda zeminde ek bir sıkışma meydana gelir. Bununla birlikte zeminin içerdiği ince tane miktarı fazla ise sıkışma zorlaşır (Prakas,1981).

4.1.2.5.3.3. Vibra flotasyon

Bu yöntemde zeminin içine indirilen bir başlığın titreştirilmesiyle zeminin tane yapısı bozulmakta ve taneler bir araya gelerek zeminin sıkışması sağlanmaktadır. Uygulamada 30m kadar bir derinliğe indirilebilmekte ve kompaksiyon yönteminde olduğu gibi belirli aralıklarla sıkıştırma işlemi yapılmaktadır (Prakas,1981).

4.1.2.5.3.4. Taş kolonlar

Zemine açılan geniş çaplı deliklerin çakıl ile doldurulması bu yöntemin esasını oluşturur. Taş kolonlar vibra flotasyon tekniği ile yerleştirilebileceği gibi, metal muhafaza borularının içinden zemine dökülen çakılların üzerine şahmerdan düşürülerek de oluşturulabilir. Sıkışma işlemi yapıldıkça muhafaza borusu aşamalı olarak yüzeye çekilir (Prakas,1981).

4.1.2.5.3.5. Sıkıştırma enjeksiyonu

Bu yöntemde; su kum ve çimentonun karıştırılmasıyla elde edilen ve akıcılığı düşük (vizkos) bir karışım belirli bir basınç altında zemine enjekte edilir. Karışımın nüfuz ettiği zeminin tanelerini öteleyerek sıkıştırır ve duraylı bir zon oluşturur. Yöntemin en önemli avantajlarından biri de mevcut yapıların temellerine uygulanabilmesidir. Bu amaçla enjeksiyon işlemi yapının yan tarafından yapılabileceği eğimli delikler aracılığıyla doğrudan yapının tabanındaki zemine de uygulanabilir (Prakas,1981).

4.1.2.5.3.6. Sıvılaşacak zeminin sıvılaşmayacak bir zeminle yer değiştirilmesi

Yöntem sıvılaşma potansiyeline sahip zeminin kazılarak kaldırılması ve yerine sıvılaşma eğilimi olmayan bir zeminin konması esasına dayanır. Bu amaçla genellikle çimentoyla karıştırılmış çakıl ve kum kullanılmaktadır. Ancak yer değiştirme işlemi yapılırken kazı sevinin yıkılmadan (kaymadan) duraylı kalması önem taşır. Sıvılaşabilecek zeminin kalınlığı fazla ise yöntem ekonomik olmaz (Prakas,1981).

4.1.2.5.3.7. Drenaj teknikleri

Sıvılaşmadan kaynaklanabilecek zararları, zeminin drenaj kapasitesinin artırılmasıyla, suyun zeminden atılması, attırılması suretiylede azaltılabilmektedir. Eğer zeminin gözeneklerindeki su ortamdan uzaklaştırılabilirse deprem sırasında gelişebilecek aşırı gözenek suyu basınçları da önemli ölçüde azaltılmış olacaktır. Çakıl ve kum drenleri veya zemine yerleştirilen sentetik malzemeler (jeomembranlar) başlıca drenaj teknikleri olarak kullanılmaktadır. Çakıl ve kum türü malzemeler zeminde belirli aralıklarla düşey yönde açılmış deliklerden dökülerek çakıl veya kum drenleri oluşturulur. Buna karşın sentetik malzemeden yapılan jeomembranlar ise zemine istenen bir açıyla yerleştirilebilmektedir. Drenaj teknikleri çoğu kez yukarıda belirtilen diğer zemin iyileştirme teknikleriyle birlikte kullanılmaktadır (Prakas,1981).

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, suya doygun gevşek kum tabakalarının sıvılaşmasının, zemin ve mühendislik yapıları üzerinde yol açtığı hasarlar göz önünde tutulmuştur. Sıvılaşma sonucunda, zemin yüzeyindeki yapılar zemin içerisine batarken, zemine gömülü yapılar zemin yüzeyine çıkmaktadır. Sıvılaşma nedeni ile en şiddetli hasarların gözlendiği bölgelerde temel zemini genellikle kalın, üniform, suya doygun kum tabakalarıdır. Genellikle, suya doygun kum tabakası, deprem titreşimlerine uğradığı zaman mukavemetini kayıp ederek sıvı gibi akmakta, zemine ve varsa zemin üzerindeki yapılara hasar vermektedir. Geçmişte meydana gelen depremler bu durumun en somut örneğidir. Depremin etkisiyle oluşan sıvılaşma sonucunda zemin üzerindeki yapılar zemine batma, oturma, devrilme, yan yatma eğilimleri göstermiş bunun sonucunda çok sayıda can ve mal kayıpları meydana gelmiştir Bu bağlamda, zeminlerde sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri incelenmiş, bu potansiyelin tespiti amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen kriterler ve irdeleme yöntemleri açıklanmıştır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli tespitinde yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri incelenmiştir. Zemin sıvılaşmasının nedenleri ve zeminin yetersizlikleri, irdeleme ve analiz yöntemleriyle elde edilen verilerin yardımıyla araştırıldıktan sonra zeminin yapısıyla ilgili inceleme sonuçlarına ulaşılmaktadır. Aşağıda elde edilen bu sonuçlar sıralanmaktadır.

1. İncelenen zeminde, herhangi bir deprem veya tekrarlı yükler altında, sıvılaşmanın gerçekleşme durumu,
2. Zemin sıvılaşabilir nitelikte ise, sıvılaşmanın tekrar meydana gelebilmesi durumu,
3. İncelenen zeminde sıvılaşma meydana gelmesi durumunda, üst yapıda herhangi bir hasarın meydana gelme ihtimali

4. Oluşabilecek herhangi bir hasarı engellemek amacı ile alınması gereken önlemler.

Yukarıda belirtilen sonuçlarla, incelenen zemin için sıvılaşma potansiyeli irdelemesi tamamlanmış olur. T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın izni ile yayınlanan "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliğin zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin irdelenmesi ile ilgili hükümlere; 12.2. Zemin koşullarının belirlenmesi, 12.2.2. Sıvılaşma potansiyelinin irdelenmesi bölümlerinde yer verilmiştir. Bütün deprem bölgelerinde, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren 10 metre içinde olduğu durumlarda, (Çizelge 5.1. , Çizelge 5.2.) (D) grubuna giren zeminlerde Sıvılaşma Potansiyeli'nin bulunup bulunmadığının, saha ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve sonuçlarının belgelenmesi zorunludur.

1998 de yürürlüğe giren deprem yönetmeliğinde zemin ve temel mühendisliği ile hususlarda yapılan değişikliklerle zemin koşullarının belirlenmesi gösterilmiştir. Yönetmeliğin 12.2.2. maddesinden de anlaşılacağı üzere, Y.A.S.S 'nin zemin yüzeyinden itibaren 10 metre veya daha az derinlikte olduğu durumlarda, SPT-N, relatif sıkılık ve kayma dalgası hız değerleri verilen tabloda (Çizelge 5.1. , Çizelge 5.2.) (D) grubuna giren zeminler için irdeleme yapılmasının zorunlu olduğu belirtilmiştir. Bu zorunluluğun gerekliliği örnek alan için yapılan çalışmanın her aşaması ile doğrulanmıştır.

Yönetmeliğin, potansiyelin belirlenmesine esas basit yöntemlere ve belirleme sonrası alınacak önlemlere yer vermemiş oluşu ciddi bir eksiklik olarak yorumlanmaktadır. Öneri metin ilişikte sunulmaktadır;

"Bütün deprem bölgelerinde, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren 10 metre içinde olduğu durumlarda, (D) grubuna giren zeminler ile içerisinde su taşıyan kum ceplerinin bulunduğu B3 ve C3 grubundaki katı ve çok katı kil zeminlerde ‘Sıvılaşma Potansiyeli’ nin bulunup bulunmadığının, saha ve laboratuvar

deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve sonuçlarının belgelenmesi zorunludur.

1. Dane boyutu dağılımı yapılarak sıvılaşma potansiyeli risk eğrileri ile karşılaştırılacak.
2. Sıvılaşma potansiyeline sahip gevşek kum tabakasının derinliği belirlenerek olası bir zemin sıvılaşmasının üst yapıya etkisi irdelenecek.
3. Olası bir depremde oluşacak maksimum ivme, tekrarlı ve ortalama kayma gerilmeleri tasarlanarak (deprem bölgelerine göre) senaryo depremler üzerine sıvılaşma potansiyeli irdelemeleri yapılacaktır. " Böylelikle D grubuna giren zeminler için yapılması gereken çalışmalar belirtilmiştir.

5.2. Öneriler

Sıvılaşmanın vereceği hasarlara karşı mühendislik projelerinin güvenliğini sağlamak amacıyla, toplum hayatını olumsuz yönde etkileyen sonuçların oluşmaması için sıvılaşma ihtimali olan zemin tabakalarında, yapısal tedbirlerin alınması gerekmektedir. Sıvılaşmaya karşı zeminleri ve varsa zemin üzerindeki yapıları korumak için alınması gereken önlemleri şöyle sıralayabiliriz;

1. Sıvılaşabilir zeminin kazılması ve yeniden sıkıştırılması
2. Arazideki malzemenin sıkıştırılması
3. Enjeksiyon ve kimyasal stabilizasyonla yerinde iyileştirme yapılması
4. Çakıl ve taş drenler yapılarak, dinamik yüklerden dolayı meydana gelecek boşluk suyu basıncının kısa sürede dağıtılması
5. Yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesi için kuyular açılarak su çekme işleminin yapılması
6. Yer altı suyu seviyesinin yüzeye çok yakın olması durumunda (1-2 m kadar) kazıklı temel sistemi uygulanması

7. Binanın altındaki zeminin taşıma gücü düşük ise, yüzeysel temellerin, zeminin taşıma kapasitesi çok düşük ve sağlam zemin seviyesinin derin olduğu durumlarda derin temellerin uygulanması,
8. Binaların altındaki zeminlerin dayanımı zayıf ise, kazıklarla sıkıştırılması
9. Bina temelini sıvılaşabilecek zeminin altındaki sağlam zemine oturtulması
10. Binanın altına ağır ve kalın bir bodrum yapılması

KAYNAKLAR

ARIOĞLU, E., ARIOĞLU, N., YILMAZ, A.O., ve GİRGİN, C., 2000. Deprem ve Kurtarma İlkeleri, 74s.

ATEŞ, A., 2003. Zeminlerin Sıvılaşması ve Sıvılaşma Metodlarının İrdelenmesi.Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 102s.

AYDAN, Ö., ve HASGÜR, Z., 1997. Türkiye Depremlerinin İvme Dalgalarının Özellikleri. 4. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, s.30-37.

AYDAN, Ö., ve KUMSAR, H., 1997. Yeni Bir Sıvılaşma Tahmin Yöntemi ve Uygulamaları. İzmir ve Çevresinin Jeoteknik Sorunları Sempozyumu, İzmir, s.1-10.

AYDAN, Ö., ULUSAY, R., KUMSAR, H., SÖNMEZ, H., and TUNCAY, E., 1998. A Site Investigation of Adana-Ceyhan Earthquake of June 27, 1998. Turkish Earthquake Foundation, 133p.

BAKIR, B. S., ve YILMAZ, T., 2000. Depremlerin Sismik Özellikleri, Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası-ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, s.51-83.

BAYKAL, G., ve BALCI, M., 2000. Sıvılaşma Sırasında Zemin Tarafından Tüketilen Enerji ve Bunun Yapıya Etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s.417-426.

BAYÜLKE, N., 1989. Depremler ve Depreme Dayanıklı BetonarmeYapılar. T.C İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara, 83s.

CELEP, Z., ve KUMBASAR, N., 1998. Betonarme Yapılar, İstanbul, s.440 - 461.

CELEP, Z., ve KUMBASAR, N., 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul, s.4-12.

CASTRO, G., and POULOS, S. J., 1977. Factors Affecting Liquecfaction and Cyclic Mobility,Journal of the Geotechnical Engineering, 103p.

ÇETİN, K.Ö., 2001. 1.Prof İsmet Özdemir Konferansı ve Geoteknik Deprem Mühendisliği Semineri. ODTÜ, Ankara, s.4-27.

DAS, B. M., 1993. Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston, USA, 453p.

DEMİRTAŞ, R., ve ERKMEN, C., 2001. Afet ve Afet İşleri Genel Müdürlüğü Eğitim-Haber-Bilim Dergisi, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, s.19-24.

DOBRY, R., STOKOE, K. H., LADD. R.S., and YOUND, T. L.,1981 Liquefaction Susceptibility From S-vvave Velocity, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri, October 26- 31, pp.81-544.

DOWRİCK, D. J., 1975. Earthquake Resistant Design, John Wiley and Sons, 135p.

DURGUNOĞLU, H. T., KARADAYILAR, T., BRAY, J.D., SANCİO, R. B., ve HACIALİOĞLU, E., 2000. Sismik Statik Penetrasyon Deneyi (SCPT) ile Geoteknik Geodinamik Zemin Profili, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s.383-389.

ELE, 2006. http: // www. Ele. Com (02. 02. 2006 erişildi).
ERKEN, A., YILDIRIM, H., SAVAR, T., KILIÇ, C., ve ANSAL, A., 1985 Erzincan Ekşisu'da Siltli Zeminlerin Dinamik Davranışı, Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, s.85-89.
ERKEN, A., ve ANSAL, A.M., 1994, Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands, Perfbrmance of Ground and Soil Structure Durmg Earthquakes, 3th int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng, pp.165-175.
HARDİN, B.O., and DRNEVICH, V.P., 1972. Shear Modulus and - Damping in Soils: Design Equations and Curves, Journal of Soil Mechanîcs and Foundations Division, 98p.
ISHIHARA, K., 1980, Subsurface Soil Liquefaction During Earthquakes in Japan University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, pp.184-192.
ISHIHARA, K., 1985. Stability of Natural Deposit During Earthquakes. 11 th İCSMFE San Francisco, pp. 2:321-376.
ISHIHARA, K.,1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Clarendon Press, Oxford, pp. 208-344.
IWASAKI, T., ARAKOWA, T., and TOKİDA, K. I., 1984. Simplified Procedures For Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes, Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 3: 49-58.
LIAO, S.S.C., and WHITMAN, R.V., 1986. Overburden Correction Factor For SPT in Sand .Journal of Geotechnical Engineering, 3: 373-377.
LİYANAPATHİRANA, D.S., and POULOS, H.G., 2003. Assesment of Liquefaction Incorporating Earthquake Characteristics. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , pp. 867-875.
KAYABALI, K., ÜNSAL, N., ve KARAYILANOĞLU, Z.,1995. Gümüşova – Gerede Otoyolu Boyunca Seçilmiş Lokasyonlarda Sıvılaşma Potansiyeli Analizi.Üçüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, s. 645-650.
KRAMER, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hail, New Jersey, pp. 348-423 .
KURU, T., 2001. Adana - Ceyhan Depreminde Alüvyal Zeminlerin Sıvılaşma Davranışı ve Yapısal Hasarlar Üzerindeki Etkisinin. Değerlendirilmesi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 127s.
MUTLU, A.H., 2001. Arazi ve Laboratuar Deneyleri İle Zemin Sıvılaşma Lisans Potansiyellerinin İrdelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Tezi, Ankara, 84s.
ÖNALP, A., 1997. Zeminler ve Mekaniği. Sakarya Üniversitesi, Yayın No: 27. Sakarya, 387s.
ÖZAYDIN, K., 1996. Yer Hareketleri Üzerinde Yerel Zemin Koşullarının Etkisi ve Zemin Büyütmesi. Türkiye Deprem Vakfı Yayınları, İstanbul, 24s.
ÖZBAYOĞLU, F., MOLLAMAHMUTOĞLU, M., 1987. Elektro Osmoz Yöntemi ile Zeminlerin Stabilizasyonu, DSİ Jeoteknik Seminer Cilt I, İstanbul, s.123-124.
PINAR, N., ve LAHN, E., 1952. Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu, Bayındırlık Bakanlığı, Yapı ve İmar İşleri Başkanlığı, Ankara, 36s.
PRAKASH, S., 1981, Liquefaction of Soils: Soils Dynamics, McGraw-Hill Book Company, Chapter 8, 339p.

SEED, H.B., 1976. Evaluation of Soil Liquefaction Potential During Earthquakes, Report No. EERC 75-28, Earthquake Eng. Research Center, University of California, pp. 1-105.

SEED, H.B., 1979. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Dîvision, 255p.

SEED, H.B., and IDRISS, I.M., 1981. Evaluation of Liquefaction Potential Sand Deposits Based on Observation of Performance in Previous Earthquakes. 544p.

SEED, H.B., and IDRISS, I. M., 1982. Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquake Engineering Research Insititute Monograph Series,134p.

SEED, H.B., and DeALBA, P., 1986.Use of SPT and CPT Tests for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands in Use of In-situ Test İN Geotechnical Engineering. Geotechnical Special Publication, 302p.

SOYDEMİR, Ç., ve ÖZKAN, M.Y., 1981. Gevşek Kumlu Zeminlerin Sıvılaşma Yönünden Değerlendirilmesi, Türkiye İçin Bir Taslak Şartname Önerisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Birinci Kongresi, s.177 -187.

SUCUOĞLU, H., 2000. Depremlerin Sismik Özellikleri, Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası-ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, s.17-33.

ŞAHİNOĞLU, C., 1987 Enjeksiyon Üzerine Teorik ve Pratik Bilgiler, DSİ Jeoteknik Seminer, İstanbul, 1: 66-67.

TABAN, A., ve GENCEOĞLU, S., 1975. Deprem ve Parametreleri. T.C. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara, 83s.

TARHAN, F., 1989. Mühendislik Jeolojisi Prensipleri.Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Yayın No:41, Trabzon, s.149-152.

TEZCAN, S. S., and TERI, L., 1996. Shear Wave Propagation and Liquefaction in Layered Soils, Türkiye Deprem V akfı Yayınları , İstanbul, 96s.

ULUSAY, R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:38, Genişletilmiş 4. Baskı, Ankara, 188:270-275.

ULUSAY, R., AYDAN, Ö., KUMSAR. H., and SÖNMEZ, H., 2000. Engineering Geological Characteristics of the 1998 Adana-Ceyhan Earthquake. With Particular Emphasis on Liquefaction Phenomena and the Röle of Soil Behaviour. Bulletin of Eneineerine Geology and the Environment, 59:99-118.

UZUNER, B.A., 1998. Temel Zemin Mekaniği.Mühendislik Mimarlık Yayınları, Ders Kitabı, Ankara, 367s.

YASUDA, S., TERAUCHI, T., ALTUN,S., ve ERKEN, A., 2000. Burulmalı Dinamik Deney Sistemiyle Sıvılaşma Deneyleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s.584-591.

YOUD. T. L., 1984. Gieologie Effect-Liquefactionon and Associated Ground Failure. Proeeedings. Gieologie and Hydrologic Hazards Training Program Open File Report. Geological Survey. Menlo Park. California. pp. 210-232.

WANG, J.G.Z.O., and LAW, K.T., 1994. Siting in Earthquake Zones, A.A.Balkcma/Rotlerdam/Brookfield, pp. 70-89.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Gaziantep'te doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Gaziantep'te tamamladı. 1996 yılında Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2001 yılında bu bölümden mezun oldu. Evli ve bir çocuk annesidir.

EKLER

EK: 1 Çizelge 5.1. Deprem şartnamesi zemin grupları

Zemin Gurub	Zemin Grubu Tanımı	Stand. Penetr.	Relatif Sıkılık	Serbest Basınç	Kayma Dalgası
(A)	l. Masif volkanik kayaçlar ve ayrışmamış sağlam metamorfik kayaçlar, sen çimentolu tortul kayaçlar....	—	—	> 1000	> 1000
	2. Çok sıkı kum, çakıl.....	> 50	85-100	—	> 700
	3. Sert kil ve siltli kil.....	> 32	—	>400	> 700
(B)	l. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayaçlar.....	—	—	500-1000	700-1000
	2. Sıkı kum, çakıl.....	30-50	65-85	—	400-700
	3. Çok katı kil ve siltli kil...	16-32	—	200-400	300-700
(C)	l. Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar.....	—	—	<500	400-700
	2. Orta sıkı kum, çakıl.....	10-30	35-65	—	200-400
	3. Katı kil ve siltli kil.....	8-16	—	100-200	200-300
(D)	l. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları.....	—	—	—	<200
	2. Gevşek kum.....	< 10	<35	—	<200
	3. Yumuşak kil, siitli kil.....	< 8	—	<100	< 200

EK: 2

Çizelge 5.2. Yerel zemin sınıfları

Yerel zemin Sınıfı	Çizelge 5.1.' e göre zemin grubu ve üst zemin tabakası kalınlığı (h_1)
Z I	(A) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (B) grubu zeminler
Z2	$h_1 > 15$ m olan (B) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (C) grubu zeminler
Z3	15 m < h 50≤ m olan (C) grubu zeminler $h_1 \leq 10$ m olan (D) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 > 10$ m olan (D) grubu zeminler

ÖZET

Sıvılaşma kavramı dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremlerin etkisi sonucu gözlenmiştir. Zeminin kayma dayanımını kaybetmesi sonucu küçük kayma gerilmeleri büyük deformasyonlara yol açmakta bu durum zemin üzerindeki yapılarda ağır hasarları meydana getirmektedir. Bu bağlamda, sıvılaşmış ve sıvılaşma meydana gelebilecek zeminin durumu incelenmiştir.

Zemin sıvılaşması ve sıvılaşma potansiyeli tahmininde kullanılan fiziki kriterlerle, analiz metodlarıyla (arazi ve laboratuar deneyleriyle) ve irdeleme yöntemleriyle incelenmiştir.

Depremlerin ve deprem parametrelerinin sıvılaşmaya etkileri incelenmiş, Adapazarı Depreminde, Adana-Ceyhan Depreminde ve Erzincan Depreminde meydana gelen zemin sıvılaşmaları ve etkileri değerlendirilmiştir.
Sıvılaşmanın en büyük yıkıcı etkisi, ülkemizde Adapazarı Depreminde (17 Ağustos 1999) meydana gelmiş, bu durum sıvılaşmanın önemini bir kez daha vurgulamıştır.

Bu çalışmada, sıvılaşmanın olumsuz etkilerinden korunmak için alınması gereken önlemler detaylı bir şekilde incelenmiş, sıvılaşmış zeminlerin iyileştirme yöntemleri ve çözüm önerileri sunulmuştur.

SUMMARY

The liquefaction were observed with effect of sismic shock that occured throughout the world and in our country. As a result of cause of shearing strength of the soil, small shear stres caused big deformations and hazards in the buildings. Therefore the proporties of liquefied soils and those which can be subjected to liquefaction were throughly examined.

Liquefaction of the soils were investigated with liquefaction phsysical criteria potential and analyses methods (in stu and laboratory tests) which are used for probable liquefaction potential and research methods.In this context, soil failures, liquefaction areas, liquefied bad thickness, sand and silt compression potential were studied.

Sismic activities, the effect of liquefaction on earthquake parameters and soil liquefaction and it's effects tothe Adapazarı (17 Ağustos 1999) Adana-Ceyhan, Erzincan earthquakes were discussed.

The most devastating earthquake caused by liquefaction took place at Adapazarı which emphasized importance of liquefaction. The measures to be taken against and to prevent liquefaction were discussed in detail.

In this study, a general evaluation of the liquefaction potential was carried out, the condition of the ground and / or soil after liquefaction and was discussed with possible improvement methods and solutions.