

**SIVILAŞMA POTANSİYELİ DEĞERLENDİRMELERİ VE  
SIVILAŞMA ANALİZİ KRİTERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Emrah KÖLEOĞLU  
Enstitü No : 501991255**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002  
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Oğuz TAN**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)**  
**Doç.Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü.)**

**MAYIS 2002**



## ÖNSÖZ

Zeminler diğer inşaat mühendisliği malzemelerine göre oldukça farklı özelliklere sahip, dış etkiler altındaki davranışlarının anlaşılması zor olan malzemelerdir. Zemin-su ilişkileri ile boşluk suyu basınçları ve efektif gerilme kavramı iyi incelenmesi gereken konulardır.

Depremler sırasında zeminlerin davranışının önceden tahmin edilmesi can ve mal güvenliği açısından oldukça önemlidir. Geoteknik Mühendisliği açısından sıvılaşma, depremlerin neden olduğu en önemli ve karmaşık konulardan birisidir. Özellikle 1964 yılında Alaska ve Niigata depremlerinde, sıvılaşmadan kaynaklanan geniş çaplı hasarların meydana gelmesi, araştırmacıların ilgisini bu konuya çekmiştir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin tespiti amacıyla çeşitli ampirik yaklaşımlar önerilmiştir. 17 Ağustos 1999 Depremi'nde Adapazarı kent merkezinde belirgin olarak görülen sıvılaşma etkileri, ülkemizde de bu konuya verilen önemin artmasına neden olmuştur. Yapıların inşasından önce yapılması istenen zemin etütlerinde, gerekli durumlarda, zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, uygun sıvılaşma analizi kriterleri yardımıyla tespit edilmelidir.

Bu tez çalışmasının her aşamasında değerli fikir ve görüşlerinden yararlandığım tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Oğuz TAN'a teşekkür ederim. Çalışma kapsamında kullanılan sondajlara ulaşılmasındaki yardımlarından dolayı Adapazarı Büyükşehir Belediyesi Planlama Müdürlüğü'nden Jeoloji Müh. Hasan Kılıç'a ve Avrasya Zemin Mühendislik Müşavirlik İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti. çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim.

Mayıs, 2002

Emrah KÖLEOĞLU

## İÇİNDEKİLER

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>KISALTMALAR</b>                                                         | <b>v</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                       | <b>vi</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                       | <b>vii</b> |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                      | <b>ix</b>  |
| <b>ÖZET</b>                                                                | <b>x</b>   |
| <b>SUMMARY</b>                                                             | <b>xi</b>  |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                            | <b>1</b>   |
| 1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı                                             | 1          |
| <b>2. ZEMİNLERİN SIVILAŞMASI</b>                                           | <b>3</b>   |
| 2.1. Tanımlar                                                              | 3          |
| 2.2. Boşluk Suyu Basıncı Artış Mekanizması                                 | 4          |
| 2.3. Sıvılaşmanın Mekanizması                                              | 6          |
| 2.4. Suyu Doygun Kumlarda Sıvılaşma ve Çevrimsel Hareketlilik              | 9          |
| <b>2.5. Sıvılaşma Potansiyelini Etkileyen Faktörler ve Limit Değerleri</b> | <b>10</b>  |
| 2.5.1. Sıvılaşmaya Yol Açan Deprem Eşik Şiddeti                            | 10         |
| 2.5.2. Maksimum Odak Uzaklığı                                              | 10         |
| 2.5.3. Sıvılaşabilir Zeminin Maksimum Derinliği                            | 11         |
| 2.5.4. Yeraltı Suyu Seviyesinin Maksimum Derinliği                         | 11         |
| 2.5.5. Zemin Özellikleri                                                   | 11         |
| 2.5.5.1. Relatif Sıkılık                                                   | 11         |
| 2.5.5.2. İnce Dane Oranı ve Plastisite                                     | 14         |
| 2.5.5.3. Sismik Geçmişin Etkisi                                            | 19         |
| 2.5.5.4. Yatay Toprak Basıncı ve Aşırı Konsolidasyon Oranı                 | 21         |
| 2.5.5.5. Kumların Fiziksel Özelliklerin Etkisi                             | 22         |
| <b>2.6. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri</b>                        | <b>23</b>  |
| 2.6.1. Laboratuvar Deneyleri                                               | 23         |
| 2.6.1.1. Dinamik Üç Eksenli Deney                                          | 23         |
| 2.6.1.2. Dinamik Basit Kesme Deneyi                                        | 24         |
| 2.6.1.3. Burulmalı Dinamik Deney Sistemi                                   | 25         |
| 2.6.1.4. Geniş Ölçekli Basit Kesme Deneyi                                  | 26         |
| 2.6.1.5. Laboratuvar Deneyleri İçin Alınan Örneklerle İlgili Sınırlamalar  | 27         |
| 2.6.2. Arazi Deneyleri                                                     | 27         |
| 2.6.2.1. Standart Penetrasyon Deneyi                                       | 28         |
| 2.6.2.2. Koni Penetrasyon Deneyi                                           | 31         |
| 2.6.2.3. Sismik Statik Koni Penetrasyon Deneyi                             | 32         |

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.7. Zeminlerde Sıvılaşma Analizi Kriterleri</b>                                                    | <b>33</b> |
| 2.7.1. Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri                                                               | 34        |
| 2.7.2. Eşik İvme Kriteri                                                                               | 36        |
| 2.7.3. Sıvılaşma İndeksi Kriteri                                                                       | 38        |
| 2.7.4. Çin Milli Kodu                                                                                  | 39        |
| 2.7.5. Enerji Metodu                                                                                   | 39        |
| 2.7.6. Deprem Büyüklüğü Kriteri                                                                        | 40        |
| <b>2.8. Sıvılaşma Şiddetinin Tahmini</b>                                                               | <b>40</b> |
| <b>2.9. Sıvılaşmanın Deprem Hasarlarına İki Değişik Etkisi</b>                                         | <b>41</b> |
| 2.9.1. Tarihi Veriler                                                                                  | 41        |
| 2.9.2. Kavramsal Açıklama                                                                              | 42        |
| <b>2.10. Sıvılaşmaya Karşı Alınabilecek Önlemler</b>                                                   | <b>43</b> |
| <b>3. 17 AĞUSTOS 1999 DEPREMİ VE ADAPAZARI KENT MERKEZİNİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ DEĞERLENDİRMELERİ</b> | <b>44</b> |
| <b>3.1. 17 Ağustos 1999 Depremi</b>                                                                    | <b>44</b> |
| 3.1.1. Genel Değerlendirme                                                                             | 44        |
| 3.1.2. Zemin ve Temel Mühendisliği Değerlendirmeleri                                                   | 47        |
| <b>3.2. Adapazarı Bölgesinin Jeolojisi ve Jeomorfolojisi</b>                                           | <b>49</b> |
| <b>3.3. 17 Ağustos 1999 Depremi Sonrası Adapazarı Kentinde Geoteknik Gözlem ve Değerlendirmeler</b>    | <b>51</b> |
| <b>3.4. Zemin Büyütmesi ve Adapazarı'nda Yapısal Hasarlara Etkisi</b>                                  | <b>61</b> |
| 3.4.1. Mikrobölgelemenin Tanımı ve Önemi                                                               | 61        |
| 3.4.2. Adapazarı'ndaki Alüvyon Zeminlerde Yüzey Hareketine İlişkin Çalışmalar                          | 62        |
| <b>3.5. Yeni Deprem Yönetmeliğinde Sıvılaşma İle İlgili Hüküm ve Bilgiler</b>                          | <b>66</b> |
| <b>3.6. Sıvılaşma Kriterleri İle Adapazarı Kent Merkezinin Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri</b> | <b>67</b> |
| 3.6.1. Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri                                                               | 68        |
| 3.6.2. Eşik İvme Kriteri                                                                               | 68        |
| 3.6.3. Sıvılaşma İndeksi Kriteri                                                                       | 69        |
| 3.6.4. Çin Milli Kodu                                                                                  | 69        |
| 3.6.5. Enerji Metodu                                                                                   | 70        |
| 3.6.6. Deprem Büyüklüğü Kriteri                                                                        | 70        |
| <b>3.7. Sonuçlar</b>                                                                                   | <b>71</b> |
| <b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>                                                                         | <b>77</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                                                       | <b>84</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                                                        | <b>87</b> |

## **KISALTMALAR**

|             |                                                |
|-------------|------------------------------------------------|
| <b>SPT</b>  | : Standart Penetrasyon Deneyi                  |
| <b>N</b>    | : SPT Deneyi Darbe Sayısı                      |
| <b>CPT</b>  | : Koni Penetrasyon Deneyi                      |
| <b>SCPT</b> | : Sismik Koni Penetrasyon Deneyi               |
| <b>UU</b>   | : Konsolidasyonsuz Drenajsız                   |
| <b>AKO</b>  | : Aşırı Konsolidasyon Oranı                    |
| <b>ER</b>   | : Enerji Oranı                                 |
| <b>CSR</b>  | : Tekrarlı Gerilme Oranı (Cyclic Stress Ratio) |
| <b>FC</b>   | : İnce Dane Oranı (Fines Content)              |
| <b>N</b>    | : Kuzey (North)                                |
| <b>E</b>    | : Doğu (East)                                  |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                   | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Relatif sıkılığa bağlı olarak sınıflama potansiyeli.....                                        | 11              |
| <b>Tablo 2.2.</b> SPT-N değerleri ile relatif sıkılık ve yerleşim sıkılığı sınıflaması.                           | 30              |
| <b>Tablo 2.3.</b> SPT-N değerleri ile kıvam ve serbest dayanımları sınıflaması                                    | 31              |
| <b>Tablo 2.4.</b> Tasarım deprem şiddetine göre verilen $p_{so}$ .....                                            | 32              |
| <b>Tablo 2.5.</b> SPT - N ile kayma dalgası hızı arasındaki ampirik bağıntılar.....                               | 37              |
| <b>Tablo 2.6.</b> Kayma dalgası hızının kritik değerlerinin deprem şiddeti ile değişimi.....                      | 38              |
| <b>Tablo 2.7.</b> $N_o$ değerinin belirlenmesi.....                                                               | 39              |
| <b>Tablo 2.8.</b> Sınıflama şiddeti.....                                                                          | 41              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Zemin grupları.....                                                                             | 66              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Yerel zemin sınıfları.....                                                                      | 66              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Adapazarı'nda mahallere göre zeminlerin sınıflama potansiyelleri.....                           | 72              |
| <b>Tablo 4.1.</b> Adapazarı'nda sınıflama gözlenen bölgedeki sondajlar ve kriterlerin analiz sonuçları.....       | 79              |
| <b>Tablo 4.2.</b> Adapazarı'nda sınıflama gözlemlenmeyen bölgedeki sondajlar ve kriterlerin analiz sonuçları..... | 79              |
| <b>Tablo 4.3.</b> Zeminlerde sınıflama analizi kriterlerinin karşılaştırılması.....                               | 81              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                               | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1 : Tekrarlı üç eksenli yükleme kademeleri için gerilme durumları..                                                                   | 7               |
| Şekil 2.2 : Tekrarlı üç eksenli deneyde eksenel uzama ve boşluk suyu basıncı artışı.....                                                      | 8               |
| Şekil 2.3 : Başlangıç relatif sıkılığın sıvılaşmaya etkisi.....                                                                               | 12              |
| Şekil 2.4 : Relatif sıkılığın oluşacak boşluk suyu basınçlarına etkisi .....                                                                  | 12              |
| Şekil 2.5 : Relatif sıkılığın sıvılaşmaya ve birim kaymalara etkisi.....                                                                      | 13              |
| Şekil 2.6 : Sıvılaşma gözlenmiş zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri.....                                                                    | 14              |
| Şekil 2.7 : Plastik ince danelerin sıvılaşmaya etkisi.....                                                                                    | 15              |
| Şekil 2.8 : Düşük plastisiteli siltli kumlarda $N=10$ ve $N=30$ çevrimlerinde boşluk suyu basıncı oranı ile eksenel deformasyonların değişimi | 16              |
| Şekil 2.9 : Örselenmemiş kumlu zeminlerde ince dane oranının sıvılaşmaya etkisi.....                                                          | 17              |
| Şekil 2.10 : Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi.....                                                                                            | 17              |
| Şekil 2.11 : Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi.....                                                                                            | 18              |
| Şekil 2.12 : Tekrarlı gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi.....                                                                               | 19              |
| Şekil 2.13 : Sismik geçmişin sıvılaşmaya etkisi.....                                                                                          | 20              |
| Şekil 2.14 : Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşmaya etkisi.....                                                                        | 21              |
| Şekil 2.15 : Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşmaya etkisi.....                                                                             | 22              |
| Şekil 2.16 : Periyodik sınır gerilmesi değerleri.....                                                                                         | 34              |
| Şekil 3.1 : 17 Ağustos 1999 depreminde kırılan fay, ana şok ve artçı şoklar                                                                   | 45              |
| Şekil 3.2 : 17 Ağustos 1999 depremi Sakarya istasyonu ivme kaydı.....                                                                         | 46              |
| Şekil 3.3 : Adapazarı'nın morfolojik görünümü.....                                                                                            | 50              |
| Şekil 3.4 : Adapazarı'nda sıvılaşma sonucu devrilmiş, geriye yatmış ve zemine oturmuş binalara tipik örnekler.....                            | 52              |
| Şekil 3.5 : Adapazarı'nda eğilme formunda aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış binalar.....                                                | 53              |
| Şekil 3.6 : Adapazarı'nda oturma formunda aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış bir bina.....                                               | 53              |
| Şekil 3.7 : Adapazarı'nda eğilme deformasyonu sonucunda bir bölümü açıkta kalan radye temel.....                                              | 55              |
| Şekil 3.8 : Bitişik nizam bloklarda meydana gelen oturmalar.....                                                                              | 55              |
| Şekil 3.9 : Adapazarı'nda sıvılaşmaya bağlı tipik kum kaynamaları.....                                                                        | 56              |
| Şekil 3.10 : Adapazarı Çark Caddesi civarında bir sokak boyunca yüzeye fıskırmış silt ve ince kum öbekleri.....                               | 57              |
| Şekil 3.11 : Zemin deformasyonlarına bağlı olarak yol ve kaldırımlarda meydana gelen kabarmalar.....                                          | 57              |
| Şekil 3.12 : Sıvılaşma nedeniyle zemine gömülen binaların çevresindeki kabarma.....                                                           | 58              |
| Şekil 3.13 : Adapazarı'nda kazık temel üzerine oturan hasarsız yapılara bir örnek.....                                                        | 58              |
| Şekil 3.14 : Sapanca Gölü'nün doğu sahilinde sıvılaşmaya bağlı oturmalar...                                                                   | 59              |

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.15</b> : Sapanca Gölü'nün doğu sahilinde yüzey çatlakları ve kum fişkırmaları.....                                                                              | 59 |
| <b>Şekil 3.16</b> : 17 Ağustos Depreminin etkilediği bölgede değişik lokasyonlarda sıvılaştıran zeminlere ait tipik tane boyu dağılım eğrileri ve sıvılaşma sınırları..... | 60 |
| <b>Şekil 3.17</b> : Analizler sonucu farklı alüvyon kalınlıkları için elde edilen yüzey hareketlerinin ivme-zaman grafikleri.....                                          | 63 |
| <b>Şekil 3.18</b> : Farklı alüvyon kalınlıkları için hesaplanan büyütme oranları.....                                                                                      | 64 |
| <b>Şekil 3.19</b> : Adapazarı'nda alınan yüzey kaydının ve farklı kalınlıklardaki alüvyon zeminler için hesaplanan yüzey hareketlerinin spektral ivme grafikleri.....      | 65 |
| <b>Şekil 3.20</b> : Yüzeyde zemin hareketlerinin aşırı büyümesi sonucunda yol kaplamaları ve kaldırımlarda meydana gelen yoğun çatlamlar...                                | 65 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                                |                                                           |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $M_s$                          | : Yüzey dalgası büyüklüğü                                 |
| $M_w$                          | : Moment büyüklüğü                                        |
| $I$                            | : Deprem şiddeti                                          |
| $a_{max}$                      | : En büyük yatay ivme                                     |
| $a_t$                          | : Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli eşik ivmesi |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | : Asal gerilmeler                                         |
| $\sigma_c$                     | : Hücre basıncı                                           |
| $\sigma_v$                     | : Toplam düşey basınç                                     |
| $\sigma_v'$                    | : Efektif düşey basınç                                    |
| $u$                            | : Boşluk suyu basıncı                                     |
| $D_r$                          | : Relatif sıkılık                                         |
| $I_p$                          | : Plastisite indisi                                       |
| $V_d$                          | : Hacim değiştirme potansiyeli                            |
| $N_c$                          | : Ön sıvılaşma çevrim sayısı                              |
| $K_o$                          | : Sukunetteki yatay toprak basıncı katsayısı              |
| $d_{50}$                       | : Ortalama dene boyutu                                    |
| $r_d$                          | : Zemin tabakası derinliği için düzeltme faktörü          |
| $C_N$                          | : Jeolojik gerilme düzeltmesi                             |
| $p_{so}$                       | : Kritik Penetrasyon Dayanımı                             |
| $V_s$                          | : Kayma dalgası hızı                                      |
| $V'_{s, cri}$                  | : Kayma dalgası hızının kritik değeri                     |
| $\tau_s$                       | : Sıvılaşma için gerekli yatay kayma gerilmesi            |
| $\tau_o$                       | : Ortalama kayma gerilmesi                                |
| $D_L$                          | : Sıvılaşma derecesi                                      |
| $G$                            | : Kayma modülü                                            |

## **SIVILAŞMA POTANSİYELİ DEĞERLENDİRMELERİ VE SIVILAŞMA ANALİZİ KRİTERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

### **ÖZET**

17 Ağustos 1999 Depremi'nde de görüldüğü gibi zemin mukavemetindeki azalma veya mukavemetin tamamen ortadan kalkması, toprak kayması, yapıların oturması, yan yatması, devrilmesi gibi değişik hasarlar meydana getirmektedir. Suya doymuş, kumlu ve siltli zemin tabakalarında depremler sırasında meydana gelen sıvılaşma olayının bu hasarların sebebi olabileceği düşünülmüş, böylece sıvılaşmanın mekanizması ve etkileri incelenmeye başlanmıştır.

Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri ve sıvılaşma analizi kriterlerinin karşılaştırılmasını konu alan bu tez çalışmasında, birçok araştırmacının çalışmaları incelenmiş ve derlenen bilgiler yardımıyla sıvılaşma potansiyelini etkileyen faktörler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen sıvılaşma analizi kriterleri, 17 Ağustos 1999 Depremi sırasında yer yer sıvılaşma vakalarının görüldüğü Adapazarı'nın değişik semtlerinde yapılmış olan sondajlara uygulanmıştır. Kent merkezinde sıvılaşma sonucu hasar gören yapılar yerinde tespit edilmeye çalışılmış, bu tespitler ve mevcut sondajlar bir krokiye işlenerek karşılaştırma yapılmıştır. Böylece sıvılaşma analizi kriterlerinin arazideki gözlemlere uygunluğu ve bu kriterlerin kendi aralarındaki uyumu incelenmiştir.

Yapıların inşasından önce yapılması öngörülen zemin etütlerinin önemi, üst yapısı zarar görmeyen binalardaki hasar sebepleri incelenerek bir kez daha ortaya konmuştur. Ayrıca bu etütlerin kapsamının, yerel zemin koşulları dikkate alınarak belirlenmesi gerektiği görülmektedir. Büyük bölümü deprem riski taşıyan ülkemizde, dinamik etkiler karşısında zemin davranışlarının önceden bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

## **EVALUATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL AND COMPARISON OF LIQUEFACTION CRITERIA**

### **SUMMARY**

Decrease in the soil strength or completely loss of soil strength, bring into existence of some damages like landslides, structures to sink in soil, lie down or fall over as observed during the earthquake in August 17, 1999. liquefaction that can occur in saturated sand and silty soil layers during earthquakes is considered as the reason of these damages. Therefore the mechanism and affects of liquefaction phenomena were started to examine.

In the scope of this study, which is mainly targeting the subject of liquefaction potential evaluations and the comparisons in the liquefaction criteria, studies of various scientists are reviewed in order to illuminate the event of liquefaction due to the acquired information from these past studies. The facts that mainly affecting the liquefaction potential are summarized in detail, particularly, it is focused on the subject of liquefaction potential due to the type of the soil under various conditions. The criteria, which are proposed to determine the liquefaction potential by various scientists, are applied to the boreholes in various districts of Adapazarı where partially liquefaction incidents were occurred during the earthquake in August 17<sup>th</sup>, 1999. It is proposed to determine the damaged buildings in the city center, these determinations and the present boreholes are marked on a certain plan in order to make a comparison. As a result, the compliance and the internal harmony of the liquefaction analysis criteria with the observations on site are reviewed.

Investigations on the structurally undamaged buildings put forward the importance of soil researches. Also it is clear to determine the range of these soil researches through the local soil conditions. It is important to recognize the soil behaviour in our country where is mostly under risk of earthquakes.

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Sıvılaşma, geoteknik mühendisliğinin en önemli, ilginç, karmaşık ve tartışmaya açık konularından biridir. 1964 yılında üç ay içinde meydana gelen Alaska ( $M_w=9.2$ ) ve Niigata ( $M_s=7.5$ ) depremlerinde sıvılaşmadan kaynaklanan büyük yıkımlar, geoteknik mühendislerinin bu konuya olan ilgilerini 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.

Daha sonraki yıllarda sıvılaşmadan kaynaklanan hasarların önemli derecede olmasından dolayı 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 inşasından önce yapılan temel zemini etüdlerinde, arazideki temel zeminini oluşturan tabakaların muhtemel bir deprem sırasında göstereceği davranışın da incelenmesi gerekli olmaktadır.

Depremeler sırasında gözlenen yapısal hasar, zemin yüzünde büyük deplasmanlara yol açan toptan zemin göçmelerinin sonucu olursa, meydana gelen yapısal hasar ile yerel zemin koşulları arasındaki ilişki açık olarak görülebilir. Örneğin, gevşek yerleşimli daneli zeminler yer sarsıntıları sonucu sıkışarak zemin yüzünde büyük toplam ve farklı oturmalara ve böylece taşıdıkları yapılarda büyük hasarlara yol açabilirler.

Gevşek yerleşimli, daneli zemin tabakalarının suya doygun olması halinde ise titreşimlerin yol açtığı sıkışma sonucu boşluk suyundaki hidrostatik basınç artışı zeminin sıvılaşmasına ve üzerindeki yapıların oturmasına, yatmasına veya zemin içine batmasına neden olabilir. Depremeler sırasında zeminlerde oluşan dinamik gerilmeler ve boşluk suyu basıncı artışlarının siltli kum tabakalarında büyük toprak kaymalarına ve şev göçmelerine de yol açtıkları gözlenmiştir.

Depremelerde gözlenen yapısal hasarlara zemin koşullarının etkisi yönünden daha az açık olan bir etki, zeminde hiçbir göçme olmadığı halde zemin koşullarının yapılara etkileyen sarsıntı şiddetine ve dolayısıyla üzerindeki yapıların göreceği hasara yaptığı etkidir. Yerel zemin koşulları, deprem sırasında yapılara etkileyen yer ivmesinin genliğini, frekans özelliklerini ve buna bağlı olarak atalet kuvvetlerini büyük ölçüde etkilemektedir.

Sıvılaşmanın insan hayatına ve ekonomiye olan olumsuz etkilerinden dolayı bu konuda yapılan araştırmalar günden güne artmakta ve gittikçe önem kazanmaktadır. 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, sıvılaşma konusunda genel bilgiler verilmiş, sıvılaşma analizleri için önerilen kriterler incelenmiş ve bu kriterler çerçevesinde aktif deprem bölgesi içerisindeki Adapazarı Kenti zemininde yer alan alüvyonal birimlerin sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise yapılan analizler kendi içlerinde değerlendirilerek sıvılaşma potansiyeli yüksek kesimler tespit edilmiş ve 17 Ağustos 1999 Depremi sonrası Adapazarı'nda yapılan gözlemlerle karşılaştırılmıştır.

## 2. ZEMİNLERİN SIVILAŞMASI

### 2.1. Tanımlar

Mogami ve Kubo (1953) tarafından isimlendirilmiş olan sıvılaşma (liquefaction) terimi, suya doygun kohezyonsuz zeminlerin drenajsız koşullarda statik, geçici veya tekrarlı şekillerde örselenmesiyle oluşan birtakım zemin deformasyonlarını ifade etmek için kullanılmıştır (Kramer, 1996). Konuyla ilgili şu tanımlar yapılabilir:

a) Sıvılaşma (Liquefaction) : Boşluk suyu basıncının tekrarlı yükler altında sürekli artması ve korunması ile efektif çevre basıncının çok küçük bir değere düşmesi, zeminin kayma mukavemetinin kaybolması ve çok büyük şekil değiştirmelerin ve akmaaların olduğu bir durumdur (Seed ve diğ., 1976).

b) Ön Sıvılaşma (Initial Liquefaction) : Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının artarak bir yükleme çevrimi sonunda efektif çevre basıncına eşit olmasına Ön Sıvılaşma denir. Ön sıvılaşmanın olması zemin elemanında oluşabilecek şekil değiştirmelerin boyutları ile ilgili bilgi vermez. Böyle bir tanım yapmaktaki amaç zemin elemanının tekrarlı yükler altında davranışının adlandırılması ve ön sıvılaşmadan sonraki davranışın değerlendirilmesinde bir açıklık getirilmesidir (Seed ve diğ., 1976).

c) Sınırlı Sıvılaşma-Çevrimsel Hareketlilik (Cyclic Mobility) : 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 diğ., 1976).

d) Kum Kaynaması : Bir zemin kütleindeki aşırı boşluk suyu basıncından dolayı kum ve suyun borulanarak dışarı çıkmasıdır (Wang ve Law, 1994).

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

f) Dengeli Durum (Steady State) : 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.

## **2.2. Boşluk Suyu Basıncı Artış Mekanizması**

Kohezyonsuz zeminler özellikle gevşek kumlar, tekrarlı yükler altında, bulunduklarından daha sıkı bir konuma geçmek isterler. Kuru kumlar üzerinde yapılan değişik dinamik deneylerde bu hacim azalması ve sıkılığın artması gözlenmiştir. Suya doygun zeminlerde ise, drenajsız halde tekrarlı yükler altında gevşek kuru kumlarda gözlenen hacimsel sıkışmaya daneler arasını dolduran boşluk suyu engel olmaktadır. Suyun sıkışabilirliğinin zemin yapısına oranla çok daha az olması boşluk suyu basıncının artmasına yol açmaktadır. İnce-orta kumlarda hidrolik iletkenlik nispeten yüksek olmasına karşın, süre açısından bir deprem sırasında boşluk suyu basıncında olabilecek sönüm miktarının ihmal edilebilir olacağı ve drenajsız yükleme koşullarının geçerli olduğu varsayılmaktadır.

Tek boyutlu yüklemelerde oluşan boşluk suyu basıncı uygulanan düşey gerilmenin büyüklüğüne eşit olur. Üç boyutlu veya üç eksenli yüklemelerde boşluk suyu basıncı büyüklüğü zemin tipine ve gerilme tarihçesine bağlıdır. Mühendislik uygulamasında, çeşitli gerilmelerde drenajsız yükleme yapılması durumunda ne kadar fazla boşluk suyu basıncı oluşacağını tahmin etmek genellikle gereklidir. Bu gerilme değişiklikleri toplam gerilmeler cinsinden olup, hidrostatik veya kayma şeklinde de olabilir. Toplam gerilmelerdeki bu değişikliklere ( $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_2$ ,  $\Delta\sigma_3$ ) boşluk suyu basıncının tepkisi araştırıldığı için bu değişiklikleri boşluk suyu basıncı katsayıları

veya parametreleri şeklinde ifade etmek uygun olur. Bu parametreleri ilk defa 1954 yılında İngiltere Imperial College’de Prof. Dr. A.W. Skempton tanıtmıştır.

Genelde zemin kütlesi, boşluklarında su ve hava bulunan sıkışabilir zemin iskeleti şeklinde düşünülebilir. Eğer zemin elemanına etkiyen gerilmeler arttırılırsa, bu elemanın hacminde bir azalma ve boşluk suyu basıncında artış gözlenir. Drenajsız (UU) üç eksenli deneyde hidrostatik hücre basıncı  $\sigma_c$  uygulanması durumunda eğer zemin %100 suya doymuş ise uygulanan hücre basıncı değişikliği  $\Delta\sigma_c$  değerine eşit bir boşluk suyu basıncı değişikliği ( $\Delta u$ ) elde edilir. Bir başka deyişle  $\Delta u/\Delta\sigma_c$  oranı 1’e eşit olur. Eğer zemin %100’den daha az doymuşsa, meydana gelen ilave boşluk suyu basıncı  $\Delta u$ ’nun artan hücre basıncı  $\Delta\sigma_c$ ’ye oranı 1’den az olur. Üç eksenli deneyde bu oran şöyle ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} = \frac{1}{1 + \frac{nC_v}{C_{sk}}} = B \quad (2.1)$$

Burada, n : Porozite

$C_v$  : Boşlukların sıkışması

$C_{sk}$  : Zemin iskeletin sıkışmasıdır.

Prof. Skempton rahatlık açısından bu oranı B şeklinde isimlendirmiştir. B parametresi, drenajsız yükleme koşullarında hidrostatik veya hücre basıncı artışının boşluk suyu basıncında meydana getirdiği artışı ifade eder.

Eğer zemin tamamen doymuşsa  $C_v=C_w$  olur ve suyun sıkışabilirliği zemininkine çok küçük olduğu için  $C_w/C_{sk} \rightarrow 0$  kabul edilebilir. Dolayısıyla doymuş zeminlerde  $B=1$ ’ dir. Eğer zemin kuruyorsa  $C_v/C_{sk}$  sonsuza yaklaşır çünkü havanın sıkışabilirliği zemine göre çok fazladır. Dolayısıyla kuru zeminlerde  $B=0$  olur. Kısmen doymuş zeminlerde B parametresi 0 ile 1 aralığında değişir. B ve doymuşluk derecesi arasındaki ilişki zemin tipine ve gerilme seviyesine bağlıdır (Holtz ve Kovacs, 1981).

Arazi ve laboratuvar ölçümleri sonucu sıvılaşmayı oluşturabilecek boşluk suyu basıncı artışının efektif düşey gerilmeye oranının %50’den fazla olması gerektiği görülmüştür ( $\Delta u/\Delta\sigma_v' > 0.50$ ). Bu oran laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyle belirlenebilir (Tezcan ve Teri, 1996).

### 2.3. Sıvılaşmanın Mekanizması

Arazide gözlenen zemin sıvılaşmasının ana nedenleri uzun zamandan beri bilinmektedir. Casagrande kritik boşluk oranını göz önüne alarak kumlu zeminlerde sıvılaşmayı açıklamak için bu konudaki ilk çalışmayı yapan araştırmacı olmuştur. Kayma gerilmesine maruz bırakılan sıkı kumlar genişlemeye yani hacminde bir artış meydana gelmeye, gevşek kumlar ise aynı gerilme koşulları altında hacminde azalmaya meyillidir. Kayma gerilmesi uygulanan kumun hacminde bir değişimin meydana gelmediği boşluk oranına kritik boşluk oranı denir.

Dinamik bir etkiyle titreşim uygulanan ve kritik boşluk oranından daha büyük boşluk oranına sahip olan kum tabakalarının hacminde azalma meydana gelir. Eğer drenaj mümkün değilse hacim azalması eğilimi boşluk suyu basıncının artması sonucunu doğurmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncına eşit olacak mertebeye ulaştığı zaman efektif gerilmeler sıfır olmakta, kum tabakası mukavemetini tamamen kaybetmekte ve sıvılaşmış bir duruma gelmektedir.

Fakat aşağıdaki sebeplerden dolayı kritik boşluk oranı kavramı tek başına kumların sıvılaşma potansiyellerini değerlendirmek için yeterli değildir.

i) Kritik boşluk oranı sabit bir değer değildir, çevre basıncıyla değişir.

ii) Dinamik yükleme koşullarındaki hacim değişiklikleri laboratuvarında tek yönlü basit kesme ve üç eksenli kesme deneylerinde elde edilenlerden farklıdır.

Bu nedenle 1960'lerden beri sıvılaşmayı kontrol eden zemin parametrelerinin belirlenmesi için özenli çalışmalar yapılmaktadır (Das, 1993).

Laboratuvarında üç eksenli (3-E) deney aletiyle tekrarlı gerilme uygulanan kum numunelerin davranışı incelenerek sıvılaşma kavramının temeli oluşturulmuştur. İlk olarak Seed ve Lee (1966) tarafından suya doymun kum numuneler hücre basıncıyla konsolide edilmiş ve drenajsız koşullarda belirli bir pik eksenel uzamaya kadar tekrarlı eksenel gerilmelere maruz bırakılmıştır. Bu yükleme yöntemi numuneye yatayla 45°lik açı yapan kayma yüzeyi ve düzlemi boyunca gerilme durumları oluşturur. Bu durum deprem sırasında yerde yatay bir düzlemde oluşan durumun aynısıdır. Tekrarlı üç eksenli deneydeki her yükleme kademesi için gerilme durumları Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Ishihara, 1996).

Şekil 2.1. Tekrarlı Üç Eksenli Yükleme Kademeleri İçin Gerilme Durumları (Ishihara, 1996)

Eksenel gerilme  $\sigma_d$  drenajsız olarak uygulanırsa,  $45^\circ$ 'lik düzlemde oluşan kayma gerilmesi  $\sigma_d/2$  olur. Ayrıca bu düzlemde  $\sigma_d/2$  normal gerilme de oluşur fakat bu gerilme mevcut efektif çevre gerilmesi  $\sigma_o'$  değiştirmeden boşluk suyuna aktarılır. Dolayısıyla bu normal gerilme dikkate alınmaz.

Tekrarlı 3-E deney için tipik bir sonuç Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Şekil 2.2. Tekrarlı Üç Eksenli Deneyde Eksenel Uzama ve Boşluk Suyu Basıncı Artışı (Ishihara, 1996)

Burada tekrarlı eksenel gerilme uygulandıkça boşluk suyu basıncı giderek artmaktadır. Sonuçta uygulanan ilk çevre basıncına yakın bir değer olarak %5 genlikle bir eksenel uzama oluşturur. Bu durum ön sıvılaşma veya kısaca sıvılaşma olarak isimlendirilir. Gevşek kum için ön sıvılaşma bir yumuşama durumu olarak isimlendirilir. Çünkü %100 boşluk suyu basıncı oluşumuyla mukavemet tamamen kaybolur ve aniden çok büyük deformasyon meydana gelir. Orta sıkı ve sıkı kumlarda yine %100 boşluk suyu basıncı oluşumuyla bir yumuşama durumu meydana gelir. Orta sıkı ve sıkı kumlarda tekrarlı yükler altında boşluk suyu basınçlarındaki artışların daha yavaş ve düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu tip kumlarda artan boşluk suyu basınçları kısa süreli olarak efektif çevre gerilmesine eşit olur. Zemin numunesinin genişlemeye başlaması ile boşluk suyu basınçlarının değeri azalır ve zemin tekrar mukavemet kazanır. Bu zeminlerde oluşan sıvılaşma gevşek kumlarda gözlenen sıvılaşmadan farklı olup şekil değiştirmeler kumun sıklığına bağlı olarak sınırlı kalır. Bu olaya sınırlı sıvılaşma veya çevrimsel oynaklık oluşması denilmektedir (Ishihara, 1996).

## 2.4. Suya Doygun Kumlarda Sıvılaşma ve Çevrimsel Hareketlilik

1936 yılında Fort Peck Barajında meydana gelen zemin göçmeleri üzerine Casagrande'nin yapmış olduğu çalışmalarda, suya doymuş gevşek kumların kayma deformasyonlarına maruz bırakılmasıyla yüksek boşluk suyu basınçlarının oluştuğu ve zeminin deformasyona karşı direncini yitirerek sıvı gibi davrandığı anlaşılmıştır. Bu sıvılaşma türünden kaynaklanan duraysızlıklar Sheffield Barajı ve Aşağı San Fernando Barajında olduğu gibi büyük zararlara yol açabilir. Burada sıvılaşma, zemindeki statik denge için gerekli olan kayma gerilmesi, zeminin sıvılaşmış durumdaki kayma dayanımından büyükse meydana gelir ve bir kez tetiklendiği zaman statik kayma gerilmelerinin etkisiyle büyük deformasyonlar oluşur (Kramer, 1996).

1964 yılındaki Niigata ve Alaska Depremlerinde zeminden kaynaklanan büyük yıkımlardan dolayı deprem yükleri altında zemin davranışları incelenmeye başlanmıştır. Drenajsız koşullarda tekrarlı gerilmelerin uygulandığı orta ve sıkı, suya doymuş kumlarda, boşluk suyu basıncı artışı geliştiği ve statik yükleme durumunda kabaran numunelerin önemli deformasyonlara uğradığı gözlenmiştir (Seed ve Lee, 1966). Bu deneylerde boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşit duruma geldiği ve çok küçük dirençle bir miktar deformasyon olduğu için bu kumlar da sıvılaşmıştır denilebilir. Bu tip sıvılaşma statik gerilmeler ile oluşandan farklıdır çünkü yükleme çevrimlerinin çeşitli kademelerinde boşluk suyu basıncının çevre basıncına eşit olduğu numune kabarır ve yükleme çevrimlerinin diğer kademelerinde pik gerilmelerin oluştuğu şekil değiştirmeleri sınırlayıcı yeterli dirence kavuşur. Bu durum sınırlı uzama potansiyelli ön sıvılaşma (Seed, ve diğ., 1975) veya çevrimsel hareketlilik (Castro, 1975; Casagrande, 1976) olarak isimlendirilir.

Eğer tekrarlı gerilme uygulamaları durdurulup sıfır gerilme durumuna dönülürse, zeminde jeolojik basınca eşit boşluk suyu basıncı oluşur. Bu üst kısımdaki zemin tabakalarına hasar verici yukarı akış meydana getirir. Deprem hareketleri sonucu oluşan bir ön sıvılaşmadan dolayı yeryüzüne doğru olan su akışı yüzeyden görülen sıvılaşma belirtileridir. Kum kaynaması veya su fışkırması şeklindeki bu sorunlar yüzeye yakın yapılara büyük zarar vermektedir. Bazı durumlarda ise depremden kaynaklanan boşluk suyu basıncı o kadar hızlı sönmelenir ki sıvılaşma gerçekleşemez. Tekrarlı gerilmelerden dolayı oluşan boşluk suyu basıncından

kaynaklanan su fışkırması ile yüzeye yakın zeminlerin sıvılaşması olayı bu zemine doğrudan uygulanan tekrarlı gerilmelerden kaynaklanan çevrimsel sıvılaşmadan daha olasıdır. Bundan dolayı suya doygün kumlarda tekrarlı gerilme etkilerini ifade eden terimler boşluk suyu basıncı artışını belirtmelidir. Ön sıvılaşma veya tekrarlı sıvılaşma gibi terimler sıvılaşma kavramını anlamak için gereklidir.

Zemin tabakalarında ön sıvılaşma oluşturacak kadar yüksek boşluk suyu basıncı oluşmazsa, bu basıncın sönümünden kaynaklanan yıkıcı etkilerin olmayacağı açıktır. Deprem sırasında tüm kum tabakalarının davranışı drenajsız kabul edilmelidir. Eğer drenajsız koşullarda profilde sıvılaşmaya karşı yeterli güvenlikte bir zemin tabakası varsa boşluk suyu basıncı etkileriyle ilgili hiçbir çalışma garanti edilemez. Bu yaklaşım güvenlik açısından ve pratik açıdan geçerlidir. Dolayısıyla bir profildeki tüm zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyelleri incelenmeli ve güvenlik için uygun bir değerde olduğu gösterilmelidir (Seed ve diğ., 1976).

## **2.5. Sıvılaşma Potansiyelini Etkileyen Faktörler**

Sıvılaşmayı etkileyen faktörler üç ana grupta incelenebilir: Deprem hareketi özellikleri, zemin özellikleri ve çevresel koşullar (yerel topoğrafya, yeraltı suyu rejimi vb.). Birçok tarihsel kayıt ve araştırmalar sonucu sıvılaşmayı gösteren kritik durumlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

### **2.5.1. Sıvılaşmaya Yol Açan Deprem Eşik Şiddeti**

Kayıtlara göre büyüklüğü 5'in altında şiddeti VI'nın altında, orta ve sığ derinlikteki bir deprem sonucu sıvılaşma olayı gözlenmemiştir (Wang ve Law, 1994).

### **2.5.2. Maksimum Odak Uzaklığı**

Bir sismik olayda, sıvılaşmayı tetikleyen deprem etkilerinin hissedilmediği maksimum odak uzaklığı ( $\Delta_{max}$ ) vardır. Araştırmalar sonucu bu  $\Delta_{max}$  değeri km olarak aşağıdaki bağıntıyla elde edilebilir (Wang ve Law, 1994):

$$\Delta_{max} = 0.82 \cdot 10^{0.862(M-5)} \quad (2.2)$$

Kuribayashi ve Tatsusoku (1991) ile Erken ve diğ. (1993) göre deprem büyüklüğüne bağlı olarak sıvılaşmanın olabileceği uzaklık D km olmak üzere,

$$\log D = 0.77 \cdot M - 3.6 \quad (2.3)$$

ifadesinden hesaplanabilir (Arıoğlu ve diğ., 2000).

### 2.5.3. 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 olayının gözlemlendiği birçok bölgede yerin 15 m altından daha derinde sıvılaşma olmadığı anlaşılmıştır.

### 2.5.4. Yeraltı Suyu Seviyesinin Derinliği

Sıvılaşma olayının gözlemlendiği 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).

### 2.5.5. Zemin Özellikleri

#### 2.5.5.1. Relatif Sıkılık

Relatif Sıkılık,  $D_r$ , daneli zeminlerdeki oturma ve sıvılaşma riskinin belirlenmesindeki temel parametrelerden biridir. Başlangıç relatif sıkılık değeri arttıkça titreşim sırasında oturma ve boşluk suyu basıncının azaldığı bilinmektedir.

Yer ivmesi ve relatif sıkılığa bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli durumu Tablo 2.1'de verilmiştir (Dowrick, 1975).

Tablo 2.1. Relatif Sıkılığa ( $D_r$ ) Bağlı Olarak Sıvılaşma Potansiyeli

| Maksimum Yer İvmesi | Sıvılaşma Potansiyeli Yüksek | Sıvılaşma zemin tipine ve deprem magnitudüne bağlıdır | Sıvılaşma Potansiyeli Düşük |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 0.10 g              | $D_r < \%33$                 | $\%33 < D_r < \%54$                                   | $D_r > \%54$                |
| 0.15 g              | $D_r < \%48$                 | $\%48 < D_r < \%73$                                   | $D_r > \%73$                |
| 0.20 g              | $D_r < \%60$                 | $\%60 < D_r < \%85$                                   | $D_r > \%85$                |
| 0.25 g              | $D_r < \%70$                 | $\%70 < D_r < \%92$                                   | $D_r > \%92$                |

Gevşek kumlar titreşimle sıkışır. Depremler sırasında bu sıkışma yapıları zarar veren oturmalara yol açar. Dolayısıyla kumlu bir zeminde sıkılaşmaya karşı hassaslığın 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 çevresinde 1.35 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. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi sıkılık değerinin artmasıyla ön sıvılaşmaya ulaşmak için gereken tekrar sayısı ve uygulanan kayma gerilmesinin arttırılması gerekmektedir.

Şekil 2.3. Başlangıç Relatif Sıkılığın Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1978)

Şekil 2.4. Relatif Sıkılığın Oluşacak Boşluk Suyu Basınçlarına Etkisi (Ladd,1989).

K.Ishihara, sıvılaşma olasılığının relatif sıkılıkla birlikte o kumun maksimum hacim değiştirme potansiyeli ( $V_d$ ) ile de ifade olunması gerektiğini,  $V_d$  değeri büyük olan kumlarda sıvılaşmanın daha muhtemel olduğunu belirtmiştir.

Ladd ve diğ. (1989), relatif sıkılığın boşluk suyu basıncı üzerindeki etkilerini incelemiş ve Şekil 2.4’de araştırmanın sonuçları gösterilmiştir.

Ön sıvılaşmadan sonra meydana gelebilecek şekil değiştirmelerin Şekil 2.5’de gösterildiği gibi sıkılığa bağlı olduğu gözlenmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi relatif sıkılığın %47’den küçük olması durumunda gerçek sıvılaşmanın olduğu, şekil değiştirme oranının çok büyük değere ulaştığı, buna karşılık sıkılığın %47’den büyük olması durumunda uygulanacak kayma gerilmesinden elde edilebilecek şekil değiştirme oranlarının sınırlı kaldığı, relatif sıkılığa bağlı olduğu görülmektedir.

#### Şekil 2.5. Relatif Sıkılığın Sıvılaşmaya ve Birim Kaymalara Etkisi (Seed, 1978)

Wang ve Law (1994), sıvılaşma oluşabilecek zeminin relatif sıkılığının %75’ten küçük olması gerektiğini belirtmişlerdir.

#### **2.5.5.2. İnce Dane Oranı ve Plastisite**

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

Sıvılaşma üzerinde dane çapı dağılımının etkisini incelemek amacıyla geçmişte oluşan depremlerde gözlenen, sıvılaşan zeminlerin dane çapı eğrileri Şekil 2.6'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi ince dane içeren kumların sıvılaşma olasılıkları ince dane içermeyen kumlara oranla daha fazladır.

Şekil 2.6. Sıvılaşma Gözlenmiş Zeminlerin Dane Çapı Dağılım Eğrileri (Ishihara, 1985)

Sıvılaşma üzerinde ince dane oranının etkisinin belirlenmesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Shen ve arkadaşları 1981’de üç eksenli deney aletinde Ottawa kumu üzerinde düşük plastisiteli danelerin etkisini incelemişlerdir. Buna göre plastik olmayan ince dane oranı arttıkça sıvılaşma mukavemetinde azalma meydana gelmektedir.

Aynı amaçla Erken ve Ansal (1994) tarafından dinamik üç eksenli deney sisteminde örselenmemiş düşük plastisiteli siltli kum numunelerin davranış biçimleri incelenmiştir. Kumlu zeminin içerdiği silt oranının dinamik mukavemeti olumsuz olarak etkilediği, silt oranı arttıkça mukavemette azalmanın olduğu görülmüştür.

#### Şekil 2.7. Plastik İnce Danelerin Sıvılaşmaya Etkisi (Erken ve Ansal, 1994)

Şekil 2.7’de yine Erken ve Ansal (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde değişik oranlarda plastik ince dane içeren zeminlerin sıvılaşma deney sonuçları verilmektedir. Plastik ince dane oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığı şekilden anlaşılmaktadır.

Erten ve Moher (1995) tarafından tekrarlı üç eksenli deney sisteminde plastik olmayan ve düşük plastisiteli silt içeren sıkı şartlar altındaki kumların dinamik davranışları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 2.8’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 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 meydana gelmektedir. Büyük şekil değiştirmeler de zeminin dinamik mukavemetinin kaybolarak sıvılaşma olasılığının artmasına yol açar.

Şekil 2.8. Düşük Plastisiteli Siltli Kumlarda a)N=10 ve b)N=30 Çevrimlerinde Boşluk Suyu Basıncı Oranı ile Eksenel Deformasyonların Değişimi (Erten ve Moher, 1995).

Şekil 2.9'da örselenmemiş, değişik oranlarda düşük plastisiteli kil içeren kumlu zeminlerin  $\tau_d/\sigma_c = \pm 0.311-0.292$  gerilme seviyesi altındaki davranış biçimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşabilirlik azalmaktadır. % 14 kil içeren kumlu zemin numunesi, boşluk suyu basıncının başlangıç efektif gerilmesine (konsolidasyon basıncına)  $N_c=60$  çevrimde eşit olması sonucu sıvılaşmıştır. Burada  $N_c$ , "Ön Sıvılaşma Çevrim Sayısı" olarak tanımlanmaktadır. % 37 ince dane içeren numunede, boşluk suyu basıncı, yükün 100. tekrarında konsolidasyon basıncının ancak % 80' ine ulaşmaktadır. Killi (% 67) olan numunede ise ilk 10 çevrimde boşluk suyu basınçları hızlı artmakta, bu çevrimden sonra artış hızı azalarak sabitleşmeye başlamaktadır. Boşluk suyu basınçlarının 270. çevrimde konsolidasyon basıncının ancak % 30' una gelerek sabitleşmesi sonucu bu numune sıvılaşmamıştır.

Şekil 2.9. Örselenmemiş Kumlu Zeminlerde İnce Dane Oranının Sıvılaşmaya Etkisi (Ansal ve diğ., 1994).

Şekil 2.10'da plastisitenin etkisini incelemek için suda yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış yaklaşık % 20 yüksek plastisiteli kil, düşük plastisiteli silt içeren kum zemin numunelerinin,  $\tau_d/\sigma_c = \pm 0.137$  gerilme seviyesindeki dinamik davranış biçimleri temiz kumun davranış biçimi ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 2.10. Plastisitenin Sıvılaşmaya Etkisi (Erken ve diğ., 1994)

Şekilde görüldüğü gibi siltli kumda yükün 2. tekrarında boşluk suyu basıncındaki artış başlangıç efektif çevre gerilmesine eşit olmuş ve kum zemin numunesi sıvılaşmıştır. Bu numune için sıvılaşmanın başladığı çevrim sayısı  $N_c = 2$  dir. Şekilden de görüldüğü gibi siltli kum (SM) numune  $N_c = 2$  de sıvılaşırken temiz kum (SP)  $N_c=5$ , yüksek plastisiteli killi kum (SC) ise  $N_c=11$  de sıvılaşmaktadır. Siltli kumun sıvılaşabilirliği temiz kuma göre daha yüksek olurken, killi kumun sıvılaşabilirliği daha düşük olmaktadır (Erken ve diğ., 1994). Bu, Şekil 2.11’de daha açık olarak görülmektedir. Hangi gerilme seviyesi uygulanırsa uygulansın killi kumların dinamik mukavemeti siltli ve temiz kumlara göre daha yüksektir.

#### Şekil 2.11. Plastisitenin Sıvılaşmaya Etkisi

Laboratuarda yapılan üç eksenli dinamik deneylerde ince dane oranının etkisi Ishihara ve Koseki (1989) tarafından incelenmiştir. Dinamik mukavemet üzerinde plastisitenin etkisi Erken ve diğ. (1994), Kuerbis ve diğerleri (1989) tarafından incelenmiştir. Plastik ince danelerin dinamik mukavemeti arttırdığı plastik olmayan ince danelerin ise dinamik mukavemeti azalttığı belirtilmiştir (Ansal, 1998).

Erzincan- Ekşisu bölgesinden alınan ince dane içeren örselenmemiş kumlu zemin numunelerinin dinamik mukavemeti laburatuarda hazırlanan sıkı kum zemin

numunelerinin dinamik mukavemetinden daha büyüktür. Bu sonuç zemin yapısı ve plastik ince danenin dinamik mukavemet üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Şekil 2.12’de Gemlik bölgesinden alınan ve % 22-35 ince dane içeren örselenmemiş zemin numunelerinin dinamik davranışı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Erzincan-Ekşisu bölgesinden alınan ince dane oranı % 27-36 arasında değişen plastisite indeksi  $I_p$ =% 25-30 arasında olan zeminlerin dinamik mukavemetinin de Gemlik bölgesinden elde edilen mukavemete yakın olduğu Şekil 2.12’den görülmektedir. Kumlu zeminlerin dinamik mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerden birinde ince dane oranı olduğu bu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Plastisite indeksi daha yüksek olan zeminlerde daha yüksek dinamik mukavemet görülmektedir.

Şekil 2.12. Tekrarlı Gerilme Oranı Çevrim Sayısı İlişkisi (Ansal ve diğ. ,1998)

Plastik ince dane oranının artması ile dinamik mukavemet artmaktadır. Plastisitesi geniş bir aralıkta değişen numunelerin dinamik mukavemeti sıkı kumlarda elde edilen dinamik mukavemetten daha büyük elde edilmiştir.

#### **2.5.5.3. Sismik Geçmişin Etkisi**

Bir kum elemanın sıvılaşabilirliğinin, 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 sıklıkta 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.

Şekil 2.13'de görüldüğü gibi geçmişte deprem etkisi altında kalmış kum tabakalarının, yukarıda sözü edilen deneylerde numunelere uygulanmış olan titreşimlerden çok daha kuvvetli titreşimlerin etkisi altında kaldıkları düşünülürse, bu tabakaların sıvılaşmaya karşı dirençlerinin artmış olacağı düşünülebilir. Yalnız burada numuneye uygulanan titreşimlerin mertebesi de önemli olmaktadır. Eğer bu titreşimler küçük kalmış ve sıvılaşmaya yol açmamış ise genel olarak mukavemette bir artış olurken, sıvılaşma olması halinde mukavemette bir azalmaya yol açmaktadırlar. Bu tip davranışa neden olarak ise uygulanan titreşimler sonucu meydana gelen değişiklikler gösterilebilir.

#### Şekil 2.13. Sismik Geçmişin Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1978)

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. Buna karşılık büyük genlikli titreşimlerin etkisi altında kalmış zeminlerin davranış biçimi farklı olur.

Önceden sıvılaşmış numunelerde ilk duruma göre oluşmuş dane kilitlenmeleri, oluşan çevre basıncına eşit boşluk suyu basıncının daneleri kısa bir süre için de olsa birbirlerinden ayırması sonucunda yok olur ve yeniden sıvılaşmaya karşı direnci azalır.

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.

#### **2.5.5.4. Yatay Toprak Basıncı ve Aşırı Konsolidasyon Oranı**

Sıvılaşmaya etki eden faktörlerden bir diğeri yatay toprak basıncıdır. Şekil 2.14’de görüldüğü gibi yatay toprak basıncı katsayısı  $K_o$ ’ın artmasıyla ön sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranlarında büyük artışların olacağı bulunmuştur.

Şekil 2.14. Yatay Toprak Basıncı Katsayısının Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1978)

Ishihara ve Takatsu (1979) tarafından aynı tip kum numunelerini kullanarak burulmalı kesme deneylerinde aşırı yüklenmişliğin etkisi incelenmiş ve deney sonuçları Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aşırı konsolidasyon oranı (A.K.O.)’nın artmasıyla sıvılaşmaya karşı direnç artmaktadır.

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

Şekil 2.15 - Aşırı Konsolidasyon Oranının Sıvılaşmaya Etkisi.

#### 2.5.5.5. Kumların Fiziksel Özelliklerinin Etkisi

Kumların en önemli fiziksel özellikleri dane boyutu, dane şekli ve derecelenme olarak düşünülebilir. Bütün araştırmalar ve geçmişteki tüm depremler, sıvılaşan zeminlerin dane boyutlarının belirli sınırlar içinde kalmayıp geniş bir aralıkta değişebileceğini göstermektedir. Buna göre düşük relatif sıkılıklarda, kötü derecelenmiş kumlar iyi derecelenmiş kumlara göre daha düşük dinamik mukavemete sahiptir. 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.
- Üniformalite katsayısı ( $d_{60}/d_{10}$ )  $< 10$
- Plastisite İndisi  $I_p < 10$

## **2.6. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri**

Önceki bölümde verilen ölçütlerden sadece sıvılaşmaya karşı duyarlı olabilecek ortamların ve zeminlerin ayırtlanması için ön değerlendirme amacıyla yararlanılır. Dolayısıyla, bu ölçütler esas alınarak yapılacak ön değerlendirmelerin sonuçlarına göre, zeminlerin sıvılaşp sıvılaşmayacağına kesin olarak karar verilmesi doğru bir yaklaşım değildir. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, çok sayıda zemin ve deprem parametresinin dikkate alındığı ayrıntılı analiz yöntemleriyle yapılmaktadır.

### **2.6.1. Laboratuvar Deneyleri**

Depremler sırasında meydana gelebilecek yapısal hasar üzerinde yerel zemin koşullarının önemli etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları ile deprem sonrası statik mukavemetlerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Zeminlerin deprem sırasında ve deprem sonrasındaki gerilme - şekil değiştirme davranışlarını laboratuvarında çeşitli deney sistemleriyle belirlemek mümkün olmaktadır. Özellikle suya doymuş kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyelleri ve sıvılaşma sonrası davranışları laboratuvarında dinamik basit kesme (Peacock ve Seed, 1968; Finn ve diğ.,1970; Seed ve Peacock, 1971), dinamik üç eksenli (Seed ve Lee, 1966; Lee ve Seed, 1967), dinamik burulmalı deney (Yoshimi ve Oh-oka,1973; Ishibashi ve Sherif, 1974), sarsma tablası (Prakash ve Mathur, 1965) gibi dinamik deney sistemleriyle incelenebilmektedir (Das, 1993).

#### **2.6.1.1. 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 diğ., 1966).

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  $\tau_1$  olarak alınır ve

sıvılaşmaya yol açan tekrarlı kayma sayısına ( $N_{eq}$ ) karşılık gelir (Wang and Law,1994).

Depremi neden olduğu eş tekrarlı kayma gerilmesinin ( $\tau_{eq}$ ), sıvılaşma dayanımını ( $\tau_1$ ) aşması durumu sıvılaşma olarak ifade edilir. Çalışmalar sonucu  $\tau_{eq}$  aşağıdaki şekilde elde edilmiştir (Seed ve Idriss, 1971).

$$\tau_{eq} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \sigma_o * r_d \quad (2.4)$$

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

$$\frac{\tau_{eq}}{\sigma_o} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_o}{\sigma_o'} * r_d \quad (2.5)$$

Burada,

$a_{max}$  : Maksimum ivme

$g$  : Yerçekimi ivmesi

$r_d$  : Zemin tabakası derinliği için azaltma faktörüdür.

Shibata ve Teperaksa (1988)  $r_d$  düzeltme faktörünü,

$$r_d = 1-0.015*z \quad (2.6)$$

olarak ifade etmişlerdir.

Dinamik üç eksenli deney genellikle nitrojenle dondurularak alınmış örselenmemiş örneklerle gereksinim duyulması ve uzun zaman alan pahalı bir deney olması nedeniyle, daha çok araştırma amaçlı kullanılmaktadır.

#### **2.6.1.2. Dinamik Basit Kesme Deneyi:**

Bu deneyle beş parametre elde edilebilir: Dinamik kayma gerilmesi, toplam düşey gerilme, dinamik kayma uzaması, boşluk suyu basıncı ve karşılık gelen tekrar sayısı.

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.

#### **2.6.1.3. Burulmalı Dinamik Deney Sistemi:**

Dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemlerindeki birçok zorluk burulmalı dinamik deney sistemiyle ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bu deney sistemiyle numuneye ilave yanal gerilme yükleri uygulanabilmekte, izotropik veya anizotropik şartlarda yükleme yapılabilen ve yine numuneye yatay düzlemde burulmalı bir şekilde tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanabilmektedir. Büyük ölçekli deformasyon şartlarında zemin özelliklerini incelerken bu deney sistemi kullanılabilir.

Ishihara ve Li tarafından 1972'de geliştirilen deney sisteminde içi dolu zemin numuneleri kullanılmaktaydı. Fakat bu sistemlerde kullanılan içi dolu zemin numunelerinde açısal üniformluk sağlanamadığından, bu etkiyi azaltmak amacıyla araştırmacılar deneylerde içi boş silindirik numuneler kullanmayı tercih etmişlerdir (Yasuda, 1998).

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

$$F_1 = \tau_1 / \tau_p \quad (2.7)$$

Burada  $\tau_1$ , 20 tekrarda kumun sıvılaşmasına neden olan gerilme seviyesidir.  $\tau_p$  ise uygulanan gerilme seviyesidir.  $F_1$  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, 1998).

#### 2.6.1.4. Geniş Ölçekli Basit Kesme Deneyi :

Daneli zeminlerdeki sıvılaşma olayı incelemelerinde kullanılan deney sistemlerinde bazı olumsuz noktalar bulunmaktadır:

i- Küçük ölçekli basit kesme deneyindeki gerilme yığılması sonuçlarda bazı hatalara yol açmaktadır (Castro, 1969).

ii- Üç eksenli deney numunelerinin taban ve başlıklarındaki gerilme yığılması ve boyun oluşması olasılığı uzama ve su muhtevası dağılımında düzensizliğe yol açmaktadır (Castro, 1975).

iii- Sarsma tablası deneyleri ile yapılan sıvılaşma çalışmalarında ise sonuçlar, kutunun kenarlarının sınırlayıcı etkisiyle kesin olmamaktadır.

Bu nedenlerden dolayı DeAlba, Seed ve Chan (1976), tek yönlü tekrarlı gerilme uygulanan geniş ölçekli basit kesme deneyini kullanmışlardır. Deneylerde kullanılan kum numuneler 2300 mm \* 1100 mm \* 100 mm boyutlarında olup, bir sarsma tablasının üzerine yerleştirilmektedir. Drenajı önlemek için kumun üzerine kauçuk bir membran ve eylemsizlik için bir kütle konulmaktadır. Sarsma tablasının hareketiyle kumda tekrarlı gerilme durumu oluşmaktadır. Tekrarlı kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\tau_h = W/g * a_m \quad (2.8)$$

Burada,

W : Numuneden ve eylemsizlik kütlelerinden dolayı tabana etkiyen toplam basınç

$a_m$  : Üniform tekrarlı hareket için pik ivme

g : Yerçekimi ivmesidir.

Yapılan bu deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır (Das, 1993):

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 zeminin sınırlı uzama potansiyeli veya çevrimsel hareketlilik durumu denir.

c) Zeminin başlangıç relatif sıkılığının yükselmesiyle sınırlayıcı uzama potansiyeli düşer.

#### **2.6.1.5. Laboratuvar Deneyleri İçin Alınan Numunelerle İlgili Sınırlamalar:**

Örselenmiş zemin örnekleri, zemin sınıflamasına ve indeks parametrelerinin tayinine yönelik deneylerde kullanılır. Dayanım, deformabilite ve konsolidasyon özellikleri gibi mühendislik tasarımında esas alınan parametreler ise, örselenmemiş örnekler üzerinde tayin edilmek zorundadır. Sıvılaşma özellikleri incelenen zeminler kohezyonsuz bir yapıya sahip oldukları için örselenmemiş örnek alımı zordur. Bunun için, Bishop kum örnekleyicisi ve Delft örnek alıcısı gibi teknikler kullanılarak zeminden en az örselenmiş numuneler alınmaya çalışılır (Ulusay, 2001).

Laboratuvar Deneyleri için alınan numunelerle ilgili sınırlamalar:

- i- Numune alımı sırasında örselenme meydana gelir ve yerindeki gerilim durumu değişir, ayrıca örneklerin laboratuvara nakli sırasında örselenme olabilir.
- ii- Laboratuvar örnekleri küçük olup, ölçek etkisi söz konusudur.
- iii- Sınır Koşulları : İlksel gerilim koşulları bozulan örnekler üzerinde laboratuvarda arazi koşullarının sağlanması mümkün olmamaktadır.

#### **2.6.2. 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 ulaşamaz. 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).

#### **2.6.2.1. 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. Ortadan ayrılabilen tübün dış çapı 50 mm, iç çapı 35 mm ve uzunluğu 650 mm olup, tijlere monte edilir.

Uygulama:

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 1.5 m'de bir yapılır.

Deney Sonuçlarına İlişkin Düzeltmeler:

a) Yeraltısuyu düzeltmesi:

Deney, yeraltısuyu seviyesinin altında yapıldığında, suyun tübe girerek kumlu zemini gevşetmemesi için dikkatli olunmalıdır. Buna engel olunması amacıyla sondaj kuyusuna su ilave edilerek su seviyesi dengelenir. Yeraltısuyu tablası altında yer alan ince kum veya siltli kumlarda, eğer  $N > 15$  ise N değerleri için aşağıdaki eşitlik kullanılarak su düzeltmesi yapılır.

$$N = 15 + 0.5 (N-15) \quad (2.9)$$

Bu düzeltmenin amacı, çakma işlemi sırasında kısa sürede uzaklaşması mümkün olmayan suyun, negatif bir boşluk suyu basıncı yaratmasından dolayı zeminin direncinde, yerindeki normal penetrasyon direncine oranla meydana gelen artışın giderilmesidir (Ulusay, 2001).

b) Tij enerji oranı, ER:

Şahmerdanın tipi ve serbest bırakılış yöntemi, en üstteki tijin üzerinde yeralan ve darbenin uygulandığı metal bloğun tipi ve sondaj tijlerinin uzunluğu elde edilen N darbe sayısı değerlerinde farklılıklara neden olur. Bunun standart hale getirilebilmesi amacıyla enerji oranı (ER) kavramı geliştirilmiştir. Enerji oranı dikkate alınarak, N değerleri aşağıdaki ifade kullanılıp normalize edilir ve normalize edilmiş dabe sayıları ( $N_{60}$ ) hesaplanır.

$$N_{60} = N * (ER/60) \quad (2.10)$$

Türkiye’de kullanılan Donut tipi şahmerdan için enerji oranı (ER) 45’dir (Ulusay, 2001).

c) Jeolojik gerilme düzeltmesi,  $C_N$ :

N darbe sayıları, zeminin rölatif yoğunluğunun yanısıra, deney derinliğindeki efektif gerilime de bağlıdır. Efektif gerilim, efektif jeolojik gerilme ile temsil edilir. Aynı göreceli yoğunluğa sahip bir kum, farklı derinliklerde farklı N değerleri verir. Bu nedenle bir düzeltme yapılır. Düzeltme katsayısı  $C_N$  aşağıdaki ifadede yerine konularak düzeltilmiş darbe sayısı  $N_1$  elde edilir.

$$N_1 = C_N * N \quad (2.11)$$

Diğer düzeltmelerle birlikte,

$$(N_1)_{60} = C_N * N_{60} \quad (2.12)$$

ifadesi kullanılır. Örtü gerilimi düzeltmesi,  $C_N$ , için çok sayıda eşitlik önerilmiş olmakla birlikte, en çok kullanılanlar aşağıda verilmiştir.

- Liao ve Whitman (1986):

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma_v'}} \quad (\sigma_v' : \text{kgf/cm}^2) \quad (2.13)$$

- Tokimatsu ve Yoshimi (1983):

$$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \sigma_v'} \quad (\sigma_v' : \text{kgf/cm}^2) \quad (2.14)$$

- Peck v.d. (1974):

$$C_N = 0.77 * \log (20/\sigma_v') \quad (\sigma_v' : \text{ton/ft}^2) \quad (2.15)$$

- Seed ve diğ. (1971):

$$C_N = 0.85 * \log (145/\sigma_v') \quad (\sigma_v' : \text{ton/m}^2) \quad (2.16)$$

SPT'nin kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Yapı temellerinin 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,
6. Kohezyonlu zeminlerde tek eksenli sıkışma dayanımının tahmininde.

Tablo 2.2. SPT – N değerleri ile relatif sıkılık ve nisbi yoğunluk sınıflaması

| N     | Relatif Sıkılık | Yerleşim Sıklığı |
|-------|-----------------|------------------|
| <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         |

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 Tablo 2.2 de gösterilen bağıntı vardır. Kohezyonlu zeminlerde ise darbe sayısı ile zeminlerin kıvamları ve serbest basınç dayanımları arasında Tablo 2.3 deki bağıntıdan yararlanılabilir.

Tablo 2.3. SPT – N değerleri ile kıvam ve serbest basınç dayanımları sınıflaması

| N     | Kıvam       | Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|-------------|-----------------------------------------------|
| 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                                     |

#### 2.6.2.2. Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) :

Bu yöntemde sondalama 10 cm<sup>2</sup> 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.

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

$$p_s' = p_{so} [ 1 - 0.065 (d_w - 2) ] * [ 1 - 0.05 (d_y - 3) ] \quad (2.17)$$

Burada,

$d_w$  : Yeraltı su seviyesinin derinliği (m)

$d_y$  : Üstteki sıvılaşmayacak tabakanın kalınlığı (m)

$p_{so}$  : Tablo 2.4 de  $d_w = 2m$  ve  $d_y = 3m$  için verilen kritik penetrasyon dayanımı (Mpa)

Tablo 2.4 - Tasarım deprem şiddetine göre verilen  $P_{so}$

| 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).

#### 2.6.2.3. 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,  $\rho$  ve kayma modülünün,  $G$ , aşağıdaki bağıntı ile ilişkilendirilmesini sağlamaktadır.

$$G = \rho * V_s^2 \quad (2.18)$$

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 alışıl gelmiş sondaj teknikleri ve kuyu içi yöntemleri ile gerçekleştirilmesi birden fazla sondaj kuyusu gerektirmesi nedeniyle oldukça yüksek maliyetli ve uzun süre gerektirmektedir.

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<sup>2</sup> konik uç ve 150 cm<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> kesit elemanlı poroz bir elemana sahiptir. Buna ilaveten, penetrometre konik ucunun hemen arkasında birbirine 1.0 m 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.

Statik penetrasyon deneyinde (CPT) 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 yapılabilir. SCPT deneyinden elde edilen kayma dalgası hızı verileri maksimum dinamik kayma modülünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. CPT deneyinde derinlik ve sismometrelerin konumu hassas olarak kontrol edilebilmektedir. Statik penetrasyon deneyi (CPT) ile sismik ölçümlerin birleştirilmesi ve tek bir deneyde gerçekleştirilebilmesi, temel zeminlerinin stratigrafik, mukavemet ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde çok hızlı, güvenilir ve ekonomik bir araç teşkil etmiştir. SCPT deneylerinde elde edilen değerler diğer kuyu içi yöntemlerle elde edilen dinamik zemin parametreleri ile büyük uyum içerisindedir. Buna karşın SCPT, cross-hole gibi diğer tekniklerle karşılaştırıldığında çok hızlı ve ekonomik bir yöntemdir (Durgunoğlu ve diğ., 2000).

## **2.7. Zeminlerde Sıvılaşma Analizi Kriterleri**

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

Standart penetrasyon deneyinin verilerinin ve tane boyu dağılımı çözümlemelerinin kullanıldığı sıvılaşma potansiyeli analizleri, SPT'nin yaygın kullanımı ve daha ucuz

olması nedeniyle en tercih edilen yöntemlerdir. 3. Bölümde Adapazarı İl Merkezi'nin sıvılaşma potansiyeli aşağıda anlatılan formüller yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır.

#### **2.7.1. Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri (Seed ve Idriss, 1981)**

Bu yöntemde, zemin tabakalarının sıvılaşma emniyet faktörü ( $F_s$ ),

$$F_s = \tau_s / \tau_o \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$\tau_s$  : Belli bir zeminde sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi,

$\tau_o$  : Aynı zeminde belli bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir.

$F_s \leq 1$  ise sıvılaşma potansiyeli yüksek,

$F_s > 1$  ise sıvılaşma potansiyeli yoktur.

Şekil 2.16 - Periyodik sınır gerilmesi değerleri

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 gözönünde bulunduruyor olmamızdır.

Çeşitli depremlerden elde edilen sıvılaşma anındaki, periyodik yatay kayma gerilmesi  $\tau_s$ '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 diğ. (1981) tarafından Şekil 2.16'da verilmiştir.

Düzeltilme katsayısı  $C_N$  (2.16) no'lu denklem ile hesaplandıktan sonra  $10 \text{ t/m}^2$  düşey efektif gerilmeye göre düzeltilen darbe sayısı  $N_1$ , (2.11) no'lu denklem yardımıyla bulunur.  $N_1$  yardımıyla Şekil 2.16'dan belli bir deprem büyüklüğü için  $\alpha$  oranı okunur. Bu oran bulununca sıvılaşma için gerekli yatay kayma gerilmesi, ( $\tau_s$ ) için

$$\tau_s = \alpha * \sigma_v' \quad (2.20)$$

formülü kullanılır. Depremin maksimum zemin ivmesi  $a_{\max}$ 'ın etkisi ile meydana getireceği ortalama kayma gerilmesi,

$$\tau_o = 0.65 * \frac{a_{\max}}{g} * \sigma_v * r_d \quad (2.21)$$

bağıntısından hesaplanabilir.

Burada,

$a_{\max}$  : Yüzeydeki maksimum ivme

$\sigma_v$  : Kum tabakasına etkiyen toplam düşey gerilme ( $\text{t/m}^2$ )

$\sigma_v'$  : Kum tabakasına etkiyen efektif düşey gerilme ( $\text{t/m}^2$ )

$r_d$  : Gerilme indirgeme faktörüdür.

### 2.7.2. Eşik İvme Kriteri (Dobry ve diğ., 1981)

Eşik ivme kriterinde emniyet faktörü,  $F_a$  için

$$F_a = 1.6 a_t/a_{\max} \quad (2.22)$$

tarifi yapılır. Burada,

$a_t$  : Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli eşik ivmesi,

$a_{\max}$  : Depremin meydana getireceği maksimum yer ivmesidir.

Eğer,

$F_a \leq 1$  ise sıvılaşma potansiyeli yüksek

$F_a > 1$  ise sıvılaşma potansiyeli düşük

kabul edilir.

Eşik ivmesi değeri, kayma gerilmesi için kabul edilen (2.21) formülü esas alınarak elde edilen

$$(a_t/g) = [ \gamma_t (G/G_{\max})_t v_s^2 ] / g * z * r_d \quad (2.23)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir.

Burada,

$\gamma_t$  : Eşik kayma uzaması, zemindeki boşluk suyu basıncı artışını belirtir ve  $(1 \sim 3) * 10^{-2} \%$  değerlerini alır.

$G/G_{\max}$  : Kayma modülü oranı.

$G_{\max}$  : Kumlu zeminlerde küçük uzamalarda ( $\gamma < 10^{-4} \%$ ) ölçülen ön kayma modülüdür.

$r_d$  : Gerilme indirgeme faktörü

$z$  : Hesap yapılan zeminin derinliği

Eşik kayma şekil değiştirmesi  $\gamma_t = 0.0001$  için  $(G/G_{\max})_t = 0.8$  kabulü yapılmıştır.

Tablo 2.5’de SPT-N sayısı ile kayma dalgası hızı,  $v_s$  arasında değişik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik bağıntılar verilmektedir.

Tablo 2.5 - SPT Darbe Sayısı (N) ile Kayma Dalgası Hızı Arasındaki Ampirik Korelasyonlar (Özaydın, 1996)

Kayma dalgası hızı Lav ve Ansal (1993) tarafından,

$$V_s = 58.5 * N^{0.51} \text{ m/sn} \quad (2.24)$$

ile ifade edilmektedir (Arıoğlu v.d., 2000).

Eşik ivme emniyet faktörü tek başına sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek için yeterli değildir. Buradan elde edilen sonuç diğer kriterlerle denetlenmelidir (Şekercioğlu, 1998).

Çin’de yapılan araştırmalar sonucu kumlu silt ve kum zeminlerde sıvılaşma potansiyeli aşağıdaki eşitlikle değerlendirilebilir.

$$V_{s, \text{cri}} = V'_{s, \text{cri}} (d_s - 0.0133d_s^2)^{0.5} \quad (2.25)$$

Burada,  $V'_{s, \text{cri}}$  : Tablo2.6’de verilen kayma dalgası hızının kritik değerleridir.

Ölçülen kayma dalgası hızı  $V_s$ , yukarıdaki denklemden bulunan  $V_{s, \text{cri}}$  değerinden daha küçükse sıvılaşma potansiyeli yüksektir.

Tablo 2.6- Kayma dalgası hızının kritik değerlerinin ( $V'_{s, cri}$ ) Deprem şiddeti (I) ile değişimi

| I                          | VII | VIII | IX  |
|----------------------------|-----|------|-----|
| $V'_{s, cri}$ (kumlu silt) | 42  | 60   | 84  |
| $V'_{s, cri}$ (kum)        | 63  | 89   | 125 |

### 2.7.3. Sıvılaşma İndeksi Kriteri (Iwasaki ve diğ., 1984)

Bir zemin tabakasının sıvılaşma emniyet faktörü için

$$F_L = R / L \quad (2.26)$$

oranı hesaplanır ve bu oranın 1'den büyük olması halinde sıvılaşmanın olmayacağı varsayılır. Burada,

R : Zeminin sıvılaşma anındaki periyodik kayma direnci oranı,

L : Şiddetli bir depremde meydana gelebilecek kayma gerilmesi oranıdır.

$\sigma'_v$  kg/cm<sup>2</sup> olmak üzere, ampirik olarak, R ve L değerleri aşağıdaki formüllerden hesaplanır:

$$R = 0.0882 * \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + B \quad (2.27)$$

Eğer  $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 0.05 \text{ mm}$  ise

$$B = 0.19$$

Eğer  $0.05 \text{ mm} < D_{50} < 0.6 \text{ mm}$  ise

$$B = 0.225 * \log(0.35/D_{50}) \quad (2.28)$$

Eğer  $0.6 \text{ mm} < D_{50} < 1.5 \text{ mm}$  ise

$$B = -0.05$$

$$L = (a_{\max}/g) * (\sigma_v/\sigma_v') * r_d \quad (2.29)$$

#### 2.7.4. Çin Milli Kodu :

a) “The Chinese National Code of Aseismic Design for Buildings” aşağıdaki denklemi önermiştir (Wang ve Law, 1994):

$$N_{cr} = N_o * [ 0.9 + 0.1(d_s - d_w) ] * \sqrt{(3/p_c)} \quad (2.30)$$

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.

$N_o$  : Tablo 2.7’de gösterildiği şekilde tasarım deprem şiddetine bağlı ampirik N değeri.

Tablo 2.7 -  $N_o$  Değerinin Belirlenmesi

| Deprem alanına<br>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.

b) Değiştirilmiş Çin Kodu (Bazaraa, 1995):

Kritik SPT sayısı  $N_{cr}$  aşağıdaki bağıntı ile de tanımlanabilmektedir.

$$N_{cr} = N_o * [ 1 + 0.125*(d_s-3) - 0.05*(d_w-2) - 0.07*p_c ] \quad (2.31)$$

#### 2.7.5. Enerji Metodu (Wang ve Law, 1994):

Bu metod, titreşim sırasındaki enerji kaybının, zeminin sismik harekete karşı tepkisini gösterir bir parametre olarak kullanılması prensibine dayanır. Laboratuvar da 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 doymun kum zeminlerde sıvılaşmayı tanımlamak için aşağıdaki ifade verilmiştir.

$$\frac{10^{1.5M}}{2.28 * 10^{-10} * N_1^{11.5} * R^{4.3}} \geq 1 \quad (2.32)$$

Burada, M : Depremin büyüklüğü

R : Odak uzaklığı (km)

N<sub>1</sub> :100 kPa efektif basınç ve %60 enerji oranına göre düzeltilmiş standart penetrasyon dayanımıdır.

#### 2.7.6. Deprem Büyüklüğü Kriteri (Atkinson ve Charlwood, 1984):

M, depremin büyüklüğü ve N, SPT değeri olmak üzere,

$$CSR_{cr} = N / (12.9 * M - 15.7) \quad (2.33)$$

$$CSR = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * r_d \quad (2.34)$$

F = CSR<sub>cr</sub> / CSR <1 ise sıvılaşma olabilir.

#### 2.8. Sıvılaşma Şiddetinin Tahmini

Bir bölgede meydana gelebilecek sıvılaşma tehlikesinin yanında bu sıvılaşmanın şiddetinin de tahmini önemlidir. Iwasaki, 1986 yılında sıvılaşma derecesini-degree of liquefaction (D<sub>L</sub>) şu şekilde ifade etmiştir:

$$D_L = \sum (1-F_{LR}) * W(Z) * Z \quad (2.35)$$

Burada, sıvılaşma dayanımı,

$$F_{LR} = \tau_R / S_r \quad (2.36)$$

$$\tau_R = 0.109 * \sigma'_v{}^{-0.207} * N^{-0.367} * d_{50}^{-0.318} \quad (2.37)$$

$$S_r = (a_{max}/g) * (\sigma_v/\sigma'_v) * r_d \quad (2.38)$$

$W(Z)$ , zemin tabakasının ağırlık fonksiyonudur.  $Z$ , m cinsinden derinlik olmak üzere,

$$W(Z) = 10 - 2/3 \cdot Z \quad (2.39)$$

Tablo 2.8 sıvılaşma derecesi  $D_L$  ile sıvılaşma şiddeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Wang ve Law, 1994).

Tablo 2.8 - Sıvılaşma Şiddeti

| Sıvılaşma Derecesi ( $D_L$ ) | <4                                              | 4-10                                                                 | >10                                                            |
|------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Sıvılaşma Şiddeti            | Zayıf, seyrek kum kaynakları, önemsiz oturmalar | Çok sayıda kum kaynaması, görünür zemin oturmaları, yapısal hasarlar | Tehlikeli, geniş alanda kum kaynakları, ciddi yapısal hasarlar |

## 2.9. Sıvılaşmanın Deprem Hasarlarına İki Değişik Etkisi

Zemin sıvılaşması yapıların stabilitesi, zemindeki faaliyetler ve yapılar için tehlike oluşturur. Fakat önemli hasarlara yol açan büyük depremlerde sıvılaşma, yapısal hasar potansiyelini azaltarak yaşamsal fayda sağlayabilir.

### 2.9.1. Tarihi Veriler:

Şiddetli depremlerde zeminden kaynaklanan sebeplerden dolayı meydana gelen hasarlar incelendiğinde, sıvılaşma olan bölgelerde sıvılaşma olmayan bölgelere göre daha az yapısal hasar olduğu görülmüştür.

Genellikle sıvılaşan bölgelerdeki deprem şiddeti VI~IX arasındadır. Gözlemler sıvılaşmanın deprem zararlarını azalttığını dolayısıyla magnitüd yüksek olsa bile şiddetin az çıktığını göstermiştir. Örneğin 1964 deki Niigata Depreminin magnitüdü  $M=7.4\sim7.5$  olmasına rağmen geniş bir alanda meydana gelen sıvılaşmadan dolayı şiddet VIII olarak belirlenmiştir.

Diğer taraftan, depremin magnitüdü küçükse sıvılaşmadan kaynaklanan hasarlar daha çok önem kazanır. Dolayısıyla sıvılaşmanın meydana geldiği kesimlerde depremin şiddeti, sıvılaşma olmayan kesimlerden daha büyük çıkar.

### 2.9.2. Kavramsal Açıklama:

Sıvılaşma, zeminde oturma, kayma ve çökme durumlarına yol açan bir olaydır. Aşağıda sıvılaşmanın yer hareketini azaltıcı etkileri açıklanmıştır:

i- Sıvılaşan tabaka, taban kayasından gelen sismik kayma dalgalarını izole edici sıvı bir ortam gibi davranır.

ii- Sıvılaşan tabakaya ulaşan sismik enerji, kum kaynamaları ve zemin kaymaları yoluyla emilir. Rezidual sismik enerji büyük ölçüde zayıflar ve büyük yıkım gücü indirgenir.

iii- Laboratuvarda yapılan dinamik deneylerde, sıvılaşma oluşmadan önce zemin numunelerinin önemli ölçüde dinamik gerilme aldıkları görülmüştür. Sıvılaşma meydana gelir gelmez zemin yumuşar ve büyük gerilmeler alıp iletecek durumu kaybolur. Sıvılaşan kütle tarafından indirgenen gerilme seviyesi ile hasar oluşma potansiyeli düşer.

Baykal ve Balcı (1998) tarafından, sıvılaşma sırasında zemin tarafından tüketilen enerji ve bunun yapıya etkisi araştırılmış ve yukarıda anlatılanlara uygun sonuçlar bulunmuştur. Zemin tarafından sıvılaşma sırasında kullanılan enerji göz önüne alınarak yapılan dinamik hesaplarda, yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinin sıvılaşma neticesinde tüketilen enerji oranında azaldığı tespit edilmiştir. Deprem sonrası sıvılaşmaya maruz kalan yapıların taşıyıcı sistemi ve dolgu duvarlarında herhangi bir çatlak ve plastik deformasyona rastlanmamış olması yapıya gelen fazla enerjinin sıvılaşma tarafından tüketildiği ve dolayısıyla yapının plastik şekil değiştirmeye neden olacak enerjiye maruz kalmadığı anlaşılır. İncelenen vakalarda sıvılaşma esnasında %10-%77 mertebesinde enerji tüketilmekte ve bu tüketilen enerji boşluk suyu basıncının artışı ve şekil değiştirme enerjisi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada analizleri yapılan yapıların yakınlarındaki sıvılaşmaya maruz kalmamış aynı kalite ve özellikteki pek çok binanın ağır hasara uğramasına ve çökmesine karşılık değişik yerlerdeki bu binaların hiçbir yapısal hasara uğramamış olduğu gözlemlenmiştir.

## 2.10. Sıvılaşmaya Karşı Alınabilecek Önlemler

Sıvılaşmanın vereceği hasarlara karşı mühendislik projelerinin güvenliğini sağlamak amacıyla, sıvılaşma ihtimali olan zemin tabakalarında aşağıdaki bazı önlemler alınabilir:

1-) Sıvılaşabilir zeminin kazılması ve yeniden sıkıştırılması:

Bir yapı altındaki zeminin sıvılaşma ihtimali varsa, bu zemin kazılıp bir katkı maddesiyle tekrar sıkıştırılır. Mümkünse sıvılaşabilir zemin kazılıp uzaklaştırılır ve yerine sıvılaşmayacak bir zemin sıkıştırılarak yerleştirilir.

2-) Arazideki malzemenin sıkıştırılması:

Bu şekilde sıkıştırma işlemi vibroflotasyon, dinamik kompaksiyon, ve kompaksiyon kazıkları gibi birkaç yöntemle yapılabilir.

3-) Enjeksiyon ve kimyasal stabilizasyonla yerinde iyileştirme yapılabilir.

4-) Çakıl ve taş drenler yapılarak, dinamik yüklerden dolayı meydana gelecek boşluk suyu basıncının kısa sürede dağıtılması sağlanabilir.

5-) Yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesi için kuyular açarak su çekme işlemi yapılabilir.

6-) Kazıklı temel sistemi:

Adapazarı il merkezinde meydana gelen sıvılaşma olayı sonucunda birçok bina temel sorunları yaşamıştır. Yeraltı suyu seviyesi 1-2 m kadar zeminin altında yer aldığı için temeller çok sıkı olarak inşa edilmiş, radye jeneral temelli binalar dahi zeminin sıvılaşması sonucu zarara uğramışlardır. Kazıklı temel sistemi uygulanan yapılarda herhangi bir hasar yoktur.

7-) Derin temel sistemlerinin uygulanması da sıvılaşmaya karşı alınacak bir önlem olarak düşünülebilir.

Yukarıda önerilen zemin iyileştirme yöntemleri detaylı olarak incelenmesi gereken konular olup, bu çalışmada ayrıntılara girilmemiştir.

### **3. 17 AĞUSTOS 1999 DEPREMİNDE ADAPAZARI KENT MERKEZİNİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ DEĞERLENDİRMELERİ**

#### **3.1. 17 Ağustos 1999 Depremi**

##### **3.1.1. Genel Değerlendirme**

17 Ağustos 1999 tarihinde saat 3.02'de, Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Adapazarı, Kocaeli, Gölcük segmenti üzerinde, moment büyüklüğü  $M_w=7.4$  ve yüzey dalgası büyüklüğü  $M_s=7.8$  değerleri civarında olan 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 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 (Şekil 3.1). Fay kırılması tek parçadan değil 3 parçadan meydana gelmiş, bu nedenle yer hareketlerinin şiddeti beklenenden düşük ama süreleri uzun olmuştur. 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. İzmit 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 İzmit depreminin büyük bir deprem olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.1. 17 Ağustos 1999 Depremi'nde kırılan fay, ana şok ve artçı şoklar.

Deprem sırasında depremin şiddetle etkilediği çeşitli bölgelerdeki yer hareketi kayıt istasyonlarında ölçülen yer ivmelerinin maksimum değerleri, yerçekimi ivmesinin %40'ını aşmamaktadır (Şekil 3.2). Bunlar böyle bir deprem için normal değerlerdir ve birinci derece deprem bölgeleri için Deprem Yönetmeliğinde öngörülen değerleri aşmamaktadır. Yer ivmeleri yumuşak alüvyal zeminlerin olduğu bölgelerde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu bölgeler İzmit-Yalova arasındaki sahil şeridi, aynı bölgenin yamaç kısımlarında denize akan derelerin yatakları, Düzce ovası, Sakarya nehrinin alüvyonu üzerinde kurulu Adapazarı kenti ve faydan 100 km uzakta olmasına karşın İstanbul'un Avcılar bölgesidir. Bu deprem sonucu Türkiye'de ilk defa yoğun kıyı hasarlarına rastlanmıştır, Gölcük ve Değirmendere kıyılarının bir kısmı üstündeki yapılarla birlikte deniz sularının altına gömülmüştür. Sapanca Gölü kıyısında da kıyı çökmesi olmuştur. Adapazarı'nda yaygın zemin sıvılaşması ve zemin çökmesi sonucunda yüzlerce binanın temeli zeminin içine gömülmüş veya aşırı dönerek binaların kütle olarak devrilmesine neden olmuştur.

Şekil 3.2. 17.08.1999 Depremi Sakarya İstasyonu yer hareketi ivme kaydı.

17 Ağustos Depremi'nin ülkemizde endüstrinin ve şehirleşmenin en yoğun olduğu Marmara Bölgesi'nde meydana gelmiş olması, can kaybının ve maddi hasarın da çok büyük olmasına sebep olmuştur. 1967 Adapazarı Depremi'nden sonra bölgeyi etkileyen en büyük deprem olan 17 Ağustos 1999 Depremi'nde, İstanbul'un Avcılar, Küçükçekmece, Tuzla ilçeleri ile İzmit, Adapazarı, Gölçük, Yalova, Düzce ve Bolu şehirlerinde, resmi kayıtlara göre, 17322 vatandaşımız yaşamını yitirmiş, 43953 vatandaşımız ise yaralanmıştır. Depremden en çok etkilenen illerden olan sadece Kocaeli ve Sakarya'da devlet kaynaklarına göre 13367 insanımız ölmüş, 15061 insanımız yaralanmıştır. Devlet İstatistik Enstitüsü'nün (D.İ.E), 28.10.1999 tarihinde yayınlanmış olan bültenine göre Bolu, Kocaeli, Sakarya ve Yalova illerinde anket uygulanan 1186 işyerinden 749'u (% 63) deprem nedeniyle hasar görmüştür. Bunun illere göre dağılımı Bolu % 47, Kocaeli %61, Yalova % 78 ve Sakarya % 85 şeklindedir. Devlet kaynaklarına göre konut ve işyerlerinde görülen hasarlar :

- Yıkık ve ağır hasarlı konut sayısı : 66 441 adet
- Yıkık ve ağır hasarlı işyeri sayısı : 10 901 adet
- Orta derecede hasar gören konut sayısı : 67 242 adet
- Orta derecede hasar gören işyeri sayısı : 9 927 adet
- Az derecede hasar gören konut sayısı : 80 160 adet
- Az derecede hasar gören işyeri sayısı : 9 712 adet

Bu sonuçlara göre konut ve işyerlerinin % 32'si ağır, % 32'si orta, % 36'sı ise az hasarlıdır. Tespit edilen hasar görmüş konut ve işyeri sayısı toplam 244383 tür (Elibol, 2001).

### **3.1.2. Zemin ve Temel Mühendisliği Değerlendirmeleri**

İzmit Körfezi, İzmit Kuzey Anadolu fayının kuzey kolu üzerinde yer almaktadır ve bu yapı bir seri basenlerden oluşmaktadır. İzmit Körfezi'ne boşalan nehirler jeolojik süreç içerisinde Gölçük, Hersek, Kavaklı deltalarını ve Sapanca Gölü ile İzmit Körfezi arasındaki geniş ve uzun alüvyon düzlüğünü oluşturmuştur. Bu alanlarda, zemin profili genelde çok kalın, yumuşak-orta katı kil veya gevşek kum tabakalarından oluşmaktadır. Diğer bir deyişle, Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Marmara Denizi'nin güneyi boyunca uzandığı bölgede hem sismik aktivite çok yüksek ve hem de zemin koşulları son derece elverişsizdir. Çeşitli projelerle ilgili

olarak bölgede yapılan zemin araştırmaları, zemin tabakalarının sıkışabilme özelliğinin çok yüksek olduğunu ve ayrıca bazı bölgelerdeki zeminlerin sıvılaşma potansiyeli gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle Adapazarı, Gölcük ve Yalova’da meydana gelen hasarların başlıca sebebinin zemin problemlerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Buna karşılık, ciddi ve bilimsel zemin araştırmalarına dayanan temel mühendisliğı çözümlerinin uygulandığı projelerde örneğın, 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, devrildiğı, yana yattığı veya zemin katların bodrum kata dönüştüğü tespit edilmiştir.

Alüviyal zeminlerin yaygın şekilde gözleendiğı deprem bölgesinde, deprem sırasında meydana gelen titreşimler bu zeminlerin içerdığı 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 değere 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.

Aşağıdaki paragraflarda deprem bölgesinin çeşitli bölümlerindeki zemin koşulları ve sıvılaşma davranışı incelenmiştir.

**Düzce Ovası:** Düzce Ovası’nda oldukça kalın alüviyal malzeme ve ova göl çökelleri yer almaktadır. Ova boyunca bazı kesimlerde kum ve çakıl mercekleri gözlenmesine rağmen, bu zeminler silt ve kil gibi ince taneleri de beraberinde içermektedir.

Yeraltı suyu tablasının yüzeyden derinliğinin 2 ile 5 m arasında değıştiğı bilinen ovada, muhtemelen kumlu zonların fazla ince tane içermesi ve kil düzeylerinin varlığı nedeniyle sıvılaşma gözlenmemiştir. Bununla birlikte, Düzce ilçesinde

meydana gelen hasarlarda zeminlerin nispeten gevşek ve yumuşak özellikte olması nedeniyle, kırılmadan kaynaklanan titreşimlerin faya yakınlık ve alüvyon kalınlığı ile orantılı olarak büyütülerek (zemin büyütmesi) yapılara aktarılmış olması da önemli ölçüde etkin olmuştur.

**Adapazarı Ovası:** Ova, başta Sakarya Nehri olmak üzere, çok sayıda akarsuyun depoladığı ve Sapanca Gölü'nden Akyazı'nın doğusuna geniş alanlar kaplayan alüvyal malzeme ile örtülüdür. Ovada sık kumlu seviyelerin yaygın ve yeraltı suyu seviyesinin 1-2 m gibi derinliklerde yer alarak yüzeye son derece yakın olması, deprem sırasında sıvılaşmanın meydana gelmesi için uygun koşulları hazırlamıştır.

**Sapanca Gölü-İzmit Körfezi Arası:** Bu alan ve İzmit kentinin kıyıya yakın kesimleri alüvyal malzeme üzerinde bulunmaktadır. Bu alanda faya yakın bazı yapılar tamamen yıkılmış, çoğu da ağır hasara uğramıştır. İzmit'in alüvyon üzerinde kalan semtlerindeki yapılarda ağır hasar meydana gelirken, kentin girişinde ve karayolunun hemen kuzeyindeki kaya zemin üzerinde kalan yapılarda ise hasar yoktur. Sıvılaşma ise, Sapanca ilçesinin kuzey kenarındaki Sapanca Gölü'nün kıyısında meydana gelmiştir. Bu bölgede %90'dan fazla kum içeren ve SP grubunda yer alan zemin bulunmaktadır.

### **3.2. Adapazarı Bölgesinin Jeolojisi ve Jeomorfolojisi**

Adapazarı şehri, uzun doğrultuda Sapanca Gölü - Hendek güneybatısı arasında 32 km, kısa doğrultuda Kuzeyde Mağara Boğazı -Güneyde Akyazı batısı arasında 27 km kadar uzanan yaklaşık bir paralelkenar biçimindeki Adapazarı Ovası'nın batı kısmında kurulmuştur. Şehir alüviyal dolgu üzerinde ve yayılmanın daha ziyade kuzey - güney doğrultusunda olduğu tipik bir ova kentidir. Adapazarı şehrinin kurulmuş olduğu saha genelde düz bir görünüm ihtiva etmekte olup şehir merkezinin deniz seviyesine göre yüksekliği genelde 31m civarındadır. Bu yükseklik kuzeydoğu (NE) istikametinde ‰ 0.5, kuzeybatı (NW) istikametinde ‰ 0.2' lik bir eğimle azalma gösterir. Kentleşme sınırlarındaki bu düzlüğü batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkiileri kısmen bozmaktadırlar. Şekil 3.3'de Adapazarı'nın morfolojik bir krokisi gösterilmiştir.

### Şekil 3.3. Adapazarı' nın KD' dan GB' ya doğru morfolojik görünümü

Adapazarı ve çevresinde görülen başlıca litolojik birimler şöyle özetlenebilir: Adapazarı' nın kuzeyindeki Armutluk Tepe (180 m) ve Sivri Tepe (236 m) gibi yüksek kısımlarda Devoniyen'e ait kırmızımsı mor kumtaşı ve kuvarsitler bulunmaktadır. Adapazarı kentinin güneybatısında Kuzeyde Gökçeören Ovası ve Güneyde Sapanca Çukuru ile sınırlı tepelik bir saha bulunmaktadır. Adapazarı Ovasına doğru bir burun gibi sokulan bu bölge Üst Kretase'ye ait marnlı ve kumtaşı kalkerlerden ibarettir. Batıda Serdivan'dan itibaren başlayan Eosen flişi bu Üst Kretase oluşukları ile uyumsuz olarak bulunur. Serdivan kuzeyinde ise Üst Kretase oluşukları üzerinde bazalt, aglomera ve tüflerden ibaret bir volkanik birlik bulunur. Adapazarı ve çevresinin büyük bir kısmını Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin getirdiği çakıllı ve siltli kumlar içeren Kuvaterner alüvyon birikintileri oluşturur. Ova kenarlarında düşük olan alüvyon kalınlığı, ova ortalarına doğru 150 m kalınlığa ulaşmaktadır. Genellikle çakıl-kum-silt serileri devamlı bir şekilde görülür. Bu birikintiler merceksi veya bant şekilde düşük plastisiteli kil ve silt serileri içerirler. Kil, kum, çakıl ve silt bazen tek başlarına belli seviyelerde bazen de bunların değişik kombinasyonları şeklinde ardalanmalı olarak görülmektedir. Türkiye kuzeyinde doğudan-batıya uzanan Kuzey Anadolu Fayı'ndan dolayı tektonik açıdan aktif bir

konumdadır. Adapazarı kenti aynı zamanda kalınca bir alüviyal dolgu yani zayıf bir zeminde yer alması sebebiyle muhtelif tarihlerde meydana gelmiş olan şiddetli depremlerden büyük hasar görmüştür. Jeoloji ve yerel zemin şartlarından dolayı, deprem esnasında sıvılaşma potansiyeli açısından da büyük kaygı uyandırmaktadır (Önalp ve Bol, 1998).

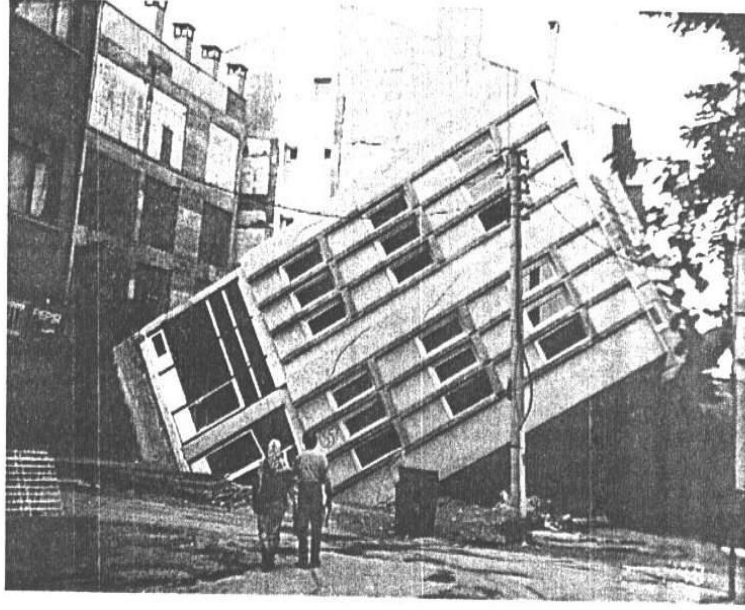
### **3.3 17 Ağustos 1999 Depremi Sonrası Adapazarı Kenti'nde Geoteknik Gözlem ve Değerlendirmeler**

Adapazarı'nda birkaç istisna dışında bütün binalar sığ temeller üzerine oturmakta olup, üç veya daha fazla katlı binaların büyük bir çoğunluğu radye temel sistemine sahiptir. Şehir genelinde gerek yeraltı suyu seviyesinin yüzeye çok yakın olması, gerekse yüzey zeminlerinin yüksek geçirgenliği nedeniyle temel derinlikleri 1-1.5 m civarındadır. Deprem öncesinde zemin emniyetli taşıma gücünün  $0.8-1.0 \text{ kg/cm}^2$  alındığı Adapazarı'nda temel tasarımında sıvılaşma faktörünün genel olarak gözardı edildiği anlaşılmaktadır.

Adapazarı'nda ağır yapısal hasar, şehir merkezinde, İzmit Caddesi civarından başlayarak Çark Caddesinin kuzeyine uzanan bir alanda yoğunlaşmaktadır. Sıvılaşmalar ise daha yoğun olarak Çark ve Sedat Kireçtepe Caddeleri civarında meydana gelmiştir. Deprem sonrasında bina temellerinde meydana gelen deformasyonlara ilişkin gözlemler, bu bölgede yer alan sıvılaşabilir nitelikteki suya doygun yüzey zeminlerinin kuvvetli yer hareketine bağlı olarak önemli miktarlarda dayanım kaybettiklerini göstermektedir.

Adapazarı il merkezinde sıvılaşma nedeniyle ağır betonarme yapıların önemli bir bölümü; yana, öne veya geriye yatarak, devrilerek, oturmaya maruz kalarak ve zeminin içine çökerek hasara uğramış veya yıkılmıştır (Şekil 3.4). Şekil 3.5 ve 3.6'da sunulan fotoğraflar, dayanım kaybına uğrayan zeminler üzerinde yeralan binaların temellerinde deprem sonrasında gözlenen deformasyonların boyutları hakkında bir fikir vermektedir. Fotoğraflarda da görüldüğü gibi, temelleri aşırı oturma ve/veya eğilmeye maruz kalmış binalarda genel olarak ciddi taşıyıcı sistem hasarı mevcut değildir. Bu gözlem, Bölüm 2.9'da açıklandığı gibi, depremlerde yapısal hasarın ana nedeni olan kayma dalgalarının Adapazarı'nda dayanım kaybına uğrayan yüzey zeminleri tarafından sönmümlendiklerini ortaya koymaktadır.

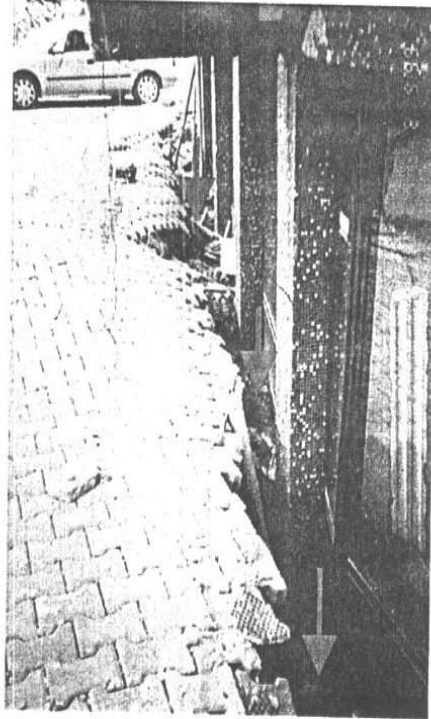
( a )



( b )



( c )



Şekil 3.4. Adapazarı'nda sivilaşma sonucu (a) devrilmiş, (b) geriye yatmış, (c) zemine oturmuş binalara tipik örnekler.



Şekil 3.5. Adapazarı'nda eğilme formunda aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış binalar.



Şekil 3.6 Adapazarı'nda oturma formunda (yaklaşık 1m) aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış bir bina.

Sıvılaşmadan etkilenen binalarda radye temeller yapısal bütünlüklerini muhafaza etmişlerdir (Şekil 3.7). Burada dikkati çeken bir husus, 1-2 katlı binaların temellerinde genel olarak kayda değer deformasyonların meydana gelmemiş olmasıdır. Bu gözlem, zeminlerde meydana gelen dayanım kaybının nisbeten daha hafif yapıları etkileyecek düzeye ulaşmadığını göstermektedir. Bitişik nizam bloklar içerisinde yer alan binalarda temel deformasyonlarının çok daha küçük ölçeklerde ve genellikle blok boyunca oturma şeklinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.8).

Sıvılaşma, yapılarda neden olduğu deformasyonun yanısıra, yapıların ve yolların kenarlarında, bahçelerde ve açık alanlarda gözlenen kum kaynamaları şeklinde kendini göstermiştir (Şekil 3.9). Çark Caddesi civarında birkaç sokakta oturmuş olan bloklar boyunca sıvılaşmanın açık kanıtı olan zemin yüzeyine fişkırmış silt ve ince kum ihtiva eden öbekler gözlenmiştir (Şekil 3.10).

Binaların zemine batması nedeniyle sıkışan temel zemini malzemesi yanlara doğru harekete geçerek bina kenarlarındaki kaldırım ve yollarda kabarmalara neden olmuştur (Şekil 3.11 ve 3.12). Yol, kaldırım ve yapılaşma nedeniyle yerleşim birimlerinde zemin profilinin görülmesi her yerde mümkün olamamakta, dolayısıyla bu durum sıvılaşmanın her yerde belirgin şekilde görülmesini engellemektedir.

Bununla birlikte, Adapazarı'nda kum fişkirmalarının ve konilerinin gözlenemediği, ancak yana yatmış veya gömülmüş çok sayıdaki binanın zemininde de sıvılaşmanın etkin olduğu söylenebilir. Tekil veya sürekli temellerle taşıtılan binalar büyük ölçüde sıvılaşmadan etkilenmesine rağmen, kazıklı temel sistemleri üzerine inşa edilmiş olmaları nedeniyle bazı yapılarda (Vakıfbank, Ziraat Bankası, Toyota Fabrikası gibi) ise, herhangi bir deformasyon veya hasar gözlenmemiştir (Şekil 3.13).

Adapazarı'nın batısındaki yüksek kesimlerde ve kaya birimler üzerinde yer alan semtlerdeki yapılarda hasar yoktur. Bu belirleme, yeraltı suyu tablasının çok sık olduğu ve 1967 depreminden sonra da zayıf-gevşek birimler üzerinde gelişimine devam etmiş olan Adapazarı'nda, sıvılaşma ve zemin büyütmesi gibi zeminle ilgili faktörlerin hasarlar üzerinde ne denli etkili olduğunu göstermektedir.

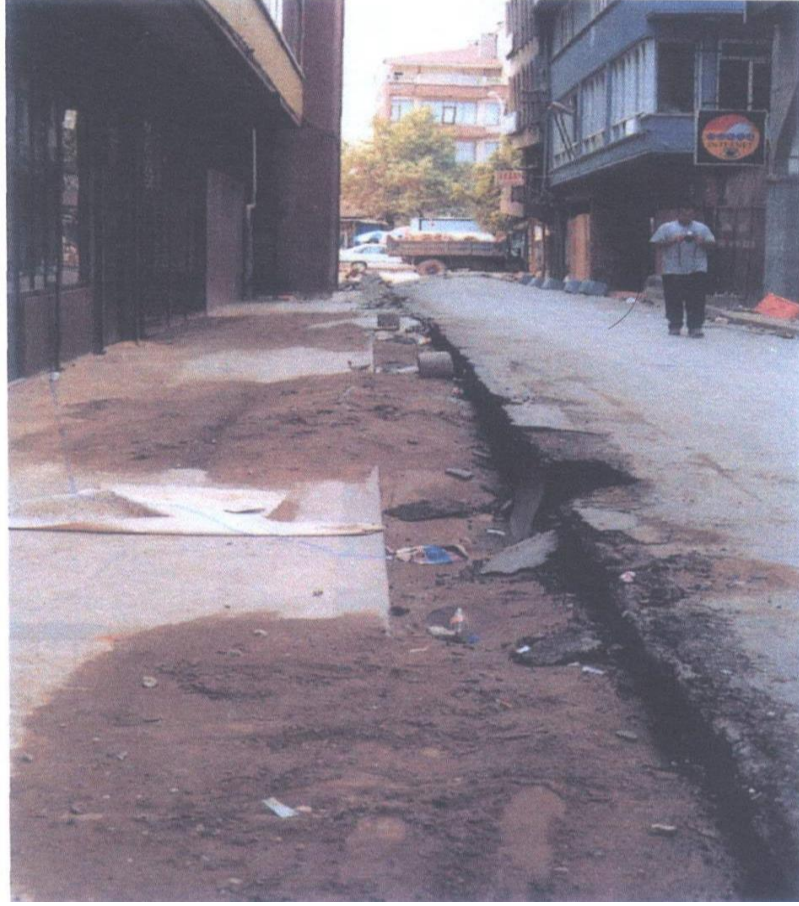


Şekil 3.7. Adapazarı'nda eğilme deformasyonu sonucunda bir bölümü açıkta kalan radye temel.



Şekil 3.8. Bitişik nizam bloklarda meydana gelen oturmalar.

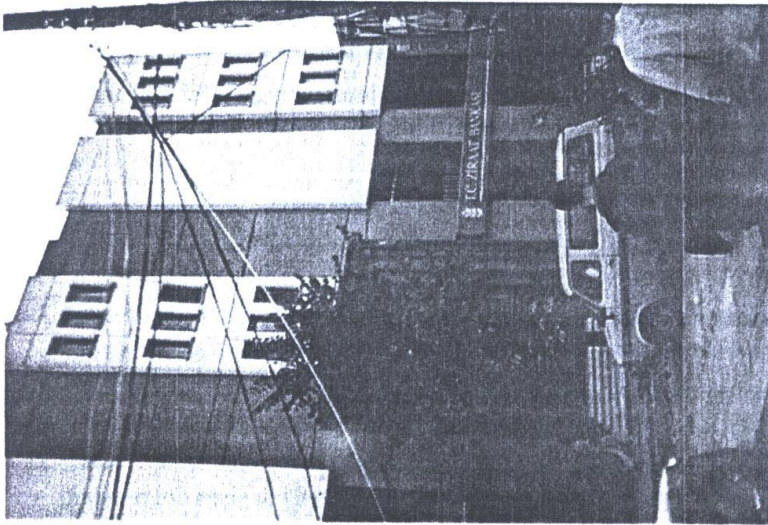
Şekil 3.9. Adapazarı'nda sıvılaşmaya bağlı tipik kum kaynamaları : (a) Tığcılar Mahallesi'nde yeni bir yapı, (b) Başak Traktör Fabrikası'nın bahçesi.



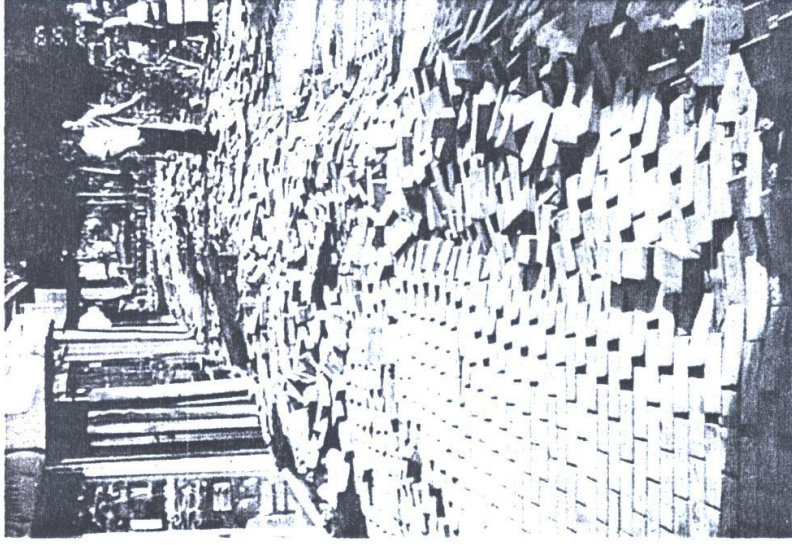
Şekil 3.10. Adapazarı Çark Caddesi civarında bir sokak boyunca yüzeye fişkırmış silt ve ince kum öbekleri.



Şekil 3.11. Zemin deformasyonlarına bağlı olarak yol ve kaldırımlarda meydana gelen kabarmalar.



Şekil 3.13. Adapazarı'nda kazık temel üzerine oturan hasarsız yapılara bir örnek.



Şekil 3.12. Sıvılaşma nedeniyle zemine gömülen binaların çevresindeki kabarma (Adapazarı , Bulvar Caddesi).

Sıvılaşmalar yer yer Sapanca Gölü kıyılarında da meydana gelmiştir. Gölün, Adapazarı'na yaklaşık 5 km mesafede yer alan doğu kıyısında, sıvılaşmaya bağlı olduğu düşünölen oturmalar sonucunda sahil şeridi kısmen gölün suları altında kalmıştır (şekil 3.14). Bu kesimde yoğun olarak gözlenen fişkırmış kum öbekleri zeminin yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (şekil 3.15).

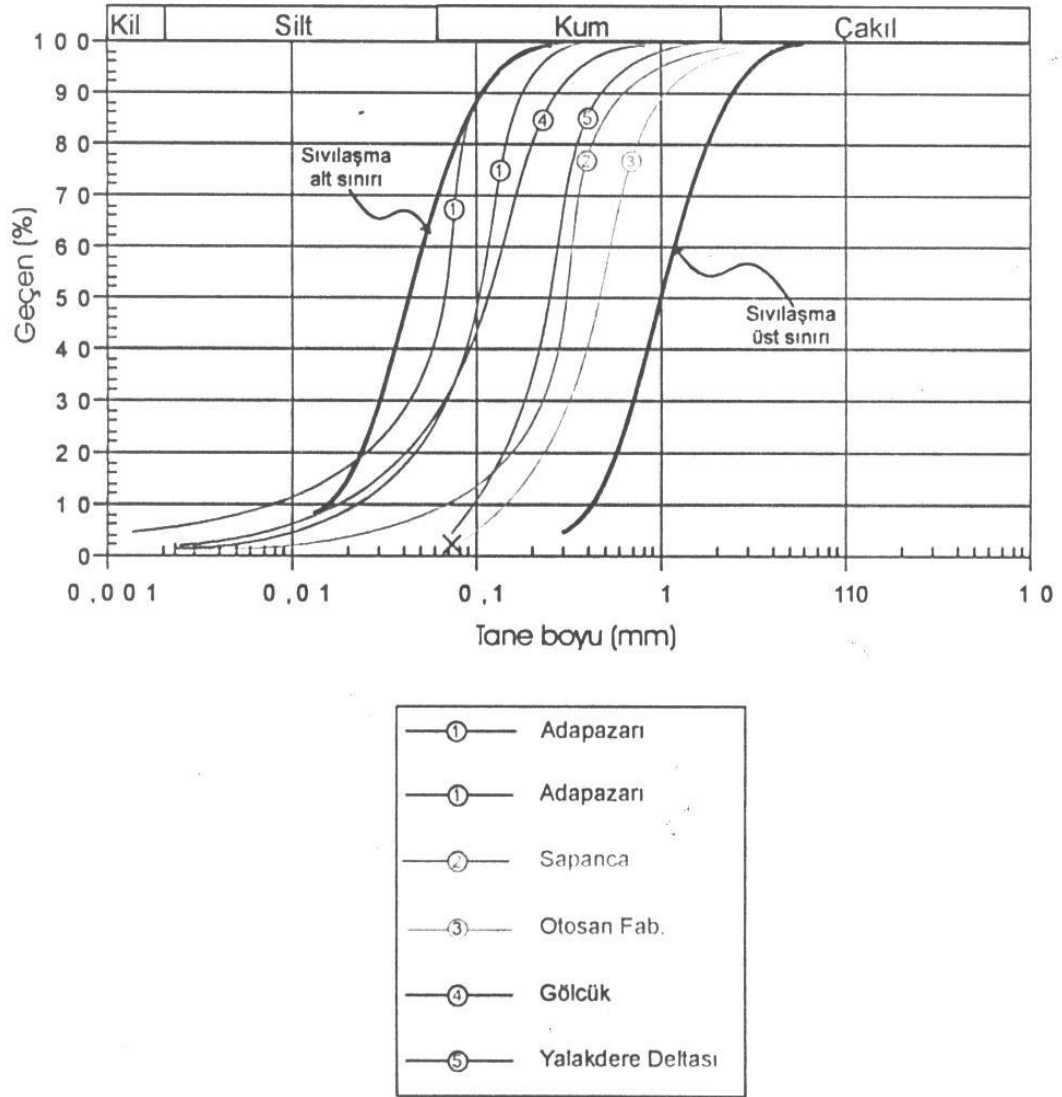


şekil 3.14. Sapanca Gölü'nün doğu sahilinde sıvılaşmaya bağlı oturmalar



şekil 3.15. Sapanca Gölü'nün doğu sahilinde yüzey çatlakları ve kum fişkırmaları

Sıvılaşma lokasyonlarından alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan sınıflama deneylerinin sonuçları, bu zeminlerin ağırlıklı olarak kum ve daha az miktarda da silt tane boyutundaki malzemeden meydana geldiğini ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'na göre siltli kum ve kötü derecelenmiş kumların yer aldığı SM ve SP grubu zeminler olduklarını göstermiştir. Ayrıca bu zeminlerin tane boyu dağılımları da sıvılaşmaya eğilimli zeminler için gayet iyi bilinen tane boyu dağılımı aralığının alt ve üst sınırları arasında kalmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. 17 Ağustos Depreminin etkilediği bölgede değişik lokasyonlarda sıvılaşan zeminlere ait tipik tane boyu dağılımı eğrileri ve sıvılaşma sınırları.

### **3.4. Zemin Büyütmesi ve Adapazarı'nda Yapısal Hasarlara Etkisi**

#### **3.4.1. Mikrobölgelemenin Tanımı ve Önemi**

Depremler esnasında yapısal hasarlara neden olan en önemli faktörlerden biri, yerel şartların deprem dalgaları üzerindeki büyütme etkisidir. Bu hasarların azaltılması ve yapıların deprem yükleri altında güvenliğinin sağlanması için yerel zemin koşullarının yer hareketleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi gerekmektedir.

Depremler sırasında oluşan yer hareketleri, yapılara etkileyen sismik kuvvetleri doğrudan etkilediği gibi aynı zamanda deprem sırasında zemin tabakalarının davranışı ve zemin göçmesi açısından da çok önemlidir. Bu gözlemler ışığında, gerek deprem şartnamelerinde gerekse mikrobölgeleme çalışmalarında yerel zemin koşullarını dikkate almak yönünde çalışmalar yoğunlaşmaktadır.

Mikrobölgeleme, depremler sebebiyle mühendislik yapıları üzerinde meydana gelen dolaylı ve dolaysız hasarları azaltmak için yapılaşmayı uygun şekilde yönlendirmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bunu gerçekleştirebilmek için jeolojik, sismolojik ve geoteknik faktörler, ekonomik ve sosyolojik faktörlerle birarada değerlendirilir, uygun bölgelemeler ve bu bölgelerde üst yapı tasarımında ve mevcut yapıların takviyesinde dikkate alınacak kriterler önerilir. Mikrobölgelemede, ana kaya formasyonu ile üst yapı arasında, deprem dalgaları için bir geçiş ortamı oluşturan yerel zemin koşulları, oldukça önemli bir rol oynar. Depremlerde sadece yerel zemin koşullarının sebep olduğu hasarlar, yerel şartların deprem dalgaları üzerindeki büyütme etkisi, sıvılaşma sebebiyle temel zemininin tamamen mukavemetini kaybetmesi, şev kaymaları ve heyelanlar sebebiyle meydana gelen büyük yer değiştirmeler ve temel zemininin sıkılaşması ile meydana gelen oturmalar şeklinde sıralanabilir. Zemin büyütme etkilerine göre oluşturulmuş mikrobölgelemeler, yapıların depremlerde göreceği hasarların azaltılmasında, deprem ve yapı özellikleri ile birlikte değerlendirilir. Bir bölgedeki zemin tabakalarının büyütme potansiyelinin yüksek olması, bu bölgede yer alan yapıların depremler sırasında kesin olarak hasar göreceği anlamına gelmez. Hasar, depremin, üst yapının ve zemin tabakalarının frekansa bağlı davranışları arasındaki etkileşimin mertebesine ve depremin büyüklüğüne bağlı olarak çeşitli derecelerde meydana gelebilir. Zemin tabakaları ile üst yapının aynı periyotla hareket etmesi, yani rezonans durumu, hasar potansiyelini arttıran önemli bir durum iken, bundan daha önemli olan, deprem dalgalarının hakim

periyodunun da aynı değerlerde olmasıdır. Bu durumda hem zemin tabakalarının hem de üst yapının rezonansa uğraması söz konusudur ve çifte rezonans olarak adlandırılır (Lav, 1994).

Yer hareketi üzerinde yerel etkilerin neler olduğu konusunu incelerken, bir bölgede; ulaşan deprem dalgalarının özelliklerinin nasıl olduğu, yerel zemin ve geometrik şartların nasıl olduğu, yer hareketlerinin etkilerini göstermek için hangi parametrelerin kullanıldığı konularının dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü;

i- Depremlerde ortaya çıkan dalgaların özelliklerine bağlı olarak bu bölge farklı davranışlar gösterebilmektedir.

ii- Yerel zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak gelen dalga ortamının frekans içeriği, genliği ve süresi bu ortam tarafından değiştirilerek yüzeye iletilmektedir. Ana kaya topoğrafyası, yüzey topoğrafyası ve tabakalaşmanın çeşitli geometrik şekilleri dalgaların kırılma ve yansıma şekillerini etkileyebilmektedir.

iii- Yerel şartlar yer hareketinin özelliklerini ifade etmekte kullanılan parametreleri farklı şekillerde etkileyebilmektedir.

Depremler sırasında oluşan yer hareketleri, kaynak, izlenen yol ve arazi özellikleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle oluşacak yer hareketlerinin değerlendirilmesi için bölgesel sismisite, yer hareketlerinin sönümlenmesi, yerel arazi koşulları gibi faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Yerel zemin koşullarının depremin yol açtığı hasara etkisi uzun zamandan beri bilinmekle beraber bu konuda aletsel ölçümlerde ve hesap çalışmalarında son 45 yılda önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Bu konudaki ilk önemli bilgiler 1957 San Fransisco depreminde değişik noktalarda alınan bazı ölçümlerden elde edilmiştir. Bu ölçümler, birbirine yakın bölgelerde oluşan yer ivmelerinin bazen birbirinden %100'e varan farklılıklar gösterdiğini ve bunun büyük olasılıkla ölçüm istasyonları altındaki zemin koşullarından ileri geldiğini ortaya koymuştur (Özaydın, 1996).

#### **3.4.2. Adapazarı'ndaki Alüvyon Zeminlerde Yüzey Hareketine İlişkin Çalışmalar**

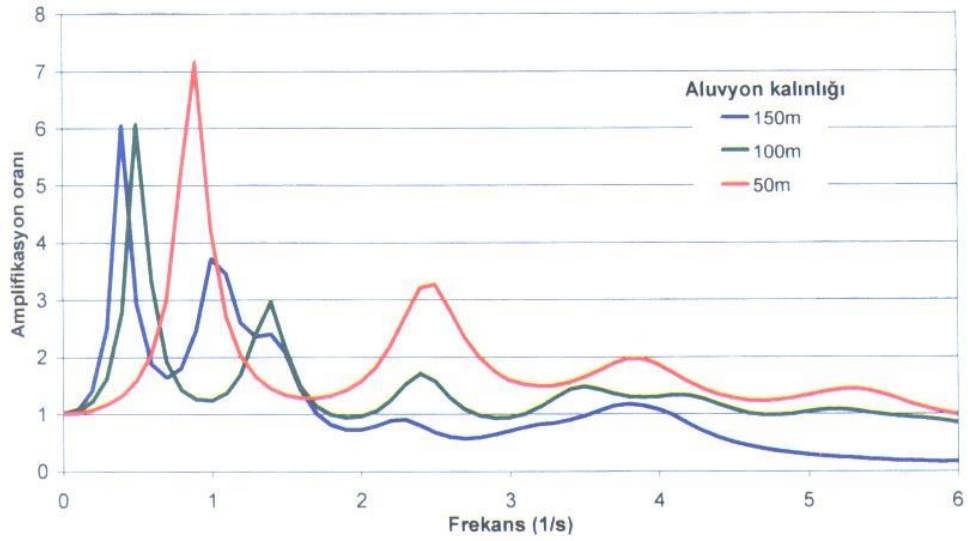
Adapazarı'nda ivme kayıtları şehrin sağlam zeminler üzerinde yer alan, yapısal hasarın göreceli olarak çok daha az olduğu kesiminde alınmıştır. Anakaya

formasyonu şehrin altında kuzeye doğru alçalarak, alüvyon zeminlerin altında 150 m'yi aşan derinliklere ulaşmaktadır. Şehrin alüvyon zeminler üzerinde yer alan ağır hasarlı kesiminde, yüzey hareketinin alüvyon tabakaları ve anakaya eğiminden kaynaklanan etkiler sonucunda süre, frekans içeriği ve maksimum değerler bakımından, alınan kayıtlardan önemli farklılıklar göstermiş olması beklenmelidir.

Bakır ve Yılmaz (2000), tarafından şehrin alüvyon zeminler üzerinde yer alan kesiminde yüzeyde kuvvetli yer hareketinin farklılaşmasına ilişkin bir ön çalışma olarak SHAKE programının kullanıldığı 1-boyutlu analizler yapılmıştır. Buna göre farklı kalınlıklardaki alüvyon zeminlerin yüzeydeki yer hareketi üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla analizler, idealize edilen profilde anakaya derinlikleri 50, 100 ve 150 m alınarak yapılmıştır. Analizler sonucunda farklı alüvyon kalınlıkları için elde edilen yüzey hareketlerinin ivme-zaman grafikleri ve Adapazarı'nda alınan yüzey kaydı Şekil 3.17'de verilmektedir. Grafikler birlikte değerlendirildiğinde, artan alüvyon kalınlığıyla birlikte hareketin yüksek frekanslı bileşenlerinin etkilerinin, bekleneceği şekilde, belirgin olarak azaldığı görülmektedir. Yüzeydeki maksimum ivme değerleri ise, artan alüvyon kalınlığı ile birlikte profilde meydana gelen yumuşamaya bağlı olarak azalmaktadır.

Şekil 3.17. Analizler sonucunda farklı alüvyon kalınlıkları için elde edilen yüzey hareketlerinin ivme-zaman grafikleri ve Adapazarı'nda alınan yüzey kaydı.

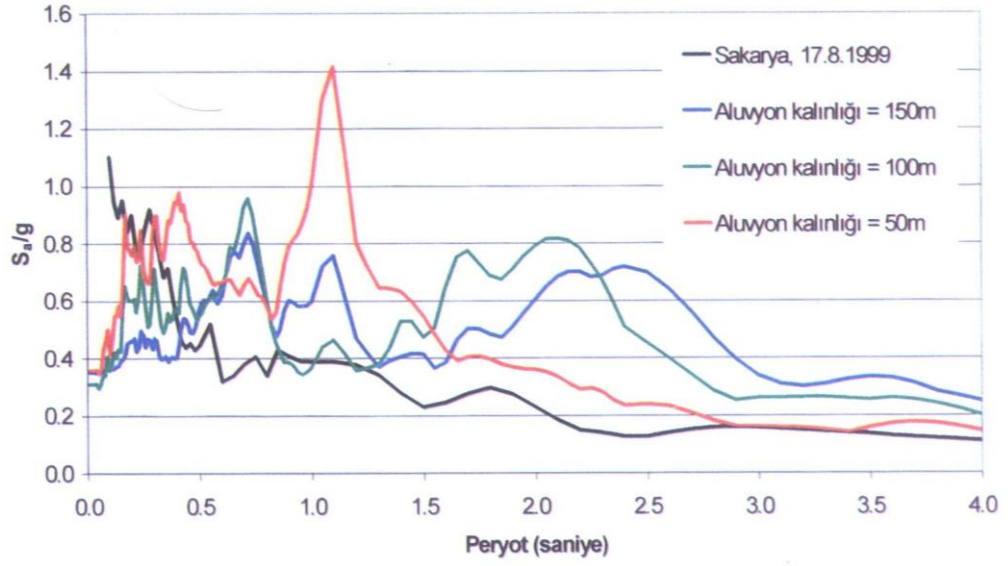
Farklı alüvyon kalınlıkları için hesaplanan büyütme oranlarının (yüzey/anakaya) frekansla değişimi Şekil 3.18’de sunulmuştur. Alüvyon zeminin 50, 100 ve 150 m kalınlıkları için zemin hakim periyotları, kuvvetli yer hareketine bağlı olarak, sırasıyla, 1.1, 2.0, 2.5 sn olarak hesaplanmaktadır. Küçük birim kayma deformasyonları durumu için hesaplanan zemin hakim periyotları ise, sırasıyla, 0.9, 1.5, 1.9 sn’dir. Analizlerde kullanılan her üç alüvyon kalınlığı için de, zemin hakim periyodu değerleri Adapazarı’nda mevcut bina stoğunun birinci doğal periyot aralığıyla (0.2-0.5 sn) karşılaştırıldığında oldukça yüksektir.



Şekil 3.18. Farklı alüvyon kalınlıkları için hesaplanan büyütme oranları.

Şekil 3.19’da, Adapazarı’nda alınan yüzey kaydının spektral ivme grafiği, farklı kalınlıklardaki alüvyon zeminler için hesaplanan yüzey hareketlerinin spektral ivme grafikleriyle karşılaştırılmaktadır. Burada, alüvyon zeminlere ait spektral ivmelerin, her üç alüvyon kalınlığı için de 0.4 sn civarından başlayarak daha büyük periyotlarda, yüzey kaydına ait spektral ivmelere kıyasla daha büyük değerler aldıkları görülmektedir.

Hesaplanan ve kaydedilen yüzey hareketlerinin spektral ivme değerleri arasındaki farklar, 0.4-0.5 sn periyot aralığında 0.1-0.4 g arasında değişmektedir. Bu durumda Adapazarı’nda farklı kalınlıklardaki alüvyon zeminler üzerinde yer alan 4 ve daha çok katlı binaların, ivme kaydının alındığı kesimde yer alan aynı kategorideki binalara oranla daha büyük ivme tesirlerine maruz kaldığı söylenebilir.



Şekil 3.19. Adapazarı'nda alınan yüzey kaydının ve farklı kalınlıklardaki alüvyon zeminler için hesaplanan yüzey hareketlerinin spektral ivme grafikleri (% 5 sönüm oranı için).

Adapazarı'nda, yüzeyde zemin hareketlerinin aşırı büyümesi sonucunda yol kaplamaları ve kaldırımlarda yoğun çatlamlar meydana gelmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Yüzeyde zemin hareketlerinin aşırı büyümesi sonucunda yol kaplamaları ve kaldırımlarda meydana gelen yoğun çatlamlar.

### **3.5. Yeni Deprem Yönetmeliğinde Sıvılaşma İle İlgili Hüküm ve Bilgiler**

Tablo 3.1’de 1998’de yürürlüğe giren deprem yönetmeliğinde zemin ve temel mühendisliği ile ilgili hususlarda yapılan değişiklik ve ilaveler sonucunda zemin koşullarının belirlenmesi gösterilmiştir (Deprem Şartnamesi Tablo 12.1). Yerel zemin sınıfları ise Tablo 3.2’deki gibidir.

Tablo 3.1 – Zemin Grupları

Tablo 3.2 – Yerel Zemin Sınıfları

Daha önceki deprem şartnamelerindeki eksikliklerden biri olan zemin sıvılaşmasına karşı 1998 Deprem Şartnamesinde bir madde eklenerek sıvılaşma potansiyelinin incelenmesi zorunluluğu getirilmiştir. Bu maddede, “Sıvılaşma Potansiyelinin İrdelenmesi” başlığı altında “bütün deprem bölgelerinde, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren 10 m olduğu durumlarda Tablo 12.1’de (D) grubuna giren zeminlerde Sıvılaşma Potansiyelinin bulunup bulunmadığının saha ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve sonuçların belgelenmesi zorunludur” denilmektedir. Bu tabloda görüldüğü üzere (D) grubu zeminler yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları ile gevşek kum ve yumuşak kil, siltli kil olarak belirtilmiştir.

### **3.6. Sıvılaşma Kriterleri İle Adapazarı Kent Merkezinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi**

Bu bölümde Adapazarı Kent merkezinde yapılmış olan 43 adet sondaj sonucu elde edilen zemin parametreleri, Bölüm 2.7’de açıklanan Zeminlerde Sıvılaşma Analizi Kriterleri ile değerlendirilmiştir. Böylece kent merkezindeki sıvılaşma potansiyeli yüksek kısımlar tespit edilmiş ve 17 Ağustos 1999 Depremi sonucu sıvılaşma gözlenen bölgelerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca sıvılaşma analizi kriterlerini kendi aralarında da kıyaslama imkanı olmuştur.

Mevcut sondajların ilk 10 m’lik derinliklerinde sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Kriterlerde kullanılması gereken tüm zemin parametreleri her sondajda elde edilememiştir. Dolayısıyla bazı sondajlar tüm sıvılaşma kriterleri ile değerlendirilememiştir. Bazı parametreler ise gerçeğine yakın olarak takdir edilmiştir. Sonuçlarının yanlış olduğu düşünülen bazı SPT–N sayıları değerlendirmeye alınmamıştır. 17 Ağustos 1999 Depremi’nde Sakarya’da ölçülen en yüksek ivme değeri olarak  $a_{max} = 0.4$  g alınmıştır.

Her kuyuda çeşitli seviyeler için sıvılaşma potansiyelleri mevcut kriterler yardımıyla incelenmiştir. Aşağıda, Orta Mahallesinde yapılan SK-1 no’lu sondajın 4.5 m seviyesindeki sıvılaşma potansiyelinin sıvılaşma kriterleri ile belirlenmesi açıklanmıştır.

### 3.6.1. Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri

Bu sondajda yeraltı su seviyesi 1.5 civarındadır. 4.5 m derinlikten alınan numunenin tabii birim hacim ağırlığı  $\gamma_n=1.81 \text{ t/m}^3$ , suya doymun birim hacim ağırlığı ise  $\gamma_d=1.92 \text{ t/m}^3$  olarak bulunmuştur. Buna göre 4.5 m seviyesindeki tabaka için aşağıdaki değerler hesaplanabilir:

Toplam düşey gerilme :  $\sigma_v = 8.469 \text{ t/m}^2$

Boşluk suyu basıncı:  $u = 3 \text{ t/m}^2$

Efektif düşey gerilme :  $\sigma_v' = 5.469 \text{ t/m}^2$

Gerilme indirgeme faktörü :  $r_d = 0.933$

Düzeltilme katsayısı :  $C_N = 1.21$

Buna göre depremin maksimum zemin ivmesi  $a_{\max} = 0.4 \text{ g}$  etkisi ile meydana getireceği ortalama kayma gerilmesi,  $\tau_o$ , denklem (2.21) yardımıyla,  $\tau_o = 2.05 \text{ t/m}^2$  olarak hesaplanır.

Bu zemin tabakası için  $N = 16$  değeri  $C_N$  ile çarpılarak  $N_1 = 19$  değeri elde edilir.  $N_1$  yardımıyla Şekil 2.16'dan  $\alpha = 0.21$  oranı okunur. Bu oran sıvılaşma için gerekli yatay kayma gerilmesi, ( $\tau_s$ ) için verilen denklem (2.20) de yerine konulursa,

$$\tau_s = \alpha * \sigma_v' = 1.15 \text{ t/m}^2$$

olarak bulunur. Bu yöntemde, zemin tabakalarının sıvılaşma emniyet faktörü ( $F_s$ ), denklem (2.19) da belirtildiği gibi  $F_s = \tau_s / \tau_o$  şeklinde ifade edilir. Buna göre,

$$F_s = 1.15 / 2.05 = 0.56 \text{ olarak hesap edilir.}$$

Sonuç olarak SK-1 sondajının bulunduğu kesimde 4.5 m derinlik için bu kritere göre “sıvılaşma potansiyeli vardır” denilebilir.

### 3.6.2. Eşik İvme Kriteri (Dobry ve diğ., 1981)

Eşik ivme kriterinde emniyet faktörü,  $F_a$  için denklem (2.22) de verilen

$$F_a = 1.6 a_t/a_{\max} \text{ eşitliği kullanılmıştır.}$$

Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli eşik ivmesinin denklem (2.23) ile hesabı için kayma dalgası hızı  $v_s$ ' nin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Lav ve Ansal tarafından önerilen (2.24) no'lu denklem kullanılmıştır. Buna göre  $N = 16$

değeri için  $v_s = 241$  m/sn olarak hesaplanır. Bu değer denklem (2.23) de yerine konursa  $a_t = 1.103$  m/sn<sup>2</sup> olarak bulunur.

$$F_a = 1.6 * 1.103 / 3.924 = 0.45 \text{ emniyet değeri elde edilir.}$$

Sonuç olarak SK-1 sondajının bulunduğu kesimde 4.5 m derinlik için bu kritere göre “sıvılaşma potansiyeli vardır” denilebilir.

### 3.6.3. Sıvılaşma İndeksi Kriteri

Bir zemin tabakasının sıvılaşma emniyet faktörü için denklem (2.26) da gösterilen,  $F_L = R / L$  eşitliği kullanılır.

Alınan numunedeki danelerin %50’sinin geçtiği çap olan 0.5 mm için (2.28) no’lu denklem yardımıyla  $B = -0.03$  olarak bulunur. Bu değer (2.27) no’lu denklemde yerine konursa, zeminin sıvılaşma anındaki periyodik kayma direnci oranı,  $R = 0.28$  olarak hesaplanır.

Denklem (2.29) kullanılarak  $L = 0.58$  değeri hesaplanır.

$$F_L = 0.28 / 0.58 = 0.49 \text{ emniyet değeri elde edilir.}$$

Sonuç olarak SK-1 sondajının bulunduğu kesimde 4.5 m derinlik için bu kritere göre “sıvılaşma potansiyeli vardır” denilebilir.

### 3.6.4. Çin Milli Kodu :

**a)** Bu kriterde ince dane yüzdesi gözönüne alınarak hesaplanan  $N_{cr}$  ile arazide ölçülen  $N$  değeri karşılaştırılır.

$d_s = 4.5$  m,  $d_w = 1.5$  m,  $p_c = 3$  ve  $N_o = 16$  değerleri için (2.30) no’lu denklem yardımıyla  $N_{cr} = 19$  olarak hesaplanır.

$N = 16 < N_{cr} = 19$  olduğu için SK-1 sondajının bulunduğu kesimde 4.5 m derinlik için bu kritere göre “sıvılaşma potansiyeli vardır” denilebilir.

**b)** Yukarıdaki değerler (2.31) no’lu denklemde yerlerine konursa  $N_{cr} = 16$  olarak hesaplanır.

$N = N_{cr} = 16$  olduğu için bu kritere göre mevcut tabaka için sıvılaşma hakkında kesin bir yargıya varılamaz.

### 3.6.5. Enerji Metodu

Bu kriterde (2.32) no'lu denklemde yerine konmak üzere depremin büyüklüğü  $M=7.4$ , Adapazarı kent merkezinin depremin odak noktasına olan uzaklığı  $R=45$  km, ve  $N_1 = 19$  değerleri alınmıştır.

$$\frac{10^{1.5*7.4}}{2.28 * 10^{-10} * 19^{11.5} * 45^{4.3}} = 0.1 < 1$$

olduğu için SK-1 sondajının bulunduğu kesimde 4.5 m derinlik için bu kritere göre “sıvılaşma potansiyeli yoktur” denilebilir.

### 3.6.6. Deprem Büyüklüğü Kriteri

$M=7.4$ , depremin büyüklüğü ve  $N=16$ , SPT değeri olmak üzere, denklem (2.33) ve (2.34) yardımıyla,  $CSR_{cr}$  ve  $CSR$  değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$CSR_{cr} = 16 / (12.9*7.4 - 15.7) = 0.201$$

$$CSR = 0.65 * 0.4 * \frac{8.469}{5.469} * 0.933 = 0.375$$

$F = CSR_{cr} / CSR = 0.201 / 0.375 = 0.53 < 1$  olduğu için SK-1 sondajının bulunduğu kesimde 4.5 m derinlik için bu kritere göre “sıvılaşma potansiyeli vardır” denilebilir.

### 3.7. Sonuçlar

Adapazarı Kent merkezinde yapılmış olan 43 adet sondaj sonucu elde edilen zemin parametreleri, yukarıda açıklandığı şekilde Zeminlerde Sıvılaşma Analizi Kriterleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları Tablo 3.3’de özetlenmektedir. Bu tabloda sondajların hangi derinlikleri için analizlerin yapıldığı, bu derinliklerdeki zemin sınıfları ve her kriter için sıvılaşma potansiyelleri belirtilmiştir. Böylece kent merkezindeki sıvılaşma potansiyeli yüksek kesimler mahalle bazında tespit edilmiş ve sıvılaşma analizi kriterleri kendi aralarında kıyaslanmıştır.

Bölüm 2.7’de açıklanan Sıvılaşma Analizi Kriterleri hesaplarında SPT-N değerleri büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu kriterlerden sağlıklı sonuçlar alınabilmesi için arazide yapılan standart penetrasyon deneyinin güvenilir olması gerekmektedir.

Bu tabloda görüldüğü görüldüğü şekilde sıvılaşma analizleri sonucu elde edilen sonuçlar genel olarak birbirleriyle uyum içerisinde. Analizi yapılan bölgelerin büyük bölümünde zeminlerin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Fakat detaylı sıvılaşma analizi yapılmasını gereksiz kılan CL, CH, GW gibi bazı zemin sınıflarında yüksek sıvılaşma potansiyeli tespit edilmesi dikkat çekmektedir. Ayrıca 17 Ağustos Depremi sonucu sıvılaşmadan kaynaklanan hasarların gözlenmediği bazı bölgelerde sıvılaşma potansiyeli olduğu da belirlenmiştir. Önemli miktarda kil içeren zeminlerde SPT-N değeri çok küçük değerler aldığı için ilgili zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı olan mukavemeti de son derece az bulunmaktadır. Dolayısıyla SPT-N sayısına dayanan sıvılaşma analizlerinde plastik ince dane miktarı ve ortalama dane çapı gibi dane özelliklerinin etkileri de incelenmelidir. Ayrıca sıvılaşmaya etki eden faktörlerden olan gerilme altında kalma süresi, sismik geçmiş, yatay toprak basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı gibi faktörlerin de analizlere dahil edilmesi gerekmektedir.

Adapazarı Merkezi'nde özellikle Cumhuriyet, Orta, Tığcılar, Karaosman ve Semerciler Mahallelerinde sıvılaşma analizlerinin dikkatli bir şekilde yapılması gerektiği görülmektedir. Bu mahallelerden geçen Çark ve Sedat Kireçtepe Caddeleri üzerindeki yüksek yapıların sıvılaşma sonucu hasar gördükleri yerinde yapılan gözlemlerle tespit edilmiştir.

Tablo 3.3. Adapazarı'nda mahallelere göre zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri

| Sıra No | Sondaj No | z (m) | Zemin Sınıfı | Mahalle    | Sıvılaşma |          |          |          |          |          |          |
|---------|-----------|-------|--------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         |           |       |              |            | Kriter 1  | Kriter 2 | Kriter 3 | Krit. 4a | Krit. 4b | Kriter 5 | Kriter 6 |
| 1       | i-3       | 1.5   | ML           | şeker      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 2       | i-3       | 3     | ML           | şeker      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 3       | i-3       | 5.2   | ML           | şeker      | +         | +        | +        | +        | -        | +        | +        |
| 4       | i-3       | 7.5   | ML           | şeker      | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 5       | i-3       | 9     | CH           | şeker      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 6       | i-4       | 1.5   | CH-MH        | şeker      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 7       | i-4       | 3.5   | CH-MH        | şeker      | +         | +        |          | -        | -        | +        | +        |
| 8       | i-4       | 4.5   | CH-MH        | şeker      | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 9       | i-4       | 6     | CL-ML        | şeker      | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 10      | i-4       | 7.5   | CL-ML        | şeker      | +         | +        |          | -        | -        | +        | +        |
| 11      | i-5       | 1.5   | CL-CH        | cumhuriyet | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 12      | i-5       | 3     | CL-CH        | cumhuriyet | +         | +        | +        | -        | -        | +        | +        |
| 13      | i-5       | 4.5   | SW-SP        | cumhuriyet | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 14      | i-5       | 6     | SW-SP        | cumhuriyet | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 15      | i-6       | 1.5   | CL-ML        | ozanlar    | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 16      | i-6       | 3     | SM-SC        | ozanlar    | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 17      | i-6       | 5     | SW-SP        | ozanlar    | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 18      | i-7       | 2     | ML           | istiklal   | +         | +        | -        | -        | -        | +        | +        |
| 19      | i-7       | 3     | ML           | istiklal   | +         | +        | +        | +        | -        | +        | +        |
| 20      | i-7       | 4.5   | ML           | istiklal   | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 21      | i-7       | 6     | SM           | istiklal   | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 22      | i-7       | 7.5   | SM           | istiklal   | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 23      | i-8       | 1.5   | CH           | tekeler    | +         | +        |          | +        | -        | +        | +        |
| 24      | i-8       | 3     | SM           | tekeler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 25      | i-8       | 4.5   | SM           | tekeler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 26      | i-8       | 6     | CL-ML        | tekeler    | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 27      | i-8       | 8.2   | CL-ML        | tekeler    | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 28      | i-9       | 1.5   | ML           | orta       | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 29      | i-9       | 3     | ML           | orta       | -         | -        | +        |          |          | -        | -        |
| 30      | i-9       | 4.5   | ML           | orta       | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 31      | i-9       | 6     | ML           | orta       | +         | +        |          | -        | -        | -        | +        |
| 32      | i-9       | 7.5   | ML           | orta       | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 33      | i-10      | 1.5   | CL-ML        | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 34      | i-10      | 3     | CL-ML        | mithatpaşa | +         | +        |          | -        | -        | +        | +        |
| 35      | i-10      | 4.5   | SW-SP        | mithatpaşa | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 36      | i-10      | 6     | SW-SP        | mithatpaşa | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 37      | i-10      | 7.5   | SW-SP        | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 38      | i-14      | 1.5   | CH-MH        | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 39      | i-14      | 3     | CH-MH        | erenler    | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 40      | i-14      | 4.5   | SM-SC        | erenler    | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 41      | i-14      | 6     | SM-SC        | erenler    | -         | +        | +        | -        | -        | -        | -        |
|         |           |       |              |            |           |          |          |          |          |          |          |

| Sıra No | Sondaj No | z (m) | Zemin Sınıfı | Mahalle    | Sıvılaşma |          |          |          |          |          |          |
|---------|-----------|-------|--------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         |           |       |              |            | Kriter 1  | Kriter 2 | Kriter 3 | Krit. 4a | Krit. 4b | Kriter 5 | Kriter 6 |
| 42      | i-14      | 7.5   | SM-SC        | erenler    | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 43      | i-17      | 1.5   | CL-ML        | tekeler    | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 44      | i-17      | 3.5   | SW           | tekeler    | -         | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| 45      | i-17      | 4.5   | SW           | tekeler    | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 46      | i-17      | 6     | SW           | tekeler    | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 47      | i-18      | 1.5   | SM-SC        | tuzla      | -         | -        |          |          |          | -        | +        |
| 48      | i-18      | 3     | SP           | tuzla      | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 49      | i-18      | 4.5   | CH-MH        | tuzla      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 50      | i-18      | 6     | CH-MH        | tuzla      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 51      | i-18      | 7.5   | CH-MH        | tuzla      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 52      | i-19      | 1.5   | CL-ML        | cumhuriyet | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 53      | i-19      | 3     | SM           | cumhuriyet | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 54      | i-19      | 4.5   | SP           | cumhuriyet | -         | -        |          | -        | -        | -        | -        |
| 55      | i-19      | 6     | SP           | cumhuriyet | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 56      | i-19      | 7.5   | SP           | cumhuriyet | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 57      | i-21      | 1.5   | CL-ML        | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 58      | i-21      | 3     | CL-ML        | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 59      | i-21      | 5     | CL-ML        | mithatpaşa | -         | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| 60      | i-21      | 6     | CH           | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 61      | i-21      | 7.5   | SM-SC        | mithatpaşa | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 62      | i-23      | 1.5   | MH           | akıncılar  | +         | +        |          | -        | -        | +        | +        |
| 63      | i-23      | 3     | CH-MH        | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 64      | i-23      | 4.5   | CH-MH        | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 65      | i-23      | 6     | CH           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 66      | i-23      | 7.5   | CH           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 67      | S-6       | 1.8   | MH           | yağcılar   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 68      | S-6       | 3.8   | ML           | yağcılar   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 69      | S-6       | 5.8   | ML           | yağcılar   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 70      | S-8       | 2.3   | CL-ML        | şeker      | +         | -        |          |          |          | -        | +        |
| 71      | S-8       | 4.5   | CL-ML        | şeker      | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 72      | S-8       | 6.8   | CL-ML        | şeker      | -         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 73      | S-9       | 2.3   | ML           | sakarya    | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 74      | S-9       | 4.5   | ML           | sakarya    | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 75      | S-11      | 2     | ML           | yenicami   | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 76      | S-11      | 4     | ML           | yenicami   | -         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 77      | S-11      | 6     | ML           | yenicami   | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 78      | S-11      | 9.5   | ML           | yenicami   | -         | +        | +        | -        | -        | -        | -        |
| 79      | S-12      | 2     | CL           | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 80      | S-12      | 4     | CH           | mithatpaşa | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 81      | S-12      | 6     | SM           | mithatpaşa | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 82      | S-12      | 9.5   | SM           | mithatpaşa | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 83      | S-15      | 2.3   | SM           | tepekum    | -         | -        | -        |          |          | -        | -        |
| 84      | S-15      | 4.8   | ML           | tepekum    | -         | -        | +        |          |          | -        | -        |
| 85      | S-15      | 7     | ML           | tepekum    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 86      | S-15      | 9.5   | SP-SW        | tepekum    | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 87      | A1        | 1.5   | ML           | yağcılar   | +         | +        | +        | +        | -        | -        | +        |

| Sıra No | Sondaj No | z (m) | Zemin Sınıfı | Mahalle    | Sıvılaşma |          |          |          |          |          |          |
|---------|-----------|-------|--------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         |           |       |              |            | Kriter 1  | Kriter 2 | Kriter 3 | Krit. 4a | Krit. 4b | Kriter 5 | Kriter 6 |
| 88      | A1        | 3.5   | ML           | yağcılar   | +         | +        | +        | -        | -        | +        | +        |
| 89      | A1        | 5     | ML           | yağcılar   | +         | +        | +        | -        | -        | +        | +        |
| 90      | A1        | 6.5   | ML           | yağcılar   | +         | +        |          | -        | -        | -        | +        |
| 91      | A1        | 8     | ML           | yağcılar   | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 92      | A2        | 1.5   | ML           | orta       | +         | +        | -        | -        | -        | -        | +        |
| 93      | A2        | 4.5   | ML           | orta       | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 94      | A2        | 7.5   | SM           | orta       | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 95      | A3        | 1.5   | CL           | yenigün    | +         | +        | +        | +        | -        | +        | +        |
| 96      | A3        | 3.5   | ML           | yenigün    | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 97      | A3        | 5     | ML           | yenigün    | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 98      | A3        | 6.5   | CL           | yenigün    | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 99      | A3        | 9     | SM           | yenigün    | +         | +        | +        |          |          | -        | +        |
| 100     | A4        | 1.5   | SP-SM        | tıgçılar   | -         | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| 101     | A4        | 3     | SP-SM        | tıgçılar   | -         | -        | +        | -        | -        | -        | -        |
| 102     | A4        | 5.5   | SW           | tıgçılar   | -         | +        | +        | -        | -        | -        | -        |
| 103     | A4        | 6.5   | GW           | tıgçılar   | -         | -        |          |          |          | -        | -        |
| 104     | A5        | 1.5   | CL-ML        | tıgçılar   | +         | -        |          | -        | -        | -        | +        |
| 105     | A5        | 3     | CL           | tıgçılar   | +         | +        |          | -        | -        | -        | +        |
| 106     | A5        | 4.5   | SM-SC        | tıgçılar   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 107     | A5        | 6     | SM-SC        | tıgçılar   | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 108     | A6        | 1.5   | CL           | şeker      | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 109     | A6        | 3.5   | CL           | şeker      | +         | +        | +        | -        | -        | +        | +        |
| 110     | A6        | 5     | CL           | şeker      | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 111     | A6        | 6.5   | ML           | şeker      | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 112     | A6        | 9     | ML           | şeker      | +         | +        | +        | -        | -        | -        | +        |
| 113     | A7        | 1.5   | CH           | güllük     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 114     | A7        | 3     | CH           | güllük     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 115     | A7        | 5     | CH           | güllük     | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 116     | A7        | 6.5   | CH           | güllük     | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 117     | A7        | 8     | CH           | güllük     | +         | +        |          |          |          | -        | -        |
| 118     | SK1       | 1.5   | ML           | orta       | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 119     | SK1       | 3     | ML           | orta       | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 120     | SK1       | 4.5   | SP-SM        | orta       | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 121     | SK1       | 6     | SM           | orta       | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 122     | SK1       | 7.5   | SM           | orta       | +         | +        | +        |          |          | -        | +        |
| 123     | SK1       | 9     | SM           | orta       | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 124     | SK2       | 1.5   | MH           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 125     | SK2       | 3     | MH           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 126     | SK2       | 4.5   | ML           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 127     | SK2       | 6     | MH           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 128     | SK2       | 7.5   | ML           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 129     | SK2       | 9     | SM           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 130     | SK3       | 1.5   | SM           | karaosman  | +         | +        | +        |          |          | +        | +        |
| 131     | SK3       | 3     | SW-SM        | karaosman  | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 132     | SK3       | 4.5   | SW-SM        | karaosman  | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
|         |           |       |              |            |           |          |          |          |          |          |          |

| Sıra No | Sondaj No | z (m) | Zemin Sınıfı | Mahalle    | Sıvılaşma |          |          |          |          |          |          |
|---------|-----------|-------|--------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         |           |       |              |            | Kriter 1  | Kriter 2 | Kriter 3 | Krit. 4a | Krit. 4b | Kriter 5 | Kriter 6 |
| 133     | SK3       | 6     | SW-SM        | karaosman  | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 134     | SK3       | 7.5   | SW-SM        | karaosman  | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 135     | SK3       | 9     | SW-SM        | karaosman  | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 136     | SK4       | 1.5   | ML           | erenler    | +         | +        | -        | -        | -        | +        | +        |
| 137     | SK4       | 3     | ML           | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 138     | SK4       | 4.5   | CH           | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 139     | SK4       | 6     | SM           | erenler    | +         | +        | +        |          |          | +        | +        |
| 140     | SK4       | 7.5   | CL-ML        | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 141     | SK4       | 9     | CL           | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 142     | SK5       | 1.5   | MH           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 143     | SK5       | 3     | SW-SM        | semerciler | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 144     | SK5       | 4.5   | SW-SM        | semerciler | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 145     | SK5       | 6     | SW-SM        | semerciler | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 146     | SK5       | 7.5   | ML           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 147     | SK5       | 9     | SM           | semerciler | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 148     | SK6       | 1.5   | CH           | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 149     | SK6       | 3     | CL-ML        | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 150     | SK6       | 4.5   | CL-ML        | semerciler | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 151     | SK6       | 6     | CL-ML        | semerciler | +         | +        |          | -        | -        | +        | +        |
| 152     | SK6       | 7.5   | SM-SC        | semerciler | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 153     | SK6       | 9     | SW           | semerciler | +         | +        | +        | +        | +        | -        | +        |
| 154     | SK7       | 1.5   | ML           | yenigün    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 155     | SK7       | 3     | SM           | yenigün    | +         | +        | +        |          |          | +        | +        |
| 156     | SK7       | 4.5   | ML           | yenigün    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 157     | SK7       | 6     | ML           | yenigün    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 158     | SK7       | 7.5   | ML           | yenigün    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 159     | SK7       | 9     | ML           | yenigün    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 160     | SK8       | 1.5   | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 161     | SK8       | 3     | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 162     | SK8       | 4.5   | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 163     | SK8       | 6     | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 164     | SK8       | 7.5   | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 165     | SK8       | 9     | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 166     | SK9       | 1.5   | ML           | istiklal   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 167     | SK9       | 3     | ML           | istiklal   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 168     | SK9       | 4.5   | ML           | istiklal   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 169     | SK9       | 6     | ML           | istiklal   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 170     | SK9       | 7.5   | ML           | istiklal   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 171     | SK9       | 9     | ML           | istiklal   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 172     | SK10      | 1.5   | CL-ML        | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 173     | SK10      | 3     | CL-ML        | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 174     | SK10      | 4.5   | CL-ML        | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 175     | SK10      | 6     | CL-ML        | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 176     | SK10      | 7.5   | ML           | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 177     | SK10      | 9     | CH           | erenler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 178     | SK11      | 1.5   | ML           | akıncılar  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |

| Sıra No | Sondaj No | z (m) | Zemin Sınıfı | Mahalle     | Sıvılaşma |          |          |          |          |          |          |
|---------|-----------|-------|--------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         |           |       |              |             | Kriter 1  | Kriter 2 | Kriter 3 | Krit. 4a | Krit. 4b | Kriter 5 | Kriter 6 |
| 179     | SK11      | 3     | ML           | akıncılar   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 180     | SK11      | 4.5   | CL-ML        | akıncılar   | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 181     | SK11      | 6     | ML           | akıncılar   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 182     | SK11      | 7.5   | ML           | akıncılar   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 183     | SK11      | 9     | MH           | akıncılar   | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 184     | SK12      | 1.5   | ML           | erenler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 185     | SK12      | 3     | MH           | erenler     | +         | +        | +        | +        | -        | +        | +        |
| 186     | SK12      | 4.5   | ML           | erenler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 187     | SK12      | 6     | ML           | erenler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 188     | SK12      | 7.5   | ML           | erenler     | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 189     | SK12      | 9     | ML           | erenler     | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 190     | SK13      | 1.5   | CL           | güneşler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 191     | SK13      | 3     | CL-ML        | güneşler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 192     | SK13      | 4.5   | CL           | güneşler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 193     | SK13      | 6     | CL           | güneşler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 194     | SK13      | 7.5   | CL-ML        | güneşler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 195     | SK13      | 9     | CH           | güneşler    | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 196     | SK14      | 1.5   | ML           | tekeler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 197     | SK14      | 3     | ML           | tekeler     | +         | +        | +        | +        | -        | +        | +        |
| 198     | SK14      | 4.5   | ML           | tekeler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 199     | SK14      | 6     | ML           | tekeler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 200     | SK14      | 7.5   | ML           | tekeler     | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 201     | SK14      | 9     | SM           | tekeler     | +         | +        | +        |          |          | -        | +        |
| 202     | SK15      | 1.5   | ML           | arabacıları | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 203     | SK15      | 3     | CH           | arabacıları | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 204     | SK15      | 4.5   | ML           | arabacıları | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 205     | SK15      | 6     | ML           | arabacıları | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 206     | SK15      | 7.5   | ML           | arabacıları | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 207     | SK15      | 9     | ML           | arabacıları | +         | +        |          |          |          | -        | +        |
| 208     | SK16      | 1.5   |              | semerciler  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 209     | SK16      | 3     | MH           | semerciler  | +         | +        |          |          |          | +        | +        |
| 210     | SK16      | 4.5   | SP-SM        | semerciler  | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 211     | SK16      | 6     | SP-SM        | semerciler  | +         | +        | +        | +        | +        | +        | +        |
| 212     | SK16      | 7.5   | SP           | semerciler  | -         | +        | +        | -        | -        | -        | -        |
| 213     | SK16      | 9     | SP           | semerciler  | +         | +        | +        | -        | -        | -        | -        |

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

17 Ağustos 1999 Depremi'nde Adapazarı İl Merkezinde gözlemlendiği gibi, sıvılaşma olayı arazide çok sık rastlanmamakla beraber, ortaya çıkması durumunda çok büyük can ve mal kaybına yol açabilmektedir. Bu çalışmada, zeminlerde sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri incelenmiş, bu potansiyelin tespiti amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen kriterler açıklanmıştır. Bu çalışmadaki önemli bir hedef Bölüm 2.7'de ayrıntılarıyla açıklanan Zeminlerde Sıvılaşma Analizi Kriterlerinin arazideki gözlemlere uygunluğunun tespiti yani kriterlerin başarısının 17 Ağustos 1999 Depremi'nde Adapazarı İl Merkezinde gözlenen örneklerle uygulanarak belirlenmesidir. Bu amaçla Adapazarı merkezinde yapılmış olan 43 adet sondaj sonucu elde edilen zemin parametreleri, açıklanan kriterler ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları Bölüm 3.7'de verilen Tablo 3.3'de özetlenmiştir. Bu kriterler, 1998 Deprem Yönetmeliği'nde (D) grubu zeminler olarak belirtilen, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları ile gevşek kum ve yumuşak kil, siltli kil tabakalarına uygulanmıştır. Analiz sonucunda bu bölgede sıvılaşma potansiyelinin bulunup bulunmadığına bakılmıştır.

Sondajlar, sıvılaşma gözlemlenen, sıvılaşma gözlemlenmeyen ve sıvılaşma olduğu konusunda görüş birliği olmayan bölgelerde bulunup bulunmamalarına göre kendi aralarında üç grupta sınıflandırılmış ve bu sondajların yerleri Şekil 4.1'de gösterilen Adapazarı'na ait mahalleleri gösteren bir krokiye işlenmiştir. Buna göre sıvılaşma olduğu genel olarak kabul gören bölgedeki sondaj sayısı 10 olup, bunların sıvılaşma kriterleriyle analizleri sonucu Tablo 4.1'de verilmektedir. Sıvılaşma olmadığı genel kabul gören bölgedeki sondaj sayısı 27'dir. Aynı şekilde bu 27 sondajın sıvılaşma kriterleriyle analizleri sonucu Tablo 4.2'de verilmektedir. Bu tablolardaki (+) işareti ilgili kriter ile yapılan analiz sonucu sıvılaşma potansiyeli tespit edilmesi durumunu, (-) işareti sıvılaşma potansiyeli olmadığının tespit edilmesi durumunu, (\*) işareti ise bu sondajda ilgili kriterin uygulanamadığını göstermek için kullanılmıştır. Sıvılaşma olduğu konusunda görüş birliği olmayan bölgedeki sondajlar ise sıvılaşma analizi kriterlerinin arazideki gözlemlere uygunluğunun tespiti amacıyla kullanılmamıştır.

● Sıvılaşma olduğu genel kabul gören bölgedeki (I) sondajlar (i9, A2, A4, A5, SK1, SK2, SK3, SK5, SK6, SK16).

▲ Sıvılaşma olmadığı genel kabul gören bölgedeki (III) sondajlar (i3, i4, i6, i8, i10, i14, i17, i18, i21, i23, S6, S8, S9, S11, S12, S15, A1, A3, A6, A7, SK4, SK7, SK8, SK10, SK11, SK12, SK14).

■ Sıvılaşma olduğu konusunda görüş birliği olmayan bölgedeki (II) sondajlar (i5, i7, i19, SK9).

Şekil 4.1. Adapazarı merkez mahallelerini gösteren kroki.

Tablo 4.1. Adapazarı'nda Sıvılaşma Gözlenen Bölgedeki Sondajlar ve Kriterlerin Analiz Sonuçları

| Sondaj No | Kriterler |     |     |      |      |     |     | Mahalle    |
|-----------|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|------------|
|           | K-1       | K-2 | K-3 | K-4a | K-4b | K-5 | K-6 |            |
| İ9        | +         | +   | +   | -    | -    | +   | +   | Orta       |
| A2        | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Orta       |
| A4        | -         | +   | +   | -    | -    | -   | -   | Tığcılar   |
| A5        | +         | +   | +   | +    | +    | -   | +   | Tığcılar   |
| SK1       | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Orta       |
| SK2       | +         | +   | *   | *    | *    | +   | +   | Semerciler |
| SK3       | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Karaosman  |
| SK5       | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Semerciler |
| SK6       | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Semerciler |
| SK16      | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Semerciler |

Tablo 4.2. Adapazarı'nda Sıvılaşma Gözlemlenmeyen Bölgedeki Sondajlar ve Kriterlerin Analiz Sonuçları

| Sondaj No | Kriterler |     |     |      |      |     |     | Mahalle    |
|-----------|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|------------|
|           | K-1       | K-2 | K-3 | K-4a | K-4b | K-5 | K-6 |            |
| İ3        | +         | +   | +   | +    | -    | +   | +   | Şeker      |
| İ4        | +         | +   | *   | -    | -    | +   | +   | Şeker      |
| İ6        | +         | +   | +   | -    | -    | -   | +   | Ozanlar    |
| İ8        | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Tekeler    |
| İ10       | +         | +   | *   | -    | -    | +   | +   | Mithatpaşa |
| İ14       | +         | +   | +   | -    | -    | +   | +   | Erenler    |

| Sondaj<br>No | Kriterler |     |     |      |      |     |     | Mahalle    |
|--------------|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|------------|
|              | K-1       | K-2 | K-3 | K-4a | K-4b | K-5 | K-6 |            |
| İ17          | -         | -   | -   | -    | -    | -   | -   | Tekeler    |
| İ18          | +         | +   | +   | +    | -    | +   | +   | Tuzla      |
| İ21          | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Mithatpaşa |
| İ23          | +         | +   | *   | *    | -    | +   | +   | Akıncılar  |
| S6           | +         | +   | *   | *    | *    | +   | +   | Yağcılar   |
| S8           | +         | +   | *   | *    | *    | -   | +   | Şeker      |
| S9           | -         | -   | *   | *    | *    | -   | -   | Sakarya    |
| S11          | +         | +   | +   | -    | -    | -   | +   | Yenicami   |
| S12          | +         | +   | +   | +    | +    | +   | +   | Mithatpaşa |
| S15          | +         | +   | +   | *    | *    | +   | +   | Tepekum    |
| A1           | +         | +   | +   | +    | -    | +   | +   | Yağcılar   |
| A3           | +         | +   | +   | +    | -    | +   | +   | Yenigün    |
| A6           | +         | +   | +   | -    | -    | +   | +   | Şeker      |
| A7           | +         | +   | *   | *    | *    | +   | +   | Güllük     |
| SK4          | +         | +   | +   | -    | -    | +   | +   | Erenler    |
| SK7          | +         | +   | +   | *    | *    | +   | +   | Yenigün    |
| SK8          | +         | +   | *   | *    | *    | +   | +   | Akıncılar  |
| SK10         | +         | +   | *   | *    | *    | +   | +   | Erenler    |
| SK11         | +         | +   | *   | *    | *    | +   | +   | Akıncılar  |
| SK12         | +         | +   | +   | +    | -    | +   | +   | Erenler    |
| SK14         | +         | +   | +   | +    | -    | +   | +   | Tekeler    |

Kriterlerin başarısının sayısal olarak tespiti amacıyla Tablo 4.3’de gösterildiği şekilde, sıvılaşma olan bölgede ve sıvılaşma olmayan bölgede yapılan sondajlarda kriterlerin araziye uygunluğu ayrı ayrı belirlenmiştir. Bunu yaparken sıvılaşma olan bölgede kriterlerin uygulanması sonucu sıvılaşma potansiyeli tespit edilen sondaj sayısı bu bölgedeki toplam sondaj sayısına bölünmüştür. Aynı şekilde sıvılaşma olmayan bölgede kriterlerin uygulanması sonucu sıvılaşma potansiyeli olmadığı tespit edilen sondaj sayısı bu bölgedeki toplam sondaj sayısına bölünmüştür.

Tablo 4.3. Zeminlerde Sıvılaşma Analizi Kriterlerinin Karşılaştırılması

|                         | Sıvılaşma Analizi Kriterleri |                  |                |                 |                 |                |                |
|-------------------------|------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                         | Kriter 1                     | Kriter 2         | Kriter 3       | Kriter 4a       | Kriter 4b       | Kriter 5       | Kriter 6       |
| Sıvılaşma Olan Bölge    | 9/10<br>(% 90)               | 10/10<br>(% 100) | 9/9<br>(% 100) | 7/9<br>(% 78)   | 7/9<br>(% 78)   | 8/10<br>(% 80) | 9/10<br>(% 90) |
| Sıvılaşma Olmayan Bölge | 2/27<br>(% 7)                | 2/27<br>(% 7)    | 1/17<br>(% 6)  | 10/18<br>(% 55) | 15/18<br>(% 83) | 5/27<br>(%19)  | 2/27<br>(% 7)  |
| Ortalama                | % 49                         | % 54             | % 53           | % 67            | % 81            | % 50           | % 49           |

Buna göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir:

1- Tablo 4.3’de görüldüğü gibi Bazaraa (1995) tarafından önerilen ve Değiştirilmiş Çin Kodu olarak isimlendirilen Kriter 4b, bu çalışmada kullanılan sondajlara uygulandığında en gerçekçi sonuçları vermiştir. Adapazarı’nda kil ve silt tabakalarına sıkça rastlanmakla birlikte kumlu zeminler de yoğun bir şekilde ince dane içermektedir. Yüzde olarak ince dane ( $D \leq 0.005$  mm) miktarının analizini de içeren Kriter 4b diğer kriterler göre daha başarılı sonuçlar vermiştir.

2- Seed ve Idriss (1981) tarafından önerilen Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri (Kriter 1) ile Atkinson ve Charlwood (1984) tarafından önerilen Kriter 6, Adapazarı’nda yapılan gözlemlere göre sıvılaşma potansiyelinin analizinde en başarısız sonuçları vermiştir. Bu kriterlerde SPT-N değeri büyük önem taşımaktadır. Özellikle Seed tarafından önerilen ve Şekil 2.16’da gösterilmiş olan düzeltilmiş SPT-N değerine göre bulunan periyodik sınır kayma gerilmesi çok küçük sayısal değerler

almaktadır. Dolayısıyla sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı, yaygın olarak, referans değeri olan 1'in altında kalmaktadır.

3- Çin Milli Kodu olarak isimlendirilen Kriter 4a ve Kriter 4b kendi aralarında uyumlu olup, arazide yapılan gözlemlere daha uygun sonuçlar vermiştir. Diğer kriterler ise yapılan analizlerin büyük bölümünde sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.

4- Sıvılaşma analizi kriterlerinin karşılaştırması, Adapazarı merkezinde yapılan gözlemlere ve çeşitli araştırmacıların (Önalp ve diğ., 2000, Kutanis ve diğ., 2000, Bakır ve Yılmaz, 2000) Adapazarı merkezinin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için yaptıkları çalışmalara dayanarak yapılmıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, yapılan bu gözlem ve araştırmaların doğruluğu ile paralellik gösterir.

5- Bölüm 2.7'de açıklanan Sıvılaşma Analizi Kriterleri hesaplarında SPT-N değerleri büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu kriterlerden sağlıklı sonuçlar alınabilmesi için arazide yapılan standart penetrasyon deneyinin güvenilir olması gerekmektedir.

6- Analizi yapılan bölgelerin büyük bölümünde zeminlerin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Fakat detaylı sıvılaşma analizi yapılmasını gereksiz kılan CL, CH, GW gibi bazı zemin sınıflarında yüksek sıvılaşma potansiyeli tespit edilmesi dikkat çekmektedir. Ayrıca 17 Ağustos Depremi sonucu sıvılaşmadan kaynaklanan hasarların gözlenmediği bazı bölgelerde sıvılaşma potansiyeli olduğu da belirlenmiştir. Önemli miktarda kil içeren zeminlerde SPT-N değeri çok küçük değerler aldığı için ilgili zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı olan mukavemeti de son derece az bulunmaktadır. Dolayısıyla SPT-N sayısına dayanan sıvılaşma analizlerinde plastik ince dane miktarı ve ortalama dane çapı gibi dane özelliklerinin etkileri de incelenmelidir. Ayrıca sıvılaşmaya etki eden faktörlerden olan gerilme altında kalma süresi, sismik geçmiş, yatay toprak basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı gibi faktörlerin de analizlere dahil edilmesi gerekmektedir.

7- Adapazarı Merkezi'nde özellikle Cumhuriyet, Orta, Tıgçılar, Karaosman ve Semerciler Mahallelerinde sıvılaşma analizlerinin dikkatli bir şekilde yapılması gerektiği görülmektedir. Bu mahallelerden geçen Çark ve Sedat Kireçtepe Caddeleri üzerindeki yüksek yapıların sıvılaşma sonucu hasar gördükleri yerinde yapılan gözlemlerle tespit edilmiştir.

8- 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 doymuş olması ve ekonomi gibi nedenlerle çakma kazıklar sorunludur. Zemin iyileştirmesi için jet-grout metodu uygulanabilir. Kent merkezinde yoğun bir şekilde silt ve yer yer kil tabakalarının bulunduğu düşünülürse taş kolon dolgu tekniği ile beraber uygulama yapılabilir.

9- 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.

## KAYNAKLAR

- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik**, 1998. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayını No:25.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N., Yılmaz A. O. ve Girgin, C.**, 2000. Deprem ve Kurtarma İlkeleri, s. 63-74.
- Bakır, S. ve Yılmaz, T.**, 2000. Depremlerin Sismik Özellikleri, Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası-ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51-83.
- Baykal, G. ve Balcı, 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.
- Castro, G. and Poulos, S. J.**, 1977. Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103.
- Das, B., M.**, 1993. Principles of Soil Dynamics, pp 397-453, PWS-KENT Publishing Company, Boston, USA.
- Dowrick, D. J.**, 1975. Earthquake Resistant Design, pp 132-135, John Wiley and Sons.
- Durgunoğlu, H. T., Karadayılar, T., Bray, J. D., Sancio, R. B. ve Hacılioğlu 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.
- Erken, A., Frost, D., Chameau, J. L. ve Leonards, G.**, 1992. Kumlu Zeminlerin Statik Yükler Altında Sıvılaşması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, 21-23 Ekim, İstanbul, I. Cilt, s. 93-103.
- Erken, A., Alhas, E. ve Ansal, A. M.**, 1994. Suya Doygun Siltli Kumların Depremler Sırasındaki Davranışı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Beşinci Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, s.184-192.

- Holtz, R. D. and Kovacs W. D.,** 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, pp. 521-536, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Ishihara, K.,** 1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, pp. 208-344, Clarendon Press, Oxford.
- Kramer, S. L.,** 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, pp. 348-423, Prentice Hall, New Jersey.
- Kutanis, M., Arman, H., Gündüz, Z. ve Fırat, S.,** 2000. 17 Ağustos Depremi Sonrası Adapazarı Kent Merkezinde Gözlemlenen ve Ampirik Yaklaşımlarla Hesaplanan Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s. 321-330.
- Lav, A.,** 1994. İstanbul ve Erzincan Şehirlerinde Zemin Büyütme Etkilerine Göre Mikrobölgeleme, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özaydın, K.,** 1996. Yer Hareketleri Üzerinde Yerel Zemin Koşullarının Etkisi ve Zemin Büyütmesi, Türkiye Deprem Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Önalp, A., Sert, S. ve Bol, E.,** 2000. Adapazarı Zeminlerinin Deprem Performansı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s. 373-382.
- Önalp, A.,** 1997. Zeminler ve Mekaniği, Sakarya Üniversitesi, Yayın No:27.
- Önalp, A., Bol, E.,** (1998). Adapazarı Kent Merkezi Jeoloji ve Jeomorfolojisi, SAÜ, Adapazarı.
- Özay, R., Erken A. ve Ansal, A. M.,** 1998. Kumların Dinamik Mukavemeti, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, 22-23 Ekim, İstanbul, s.592-598.
- Seed, H. B.,** 1976. Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes, ASCE Annual Convention and Exposition, September 27-October 1, Philadelphia, pp. 1-105.
- Sucuoğlu, H.,** 2000. Depremlerin Sismik Özellikleri, Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası-ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, s. 17-33.
- Şekercioğlu, E.,** 1998. Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları No:28, s. 49-61, Ankara.

- Terauchi, T., Altun, S., Erken, A. ve Yasuda, S.,** 2000. Burulmalı Dinamik Deney Sistemiyle Sıvılaşma Deneyleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s. 584-591.
- Tezcan, S. S. and Teri, L.,** 1996. Shear Wave Propagation and Liquefaction in Layered Soils, Türkiye Deprem Vakfı Yayınları TDV/TR 96-005, İstanbul.
- Tezcan, S. S.,** 2001. Sıvılaşma Ders Notları, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Ulusay, R.,** (2001). Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:38, Genişletilmiş 4. Baskı, Ankara s. 188, 270-275.
- Ünver, M. ve Ergun, U.,** 1992. İki Yapının Sıvılaşma Potansiyelinin Tahkiki, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, 21-23 Ekim, İstanbul, II. Cilt, s. 1-18.
- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K. T.,** 1994. Siting in Earthquake Zones, pp. 70-89, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Yılmaz, R.,** 2000. Sıvılaşma, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Jeoteknik Seminer, 28 Kasım-01 Aralık, s. 100-138.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Emrah KÖLEOĞLU, 1977 yılında Ankara’da doğdu. Orta öğrenimini Antalya Anadolu Lisesinde tamamlayarak 1995 yılında, İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazandı. 1999 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisans çalışmalarına başladı. Emrah KÖLEOĞLU, halen Devlet Su İşleri İstanbul Bölge Müdürlüğü’nde kontrol mühendisi olarak çalışmaktadır.