



**T.C.**

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİN SIVILAŞMASINA ZEMİN ve DEPREM  
PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Zeval AYTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2019  
BATMAN  
Her Hakkı Saklıdır.**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Zeval AYTAŞ tarafından hazırlanan "ZEMİN SIVILAŞMASINA ZEMİN ve DEPREM PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ" adlı tez çalışması 25.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ...~~Jeolojik Mühendisliği~~..... Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Ferhat ÖZÇEP

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Nuray ALPASLAN

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hacı Alim BARAN

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Salih DİNÇ

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi M. Şerif İMAMOĞLU

### İmza











Yukarıdaki sonucu onaylarım.

  
Prof. Dr. Şahinaz FIGREK  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Zeval AYTAŞ  
Tarih: 25.06.2019

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### ZEMİN SIVILAŞMASINA ZEMİN ve DEPREM PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Zeval AYTAŞ

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nuray ALPASLAN**

**2019, 121 Sayfa**

**Jüri**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nuray ALPASLAN**

**Prof. Dr. Ferhat ÖZÇEP**

**Dr. Öğr. Üyesi Hacı Alim BARAN**

**Dr. Öğr. Üyesi Salih DİNÇ**

Zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde ve bir deprem esnasında sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek amacıyla, kum ve siltli kum gibi zeminler içeren tabakaların, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilebilen zemin ve sismik parametrelerin bir arada kullanıldığı birçok kriterler, deneysel formüller ve ampirik bağıntılar mevcuttur. Bütün bu kriterler bir arada değerlendirilerek sıvılaşma hesaplarının yapılması önem arz etmektedir. Tez çalışması kapsamında, zemin sıvılaşmasında, zemin ve deprem parametrelerinin etkisi farklı yöntemler kullanılarak, A Microsoft Excels spreadsheet & programı ile teorik örnekler verilerek değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılıp yorumlanmıştır. Çalışmada Dobry vd.,(1981A) Iwasaki ve Tokido (1978) Seed ve Idriss (1981)'e göre farklı parametrelerle sıvılaşma hesapları yapılarak değerlendirilip sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre; deprem parametrelerinin etkisinin sıvılaşma için ne derece önemli bir etkiye sahip olduğu, yapılan analiz sonuçları ve ivme değerlerine göre farklılık kazandığı grafiklerden iyi bir şekilde anlaşılmaktadır. Kullanılan yöntemlerde Dobry vd.,(1981), Seed ve Idriss (1981) yöntemlerinin daha sağlıklı çalıştığı görülmüştür. Zemin özelliğinin kumlu ve siltli olması, zeminlerde kum içeriğinin yüksek olması ve yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyine maximum 10 metre derinlikte olması sıvılaşmanın olabilmesi için önemli başlangıç şartlarıdır. Deprem parametrelerinin etkisinin sıvılaşma için ne derece önemli bir etkiye sahip olduğu, yapılan analiz sonuçları ve ivme değerlerine göre farklılık kazandığı grafiklerden iyi bir şekilde anlaşılmaktadır. Yapılan analiz ve incelemeler sonucuna göre, ivme değerinin 0,10 g olduğunda ve 4,80 m derinlikten sonra sıvılaşma olabilir veya sıvılaşma riski var diyebiliriz. Aynı şekilde, ivme değerinin (a,g) 0,10 üzerinde olduğu andan itibaren sıvılaşma riskinin olduğu ve güvenlik katsayısının 1'den küçük olup azaldığı bilinmektedir. Fakat, ivme değerinin 0,10 ve üzeri olduğu her zeminde sıvılaşma olacağından söz edemeyiz. Çünkü, sıvılaşmaya etki eden faktörlerin zeminde var olması ve yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyine yakın olması ile zemin içeriğinde kumlu-siltli ve kum oranının yüksek olması gerekmektedir. Sıvılaşmaya bağlı olarak zemin oturmalarının kestirilmesi analizleri sonucuna göre, ivme değerlerinin 0,10 g büyük olduğu andan itibaren zemindeki oturma problemleri de sıvılaşmayı olumsuz yönde etkilemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Jeoloji-Jeoteknik, Jeofizik, Kayma Dalgası Hızı (  $V_s$  ), Sıvılaşma, Sıvılaşma Potansiyeli, SPT.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

## **EVALUATION OF THE EFFECTS OF SOIL and EARTHQUAKE PARAMETERS ON SOIL LIQUEFACTION**

**Zeval AYTAS**

**Batman University Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Geological Engineering Dept.**

**Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Nuray ALPASLAN**

**2019, 121 Pages**

### **Jury**

**Advisor: Dr. Öğr. Üyesi. Nuray ALPASLAN**

**Prof. Dr. Ferhat OZCEP**

**Dr. Öğr. Uyesi Haci Alim BARAN**

**Dr. Ogr. Uyesi Salih DINC**

In order to evaluate the soil liquefaction potential and to detect liquefaction potential during an earthquake, there are many criteria, experimental formulas and empirical correlations in which layers containing soils such as sand and silty sand, and soil and seismic parameters which can be acquired with field and laboratory surveys are employed together. It is important to make liquefaction calculations considering all these criteria together. In the thesis study, the effect of soil and earthquake parameters on soil liquefaction was evaluated using different methods and giving theoretical examples with A Microsoft Excels Spreadsheet Software; then the acquired results were discussed and interpreted. In the study, liquefaction calculations were performed with various parameters and presented according to Dobry et al., (1981A) Iwasaki and Tokido (1978) Seed and Idriss (1981).

The acquired results clearly demonstrated how the effect of earthquake parameters is important for liquefaction, and change based on the results of the conducted analysis and acceleration values according to the graphics. It was observed that the methods of Dobry et al., (1981), Seed and Idriss (1981) were more reliable among the utilized methods. The fact that the soil feature is sandy and silty, that the sand content is high in the soils and that the underground water level is in 10-meter deep from the soil surface are important commencing condition for liquefaction. The graphics clearly demonstrate how important the effect of earthquake parameters is for liquefaction and that it change based on the results of conducted analysis and acceleration values. According to the results of performed analysis and examinations, we can say that there may be liquefaction after 4.80m of depth or there is a risk of liquefaction if the acceleration value is 0.10g. It is also known that there is a liquefaction risk following the moment that the acceleration value (a,g) is greater than 0.10 and the safety factor becomes lower than 1 so the risk increases. However, we cannot say there will be liquefaction in each soil where the acceleration value is 0.10 and above. Because the factors affecting the liquefaction are required in the soil and the underground water level needs to be close to soil surface, and also the soil should be sandy-silty and have high sand rate. Subsidence problems in the soil following the moment that the acceleration value is greater than 0.10 affect the liquefaction negatively according to analysis result to estimate the subsidence based on the liquefaction.

**Keywords:** Geology-Geotechnical, Geophysical, Liquefaction, Liquefaction Potential, SPT, Slip Wave Velocity ( $V_s$ ).

## ÖNSÖZ

Türkiye’de zemin sıvılaşması potansiyeli analizine yönelik çalışmamda, bana araştırma olanağını sağlayan ve çalışmamın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Nuray ALPASLAN, tez çalışmamda kullanmış olduğum sıvılaşmada ivme değerinin etkisi hesaplaması programının yapımcısı olan İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Yer Fiziği Ana Bilim Dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Ferhat ÖZÇEP hocamıza teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bana her türlü desteği veren ve her daim yanımda olan sevgili eşim Fatma AYTAS’ a çok teşekkür ederim.

Zeval AYTAS  
BATMAN-2019

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tez Hakkında.....	2
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMA</b> .....	<b>3</b>
<b>3. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>7</b>
3.1. Zemin Sıvılaşması: Tanımı ve Mekanizması.....	7
3.2. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler.....	9
3.2.1. Zemin Özelliklerinin Sıvılaşmaya Etkisi .....	9
3.2.1.1. Relatif Sıkılık .....	9
3.2.1.2. İnce Tane Oranı .....	11
3.2.1.2.1. Plastik Olmayan İnce Tane Oranı .....	11
3.2.1.2.2. İnce Tane Oranı ve Plastisite .....	15
3.2.1.3. Tane Boyutu Karakteristiği .....	17
3.2.1.4. Zeminin Drenaj Koşulları .....	19
3.2.1.5. Sıvılaşabilir Zeminin Derinliği ve Yeraltı Su Seviyesi Derinliği .....	20
3.2.2. Jeolojik Şartların Sıvılaşmaya Etkisi .....	20
3.2.3. Yer Hareketlerinin Sıvılaşmaya Etkisi .....	22
3.2.3.1. Kayma Dalga Hızı ( $V_s$ ).....	24
3.3. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri.....	28
3.3.1. Laboratuvar Deneyleri.....	28
3.3.2. Arazi Deneyleri .....	28
3.4. Sıvılaşma Hasarları .....	29
3.4.1. Yerin Taşıma Gücünü Yitirmesi.....	30
3.4.2. Yerin Oturması .....	30
3.4.3. Yerin Salınımı .....	31
3.4.4. Yanal Yayılma .....	31
3.4.5. Akma Türü Kayma .....	32

<b>4. MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>33</b>
4.1. Eşik İvme Kriteri (Dobry vd., 1981).....	33
4.1.1. Başlangıç İvmesi Yöntemi.....	35
4.2. (Seed, 1979, Seed vd., 1981)'e Göre Periyodik Kayma Gerilmesi Ve SPT.....	36
Değerinden Sıvılaşmanın Elde Edilmesi .....	36
4.3. Sıvılaşma Direncini Belirlemede Jeofizik (S Dalga Hızı) Ölçümleri ve SPT .	40
(N) Değeri.....	40
4.3.1. Dobry ve diğ (1981) Yaklaşımı İle Kayma Dalga Hızı Kullanılarak	
Sıvılaşma Analizi.....	42
4.5. (Iwasaki, 1986) Yaklaşımı ile Sıvılaşma Endeks Kriteri Kullanılarak Sıvılaşma	
Analizi.....	44
4.5.1. Sıvılaşma Emniyet Faktörü.....	44
4.5.2. Sıvılaşma Endeksi.....	45
4.6. Tokimatsu ve Yoshimi Yöntemi (Tokimatsu ve Yoshimi 1983) .....	46
4.7. Ambraseys (1988)'e Göre Deprem Şiddeti Ve Odak Uzaklığı Kullanılarak	
Yapılan Sıvılaşma Analizi .....	47
4.8. Sıvılaşma Analizleri İçin Güvenlik Faktörü .....	48
<b>5. TARTIŞMA ve BULGULAR .....</b>	<b>50</b>
5.1. Zemin Analizi: A Microsoft Excels Spreadsheets & Programı .....	50
5.1.1. Kayma dalgası ve SPT ile sıvılaşma analizi .....	50
5.1.1.1. Deprem Şiddeti Ve Odak Uzaklığı Kullanılarak Sıvılaşma Analizi.....	73
5.1.1.2. Deprem Büyüklüğü ve İvme Kullanılarak Yapılan Sıvılaşma Analizi.....	73
5.2. Elde Edilen Sonuçların Genel Değerlendirilmesi .....	90
<b>6. SONUÇLAR.....</b>	<b>95</b>
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>106</b>



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yer ivmesi ve relatif sıklığa bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli.....	10
Çizelge 3.2. Siltli ve killi kumların sıvılaşabilirliği.....	18
Çizelge 3.3. Deprem sırasında sıvılaşabilecek zeminlerin tahmini hassaslıkları.....	21
Çizelge 3.4 Çeşitli araştırmacıların azalım ilişkisi bağıntıları.....	25
Çizelge 4.1. Sıvılaşma risk derecesi.....	45
Çizelge 4.2. $\Delta N_f$ İnce tane düzeltme katsayısı.....	47
Çizelge 5.1. Proje alanı laboratuvar ve arazi verileri.....	52
Çizelge 5.2. SPT' ye Göre Yapılan Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.05 g için) .....	53
Çizelge 5.3. $V_s$ (Kayma dalga hızı)' ye Göre Yapılan Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.05 g için) .....	54
Çizelge 5.4. SPT Verilerine Göre Proje alanı analiz verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.10 için ).....	56
Çizelge 5.5. Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) verilerine göre Sıvılaşma Analizi ( M=7.5 ve ivme değeri 0.10 g için).....	57
Çizelge 5.6. Proje Alanında SPT Verilerine Göre Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.15 g için).....	59
Çizelge 5.7. Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) ile Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.15 g için).....	60
Çizelge 5.8. Proje Alanındaki SPT Verilerinin Analiz Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.20 g için) .....	62
Çizelge 5.9. Kayma Dalgası Hızı Verileri ile Sıvılaşma Analiz Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.20 g için) .....	63
Çizelge 5.10. SPT Verileri İle Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.30 g için).....	65
Çizelge 5.11. Kayma Dalgası Hızı ile Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.30 g için).....	66
Çizelge 5.12. SPT Verileri İle Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.40 g için).....	67
Çizelge 5.13. Kayma Dalgası Hızı ile Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.40 g için).....	68
Çizelge 5.14. SPT Verileri İle Sıvılaşma Analizi Sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.50 g için).....	70
Çizelge 5.15. Kayma Dalgası Hızı Verileri İle Sıvılaşma Analizi ( M=7.5 ve ivme değeri 0.50 g için).....	71
Çizelge 5.16. Proje alanı 1 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.05 g için).....	74
Çizelge 5.17. Proje alanı 2 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.10 için ).....	76
Çizelge 5.18. Proje alanı 3 veri sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.15 için ).....	78
Çizelge 5.19. Proje alanı 4 veri analiz sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.20 için )....	81
Çizelge 5.20. Proje alanı 5 veri sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.30 için ).....	83
Çizelge 5.21. Proje alanı 6 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.40 için ).....	86
Çizelge 5.22. Proje alanı 7 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.50 için ).....	88

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. En kolay sıvılaştan ve potansiyel sıvılaşma eğilimine sahip zeminler için tane boyu açısından sıvılaşma alt ve üst sınırlarını gösteren tane boyu dağılım eğrileri.....	7
Şekil 3.2. Aynı efektif çevre basıncındaki gevsek ve sıkı kumların birim sekil değiştirme kontrollü üç eksenli deneylerde davranışları.....	8
Şekil 3.3. Relatif Sıklık – Maksimum yer ivmesi.....	10
Şekil 3.4. En kolay sıvılaştan ve potansiyel sıvılaşma eğilimine sahip zeminler için tane boyu açısından sıvılaşma alt ve üst sınırlarını gösteren tane boyu dağılım eğrileri.....	11
Şekil 3.5. Büyüklüğü 7.5 olan depremler için SPT temiz kum eğrileri .....	12
Şekil 3.6. Artan silt içeriği ile çevrimsel mukavemetin artışı .....	13
Şekil 3.7. Artan silt içeriği ile çevrimsel mukavemetin azalması.....	13
Şekil 3.8. Silt içeriğine bağlı olarak çevrimsel mukavemette meydana gelen değişimler.....	14
Şekil 3.9. Plastisite indeksi çevrimsel mukavemet ilişkisi .....	15
Şekil 3.10. 1999 Kocaeli depremi sonucunda Adapazarı'nda elde edilmiş test sonuçları.....	19
Şekil 3.11. Deprem manyitüdüne bağlı olarak sıvılaşmanın görüldüğü en uzak mesafe.....	23
Şekil 3.12. Odak noktası mesafesi $r_e$ ve moment büyüklüğü arasındaki ilişki.....	26
Şekil 3.13. Fay kırık mesafesi $R_f$ ve moment büyüklüğü arasındaki ilişki .....	26
Şekil 3.14. Yerinin taşıma gücünü yitirmesi sonucu yapılar yana yatmış veya devrilmiştir, Kobe, 1995.....	30
Şekil 3.15. Matagua nehri 1976 Guatemala Depremi.....	32
Şekil 4.1. Eşik ivme değerleri önerisi .....	34
Şekil 4.2. Başlangıç ivme değerleri önerisi.....	35
Şekil 4.3. Standart penetrasyon azaltma faktörü.....	38
Şekil 4.4. Periyodik sınır gerilmesi değeri .....	39
Şekil 4.5. Kayma Dalgası Hızı ve Pik Yer İvmesinden Sıvılaşma Potansiyelinin değerlendirilmesi için Abak.....	40
Şekil 4.6. Devirsel gerilmesi oranı ve düzeltilmiş SPT değerleri arasındaki ilişki.....	41
Şekil 4.7. Devirsel direnç oranı (CRR) ve düzeltilmiş $V_s$ hızı arasındaki ilişki .....	42
Şekil 4.8. Moment büyüklüğü ve odak uzaklığı ilişkisi .....	48
Şekil 5.1. A Microsoft Excels spreadsheet & programı .....	50
Şekil 5.2. Kayma dalgası hızı ile sıvılaşma analizi.....	51
Şekil 5.3. SPT ile sıvılaşma analizi.....	51
Şekil 5.4. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı.....	52
Şekil 5.5. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü (M=7.5 ve ivme değeri 0,05 ).....	53
Şekil 5.6. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş $V_s$ -CSR abağı.....	54
Şekil 5.7. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü (M=7.5 ve ivme değeri 0,05 ).....	55

Şekil 5.8. $M=7.5$ ve $a=0.05$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	55
Şekil 5.9. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,10 ).....	57
Şekil 5.10. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,10 ).....	58
Şekil 5.11. $M=7.5$ ve $a=0.10$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	58
Şekil 5.12. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,15 ).....	60
Şekil 5.13. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,15 ).....	61
Şekil 5.14. $M=7.5$ ve $a=0.15$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	61
Şekil 5.15. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,20 ).....	63
Şekil 5.16. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,20 ).....	64
Şekil 5.17. $M=7.5$ ve $a=0.20$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	64
Şekil 5.18. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,30 ).....	65
Şekil 5.19. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,30 ).....	66
Şekil 5.20. $M=7.5$ ve $a=0.30$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	67
Şekil 5.21. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,40 ).....	68
Şekil 5.22. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,40 ).....	69
Şekil 5.23. $M=7.5$ ve $a=0.40$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	69
Şekil 5.24. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,50 ).....	71
Şekil 5.25. $V_s$ ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü ( $M=7.5$ ve ivme değeri 0,50 ).....	72
Şekil 5.26. $M=7.5$ ve $a=0.50$ g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı $V_s$ na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi).....	72
Şekil 5.27. Deprem büyüklüğü ve ivme kullanılarak yapılan sıvılaşma analizi.....	73
Şekil 5.28. $G_k$ 'nın derinlikle değişimi ve SPT ile $V_s$ arasındaki ilişkisi.....	74
Şekil 5.29. İvme değeri 0.05 için Sıvılaşmaya zemin oturmaların kestirilmesi analizi...	75
Şekil 5.30. Deprem büyüklüğü ve ivme değeri 0.10 için sıvılaşma analizi sonuçları.....	76
Şekil 5.31. $G_k$ 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile $V_s$ arasındaki ilişkisi.....	77

Şekil 5.32. İvme değeri 0.10 için Sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi.....	77
Şekil 5.33. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 için verilen analiz sonuçları....	78
Şekil 5.34. $G_k$ 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile $V_s$ arasında ki ilişkisi.....	79
Şekil 5.35. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi.....	80
Şekil 5.36. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 için analiz verileri.....	81
Şekil 5.37. $G_k$ 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile $V_s$ arasındaki ilişkisi.....	82
Şekil 5.38. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi.....	82
Şekil 5.39. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 için sıvılaşma analizi sonuçları.....	83
Şekil 5.40. $G_k$ 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile $V_s$ arasındaki ilişkisi.....	84
Şekil 5.41. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi.....	85
Şekil 5.42. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme Değeri 0.40 için sıvılaşma analizi sonuçları.....	86
Şekil 5.43. $G_k$ 'nın derinlikle değişimi ve SPT ile $V_s$ arasındaki ilişkisi.....	87
Şekil 5.44. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.40 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi.....	87
Şekil 5.45. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 için sıvılaşma analizi sonuçları.....	88
Şekil 5.46. $G_k$ 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile $V_s$ arasındaki ilişkisi.....	89
Şekil 5.47. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi.....	90

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$a_{max}$  : Depremin ivmesi

$a_t$  : Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç ivmesi

$C_N$  : Düzeltme faktörü

$D_{50}$  : Ortalama dane çapı

$F_a$  : Eşik ivme emniyet faktörü

$F_L$  : Sıvılaşma endeksi emniyet faktörü

$F_s$  : Kayma gerilmesi emniyet faktörü

$g$  : Yer çekimi ivmesi, 980gal

$G_{max}$  : Kayma modülü

$h$  : Tabaka derinliği

$i$  : Tabaka numarası

$I_L$  : Sıvılaşma potansiyeli indeksi

$L$  : Şiddetli bir depremde meydana gelebilecek kayma gerilmesi oranı

$M$  : Deprem magnitüdü

$N$  : SPT değeri

$N_1$  : Düzeltilmiş SPT

$R$  : Yerinin sıvılaşma anındaki periyodik kayma direnci oranı

$r_d$  : Yerin derinlikle artan sıvılaşmaya karşı direncini temsil eden bir azaltma faktörü

$V_s$  : S dalga hızı

$z$  : Derinlik

$z_1$  : Tabaka orta noktasının derinliği

$\tau_s$  : Belli bir yerde sıvılaşmanın başlayabilmesi için gerekli sınır kayma gerilmesi

$\tau_0$  : Aynı yerde belli bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesi

$\sigma_0$  : Toplam gerilme

$\sigma_0'$  : Efektif gerilme

$\tau_d / \sigma_0'$  : Depremden kaynaklanan periyodik gerilme oranı

$\tau_l / \sigma_0'$  : Yerin periyodik gerilme direnci

$\sigma_v$  : Toplam düşey gerilme

$\sigma_v'$  : Efektif düşey gerilme

$\gamma_t$  : Eşik kayma şekil değiştirmesi

$\rho$  : Birim hacim yoğunluk

$\rho$ : Yoğunluk  
G : Kayma modülü  
 $V_p$  : Boyuna Dalga Hızı  
 $V_s$  : Kayma Dalga Hızı  
 $V_{s30}$ : 30 m derinlik için ortalama kayma dalgası hızı  
 $V_p/V_s$  : Sismik hız oranı (Sıklık)  
 $\nu$  : Poisson  
 $\gamma_n$  : Doğal birim hacim ağırlığı  
 $\omega$  : Su içeriği  
 $\gamma_k$  : Kuru birim hacim ağırlığı  
 $T_o$  : Zemin hakim periyodu  
LL : Likit Limit  
PL : Plastik Limit  
 $I_p$  : Plastisite İndisi  
A : Aktivite  
 $G_k$  : Güvenlik Katsayısı

## **Kısaltmalar**

SPT : Standart Penertrasyon Deneyi

UD : Örselenmemiş Numuneler

CPT : Konik Penetrasyon Deneyi

CVR : Kritik Boşluk Oranı

CRR : Zeminin Oluşturduğu Devirsel Kayma Gerilmesi Oranı

CSR : Deprem Oluşturduğu Devirsel Kayma Gerilmesi Oranı

MIT : Massachusetts Institute of Technology

USC : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması

UBC : Uniform Building Code

NEHRP : National Earthquake Hazard Reduction Programme,

EUROCODE 8 : Design of structures for earthquake resistance

ASTM: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topl

## 1. GİRİŞ

Dinamik yükler olarak tanımladığımız depremler sırasında zemin özelliklerine bağlı olarak gelişen yüzey deformasyonlarının (sıvılaşma, yanal yayılma vb.) da önemli bir rolü bulunmaktadır. Sıvılaşma geoteknik deprem mühendisliğinde en önemli ve kompleks konulardan biridir. Özellikle 17 Ağustos 1999'da meydana gelen deprem ile zeminlerde sıvılaşma önemini ortaya koymuştur. Sıvılaşma, deprem sırasında zemin hasarlarına neden olan en önemli faktörlerden biridir. Yerleşim alanlarında meydana gelen sıvılaşma, zemin yapısında farklı türlerde deformasyonlara neden olabilmekte ve önemli derecede hasarlara yol açabilmektedir. Özellikle büyük depremler de ortaya çıkan hasarlarda sıvılaşma etkisi büyüktür. Sıvılaşma, zeminin mukavemeti ve sertliğinin azaldığı durumda oluşan bir olgudur. Gevşek kumlu, siltli zeminlerin ve sığ yeraltı suyunun bulunduğu alanlarda deprem sonucunda meydana gelmektedir.

Sıvılaşma sırasında deprem dalgalarına bağlı olarak zemini oluşturan taneler arasındaki boşluk suyu basıncı artmaktadır. Boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye eşit olduğu anda taneler arasındaki sürtünme kuvveti sıfıra ulaşmaktadır. Temel zeminde taşıma gücü ve ani oturma sorunları meydana gelmektedir. Büyüklüğü 5'ten fazla olan depremler sonucu sıvılaşma meydana gelebilmektedir.

Yapılaşmanın yoğun olduğu yerlerde ve yapıların projelendirilmelerinden önce yapılacak zemin etüt çalışmalarında zemin profilinin iyi yorumlanması ve temel zeminini oluşturacak tabakaların oluşması muhtemel bir deprem esnasındaki sıvılaşma potansiyellerinin değerlendirilmesi önem kazanmaktadır.



### **1.1. Tez Hakkında**

Bu yüksek lisans tezi kapsamında sıvılaşmanın mekanizması ve zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi üzerinde durularak, zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan ampirik bağıntı, analiz ve yöntemler değerlendirilerek parametreler irdelenmiştir. Ayrıca sıvılaşma mekanizmasının teorisi üzerinde durulmasının yanı sıra, sıvılaşma oluşumunu etkileyen faktörler ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

İkinci bölümde, zemin sıvılaşmasında, zemin ve deprem parametrelerinin etkisinin değerlendirilmesi amacıyla A Microsoft Excels spreadsheet & programı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilip yorumlanmış ilgili öneriler tartışılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMA

Zeminin sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesi için kullanılan çeşitli şartnameler, kriterler ve yöntemler bulunmaktadır. Bu şartname, yönetmelik ve kriterlere göre yapılan değerlendirmelerin tümü sıvılaşma analizini oluşturur.

1936'da Casagrande bir dizi drenajlı şekil değiştirme kontrollü üç eksenli deneyler yapmış ve aynı efektif çevre basıncındaki gevşek ve sıkı kum numunelerinin yüksek birim şekil değiştirmelerde aynı sıklığa ulaştığını ve sabit bir kayma direnci ile devamlı şekilde kaymaya maruz kaldıklarını bulmuştur. Başlangıçta gevşek olan numuneler, yükleme sırasında büzülmüş veya sıkılaştırmış; başlangıçta sıkı olan numuneler ise önce büzülmüş ve sonra çabuk bir şekilde genişlemiştir. Casagrande çeşitli çevre basınçlarında deneyler uygulayarak kritik boşluk oranının efektif çevre basıncı ile değiştiğini bulmuştur. Bu değerlerin grafik üzerinde gösterilmesi ile elde edilen eğriye Kritik Boşluk Oranı (CVR) eğrisi denir.

1960'ların ortasında Casagrande'nin öğrencisi Castro bir dizi drenajsız gerilme kontrolü üç eksenli test uygulayarak zeminin durumuna bağlı olarak üç tür gerilme-birim şekil değiştirme davranışı tespit etmiştir. Çok gevşek numuneler düşük kayma birim şekil değiştirmelere doğru çabucak akmıştır. Castro bu davranışı sıvılaşma olarak adlandırılmıştır ve bu davranış günümüzde akma sıvılaşması olarak bilinmektedir. Sıkı numuneler başta büzülmüş ancak sonra yüksek efektif çevre basıncı ve büyük birim şekil değiştirme dayanımına erişene kadar genişlemiştir. Orta sıkı numuneler başta gevşek numuneler gibi aynı davranışı göstermiş fakat sonra büzülerek değişime uğramış, daha sonra ise genişlemiştir. Castro bu davranışı "sınırlı sıvılaşma" olarak tanımlamıştır.

Hasar oluşturacak ve büyük şiddetli birçok depremde sıvılaşma etkisinin ne derece önemli olduğu anlaşılmıştır. Sıvılaşma konusunun ilk olarak gündeme gelmesi 27.03.1964 yılında Alaska depremiyle ( $M_w = 8.6$ ) olmuştur. Seward, Whittier ve Valdez bölgelerinde sahil şeridinde yakın meydana gelen kaymaların birçok rıhtım ve su yapılarına zarar verdiği görülmüştür. Ayrıca, Anchorage bölgesinde Turnagain

Heights alanında meydana gelen yanal rijitlik ve sıvılaşmanın sonucunda karayolları ile demiryolları sıkışmış ve 250'den fazla üst yapılarda burkulma veya deformasyon problemleri yaşanmıştır. Yanal rijitlik yapan cismin ise 7.6 m kalınlıkta 606 m sürüklendiği belirlenmiştir ( ngdc.noaa.gov ).

Sıvılaşma konusunda değişik ön değerlendirme kriterleri, analiz kriterleri, analiz metodları ve standartları bulunmaktadır. Casagrande'nin çalışmalarından sonra Seed ve Idriss (1967) yaptıkları çalışmalar ile bahsi geçen Nigata depreminin hasarlarının temellerin altındaki kumun sıvılaşması ile meydana geldiği hususunu savunmuşlardır. Sıvılaşma, genelde suya doymuş kum ve silt zeminlerde görülmektedir. Sıvılaşma esnasında deprem gibi titreşimlere maruz kalıp sıkışmaya çalışan zemin hacimce azalmıştır. Bu durum boşluk suyu basıncının arttıracaktır. Artan boşluk suyu basıncı normal gerilme değerine ulaştığında efektif gerilme sıfır olur zemin yüzeyine yakın kum tabakası sıvı gibi davranarak taşıyıcılığını kaybeder.

Sıvılaşma konusunda devam eden çalışmalar laboratuvar ve arazi deney yöntemlerinin geliştirilmesi ile tekrarlı yükler altındaki kumlu zemin tabakalarının birçok araştırmacı tarafından incelenmesine teşvik etmiştir.

Sıvılaşma ile ilgili olarak ilk deneysel çalışmalar Seed ve Idriss, Finn, Ishihara ve Li ve Mulilis (2001) tarafından hazırlanmaya başlamıştır. Bu araştırmalarda laboratuvarında temiz kum numuneleri üzerinde devirsel yükler altında yapılan drenajsız deneylerde sıkılığa bağlı olarak iki tür davranış sergilenmiştir. Gevşek kumlarda tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı ani artış göstererek efektif çevre basıncına eşit olmuş ve zemin sıvılaştığı için büyük oranda şekil değiştirdiği görülmüştür. Bunun sonucunda kayma mukavemetini kaybetmiştir. Suyu doymuş kumlar da ise, yükleme çevriminin bir anında boşluk suyu basıncı azalarak numune tekrarlı yüke karşı bir dayanım kazanmış olur. Bu olaya ön sıvılaşma denilmektedir ( Ansal ve Ögünç, 1981 ; Castro, 1975 ).

Araştırmalar bu bölgede arttıka bu sıvılaşma olaylarının sebebi olan bazı faktörler de tespit edilmeye başlanmıştır. Tane zellikleri, arazinin sismik-kırılma geçmişi, yanal toprak örtüsü, su muhtevası ve arazinin jeolojik yaşı gibi faktörlerin sıvılaşma ile ilgili olduğu belirlenmiştir ( Seed, 1979 ).

Laboratuvar çalışmalarında numune alma yöntemlerinde, deney sistemlerinin ve rselenmesinde sıvılaşmaya önemli bir etkisi vardır (Ansal, 1998). Bu faktörler çeşitli araştırmacılar tarafından temiz kumlar ile ince taneli siltli kumlar için incelenmiştir. Ayrıca, arazide ki örselenmemiş numunenin sıvılaşma direncinin, laboratuvar ortamındaki numunelerden oldukça yüksek seviyede olduğu da belirtilmiştir (Hatanaka ve diğ., 1988). Laboratuvar da yapılan u eksenli deneyde ince tane oranının etkisi Ishihara ve Kuerbis (1988) tarafından incelenmiştir. Dinamik mukavemet üzerinde plastisitenin etkisi ise, Kuerbis ve diğ. ile Erken ve diğ. (1998) tarafından incelenmiştir. Bu inceleme soncunda, plastik ince tanelerin mukavemeti arttırdığı; aksinin ise azalttığı kanaatine varılmıştır.

Ansal ve Erken tarafından 1998 yılında verilen seminerde gösterdiği çalışmalarda ise, Erzincan bölgesinde piston numune alıcılarla alınan örselenmemiş numunelerle İstanbul Teknik niversitesi laboratuvarında u eksenli deney yaptırılmıştır. Deneyde ortalama tane çapı 0.25 mm. olan temiz kum numuneleri üzerinde değişik gerilmeler ve farklı rölatif sıklıklar altında deneyler tekrarlanmış, sonrasında aynı yerlerden alınan numunelerde gerilme kontrollü dinamik u eksenli deney yapılmış ve sonuçlar doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında dinamik mukavemeti, gerilmelerin ve zemin yapısının büyük oranda etkilediği meydana gelmiştir. Plastik ince tane oranının da dinamik mukavemeti olumlu yönde etkilediği belirlenmiş olup, plastisitesi yüksek olan numunelerin sıkı kumlarda daha yüksek dinamik mukavemete sahip oldukları tespit edilmiştir.

Ceyhan (2004), Büyükçekmece (İstanbul) İlçesinde kayma dalgası hızı kullanarak mikro bölgeleme çalışması yapmıştır. Bu çalışmasında sondaj, laboratuvar ve sismik verileri (kayma dalgası hızı, SPT(N) değerleri ve laboratuvar verileri) kullanarak bölgeye

ilişkin zemin sınıflama haritası, zemin hakim titreşim periyodu haritası, zemin büyütmesi ve sıvılaşma analizleri yaparak, bunlara bağlı haritalar üretmiştir.

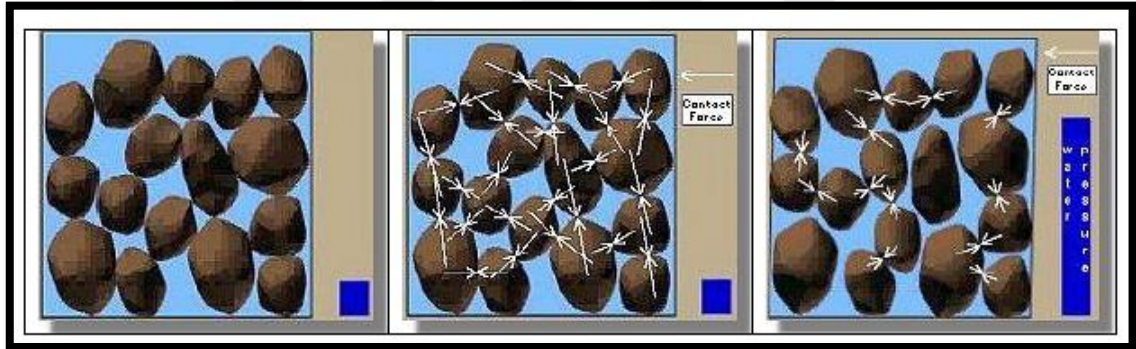
Yine aynı yıllarda 16 Haziran günü Japonya Niigata da meydana gelen depremde (  $M_w= 7.3$  ) sıvılaşma olayında olan araştırmacılar gündeme gelmişlerdir. Bu depremlerden önce insanların yerleşim birimlerine kurdukları küçük bölgeler şeklinde kararlı ve dengeli topluluklar dağıldıktan sonra, zemin tipi olarak kayalık alanları seçtikleri ve kıyı sahilini doldurma yöntemi yaygın olmadığı için sıvılaşma etkisi gündeme gelmemiştir ( Tezcan ve Özdemir, 2004 ).

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Zemin Sıvılaşması: Tanımı ve Mekanizması

Sıvılaşma her yerde ve her koşulda meydana gelen bir davranış biçimi olmayıp, belirli yeraltı koşulları altında gerçekleşir. Genellikle genç ve gevşek çökellerin, özellikle kum ve silt tane boyundaki malzemenin depolandığı ve yeraltı suyunun sık olduğu ortamlar, sıvılaşmanın gelişmesi açısından en uygun ortamlardır.

Sıvılaşma davranışını anlamak, sıvılaşmanın tüm biçimleriyle hızlı yükleme boyunca artan boşluk suyu basıncı altında kohezyonsuz zeminlerin gösterdiği sürtünme davranışı olduğunu anlamak ile başlar (Şekil 3.1; Poulos 1981).



Şekil 3.1. Zemin tanecikleri; okların uzunluğu zemin parçaları arasındaki bağlantı kuvveti ile doğru orantılıdır. Su basıncı azaldıkça bağlantı kuvveti artmaktadır (Anonymous, 2006)

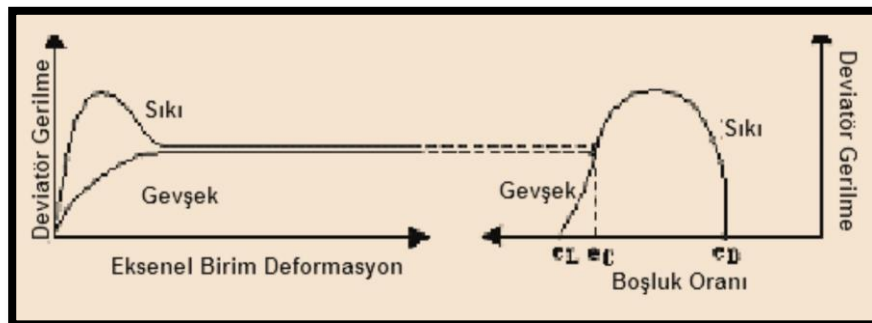
Zeminde meydana gelen bu büyük mukavemet kaybını ilk kez Hazen (1920) sıvılaşabilir (liquefiable) davranış olarak tanımlarken, *sıvılaşma* (liquefaction) teriminin bilimsel literatürde ilk kez Terzaghi (1925) tarafından kullanıldığını görmekteyiz. Terzaghi (1925)'e göre “*sıvılaşma, suya doymun zeminin çökmesi sırasında zemini oluşturan katı parçacıkların ağırlığının zemini çevreleyen suya aktarılması durumunda meydana gelebilir. Bu olay sonucunda zeminin herhangi bir derinliğinde hidrostatik su basıncı yükselerek, büyüklüğü suya batan zeminin birim ağırlığına yaklaşır*” (Castro, 1969).

Youd (1992), sıvılaşma olayını suya doymun ince taneli kumlu ve siltli zeminlerin, deprem titreşimleri sırasında boşluk suyu basıncı değerinin artması ile efektif gerilmenin sıfır olması sonucu, zeminin bir sıvı haline dönüşmesi olarak tanımlamaktadır.

Sıvılaşma davranışını anlamak, sıvılaşmanın tüm biçimleriyle hızlı yükleme boyunca artan boşluk suyu basıncı altında kohezyonsuz zeminlerin gösterdiği sürtünme davranışı olduğunu anlamak ile başlar (Poulos 1981).

Sıvılaşma, gerekli koşullarda gerçekleştiği takdirde, yeraltı suyu tablasının yüzeyden itibaren en fazla 10m derinlikte bulunduğu ortamlarda meydana gelmektedir (Ulusay, 2000).

Bir yerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı, yeri oluşturan tanelerin boyutlarına, şekillerine ve zemin türüne bağlıdır. Özellikle zemin türü sıvılaşma tehlikesini oluşturmada önemli bir rol oynamaktadır. İlk başta daha gevşek olan numuneler, yükleme sırasında büzölmüş veya sıkılaşmış; başlangıçta sıkı olan numuneler ise önce büzölmüş ve sonra çabuk bir şekilde genişlemiştir. Bu sabit sıkılıktaki boşluk oranına Kritik Boşluk Oranı ( $e_c$ ) denilmiştir (Şekil 3.2). Nehir çökelleri, etek çökelleri ve rüzgar çökelleri doymun olduğu zaman sıvılaşma duyarlılıkları artmaktadır (Kramer, 1996).



Şekil 3.2. Aynı efektif çevre basıncındaki gevşek ve sıkı kumların birim sekil değıştirme kontrollü üç eksenli deneylerde davranışları (Kramer, 1996)

Sıvılaşma, zeminin akışkan davranış biçimi olarak tanımlanabilir. Yer sıvılaşma analizinin ilk adımı potansiyel olarak sıvılaşabilir, yer tabakalarının söz konusu yer

kesitinde bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. Sismik yer sıvılaşmasına yönelik birçok mühendislik yöntemleri sunulmaktadır. Ancak bu yöntemlerin bazılarının uygulanabilirliği, güvenilirliği kısıtlıdır ve bu çalışmada birden fazla sıvılaşma analizi kriteri incelenerek karşılaştırılmıştır.

### **3.2. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler**

Sıvılaşmanın oluşumunda birçok jeoteknik faktör etkili olsa da genel olarak zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirleyen etkenler, bir başka deyişle zeminin sıvılaşma potansiyelini belirleyen ölçütler üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar; zeminin özellikleri, jeolojik şartlar ve yer hareketleridir. Sıvılaşma oluşumuna etki eden bu faktörler aşağıda başlıklar halinde ayrıntılarıyla incelenmiştir.

Sıvılaşmayı etkileyen faktörleri ikiye ayrılabilir. Birincisi depremden kaynaklı olan faktörler; Kayma dalgası (S dalga) hızı, depremin ivmesi, depremin magnitudü'dür. İkincisi yer kaynaklı olan faktörler; yeraltı suyu seviyesi, su içeriği, gözeneklilik, geçirgenlik, ortalama dane çapı, bağıl sıklık ve likit limitidir.

#### **3.2.1. Zemin Özelliklerinin Sıvılaşmaya Etkisi**

##### **3.2.1.1. Relatif Sıklık**

Relatif sıklık kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını belirleyen en önemli faktörlerden biridir (Altun, 2004). Zemin yoğunluğunun artışıyla birlikte, kesme sırasındaki hacim küçülmesi eğilimi ve boşluk suyu basıncı azalmakta, dolayısıyla sıvılaşma olasılığı da azalmaktadır (Ferritto, 1997). Bağıl sıklık, yer altındaki tabakaların ne kadar sıkı durum da olduğunu yüzde cinsinden veren bir parametredir. Sıvılaşma üzerinde ki etkisi; bağıl sıklık yüzdesinin düşük olması taneler arasındaki boşluk oranının o kadar yüksek olduğunu belirtir. Bu da deprem sırasında mevcut olan yeraltı suyunun taneler arasına girip yerin viskoz sıvı gibi davranmasına yol açar. Kishida (1969) 1964 Niigata depreminde relatif sıklığı

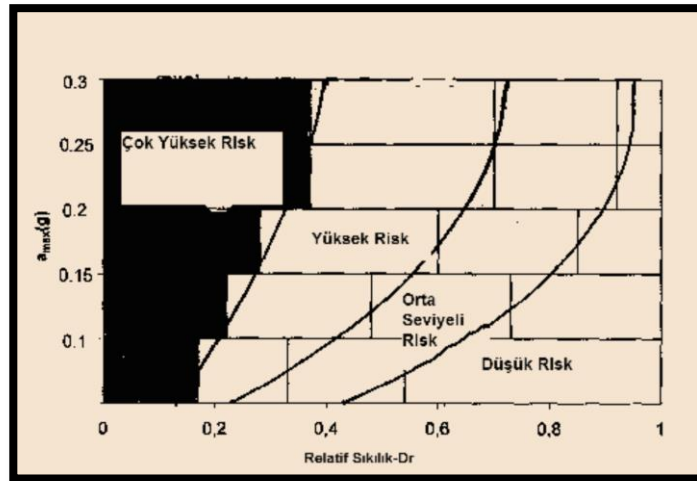


%75'in üzerinde olan zeminlerde sıvılaşma olmadığını bildirmiştir. Benzer şekilde Wang ve Law (1994) sıvılaşma oluşabilecek relatif sıklık değerinin % 75'ten daha küçük olduğunu bildirmektedir. Başlangıç relatif sıklık değeri arttıkça titreşim sırasında oturma ve boşluk suyu basıncının azaldığı bilinmektedir. Buna göre yer ivmesi, relatif sıklık ve sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişkiler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yer ivmesi ve relatif sıklığa bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli (Şekercioglu, 1998)

Maksimum Yer İvmesi, $a_{max}$ (g)	Sıvılaşma Riski		
	Yüksek	Orta	Düşük
0.10	$D_r < 0.33$	$0.33 < D_r < 0.54$	$D_r > 0.54$
0.15	$D_r < 0.48$	$0.48 < D_r < 0.73$	$D_r > 0.73$
0.20	$D_r < 0.60$	$0.60 < D_r < 0.85$	$D_r > 0.85$
0.25	$D_r < 0.70$	$0.70 < D_r < 0.92$	$D_r > 0.92$

Yer ivmesi ve relatif sıklığa bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli durumu Şekil 3.3 'de verilmiştir (Tezcan ve Özdemir, 2004).



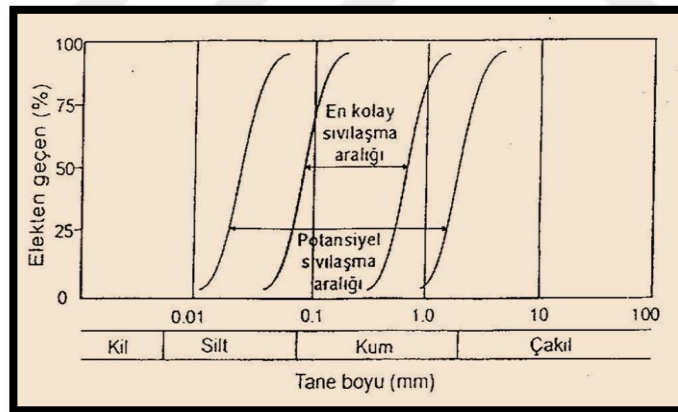
Şekil 3.3. Relatif Sıklık – Maksimum yer ivmesi (Tezcan ve Özdemir, 2004)

Diğer taraftan, Castro ve Poulos (1977), % 100 relatif sıklık değerine kadar çevrimsel hareketlilik (zeminin geçici olarak taşıma mukavemetini kaybetmesi) olabileceğini bildirmekle birlikte, en azından boşluk suyunun yeniden dağılması ve drene olmasından önce, bu bölgede meydana gelen şekil değiştirmelerin önemsiz olduğunu bildirmişler. Ferritto (1997) sıvılaşmanın oluşmayacağı bir üst relatif

sıklık limit değerinin belirlenmesinin olanaksız olduğunu, bununla beraber, relatif sıklık değerinin % 80'in üzerinde olması durumunda sıvılaşma olasılığının azaldığını vurgulamaktadır.

### 3.2.1.2. İnce Tane Oranı

Laboratuvar (Lee ve Seed, 1967; Chang ve diğ., 1982; Koester, 1994) ve arazi (Mogami ve Kubo, 1953; Robertson ve Campenella, 1985; Holzer ve diğ., 1989) koşullarında yapılan çalışmalarda hem temiz kum hem de kum içeren zeminlerin sıvılaşabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca, plastik olmayan siltlerin de sıvılaşabilir olduğu rapor edilmiştir (Dobry ve Alvarez, 1967; Okusa ve diğ., 1980; Garga ve McKay, 1984). En kolay sıvılaşabilen kumların ortalama dane çapı 0.2 mm civarında olduğu söylenebilir (Şekil 3.4) (Ulusay, 2000).

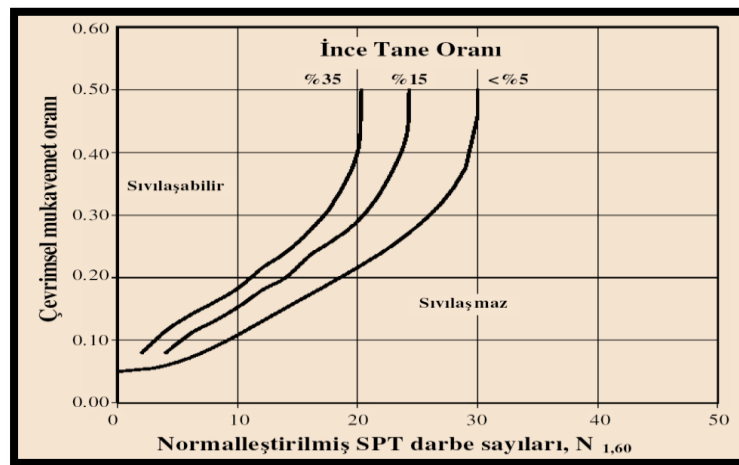


Şekil 3.4. En kolay sıvılaşan ve potansiyel sıvılaşma eğilimine sahip zeminler için tane boyu açısından sıvılaşma alt ve üst sınırlarını gösteren tane boyu dağılım eğrileri (Ulusay, 2000)

#### 3.2.1.2.1. Plastik Olmayan İnce Tane Oranı

Plastik olmayan ince tane oranının sıvılaşma üzerine etkisi konusunda bilimsel çalışmalarda yapılan araştırmalar sonucunda tam bir uzlaşma sağlanamamıştır (Polito, 1999). Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarında kumlu zemin içerisindeki plastik olmayan ince tane oranı arttıkça zeminin sıvılaşma mukavemeti belirli bir ince tane içeriği limitine kadar azalmakta ve bu limit değerden sonra

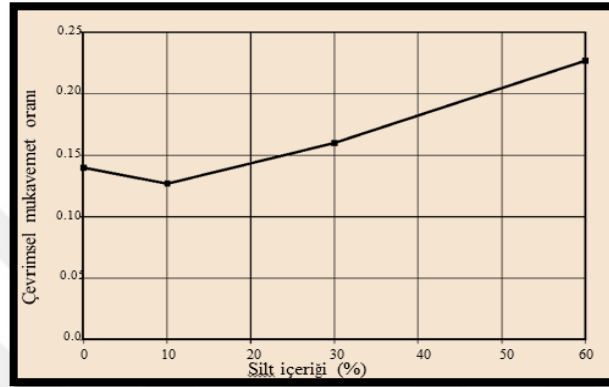
artmaktadır. Tarihsel kayıtlara dayalı depremler sırasındaki gerçek zemin davranışına ilişkin veriler, ince tane oranı daha yüksek olan zeminlerin sıvılaşma olasılığının daha az olduğunu göstermektedir. Örneğin 1964 Niigata/Japonya depreminde ince tane oranı %10'dan daha az olan kumlu zeminlerin sıvılaşma eğiliminin daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Okashi, 1970). Ek olarak, Fei (1991), 1976 Tangshan/Çin depreminde siltli zeminlerin sıvılaşma mukavemetinin artan ince tane oranı ile arttığını bildirmiştir. Tokimatsu ve Yoshimi (1983) dünya çapında meydana gelen 17 depreme ilişkin çalışmalarında sıvılaşma olayı görülen zeminlerin %50'sinde ince tane oranının %5'ten daha az olduğunu bildirmişlerdir. Arazide sıvılaşma olasılığının belirlenmesinde kullanılan çalışmalarda SPT darbe sayısı veya konik penetrasyon testi (CPT) ölçümlerine dayanan yöntemlerde zeminin ince tane oranı mutlaka dikkate alınmalıdır (Tatsuoka ve diğ., 1980). Seed ve diğ. (1985) ince tane oranına bağlı olarak sıvılaşma mukavemetindeki değişimi belirlemek için orijinali Seed ve Idriss (1971)'de verilen çevrimsel mukavemet oranı (CSR) ile normalleştirilmiş SPT darbe sayıları arasındaki ilişkiyi gösteren eğrileri modifiye etmişlerdir (Şekil 3.5). Buna göre, belirli bir SPT darbe sayısında yüksek oranda ince tane içeren bir zeminin sıvılaşması için daha büyük çevrimsel mukavemet oranı gereklidir.



Şekil 3.5. Büyüklüğü 7.5 olan depremler için SPT temiz kum eğrileri (Polito, 1999).

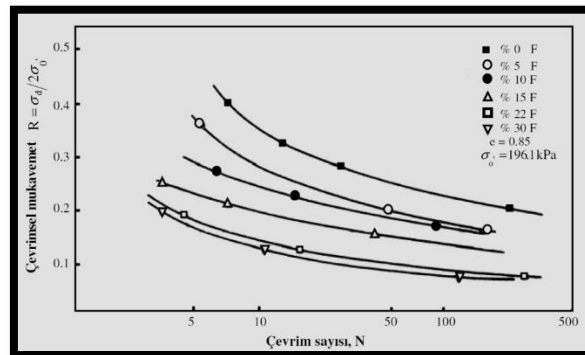
Laboratuvarda yapılan çalışmalarda ise çeşitli araştırmacılar tarafından kumlu zeminlerin çevrimsel mukavemetinin artan silt içeriğiyle birlikte arttığını

bildirmişlerdir. Chang ve diğ. (1982) sabit boşluk oranına sahip örnekler üzerinde yaptıkları çalışmalarda artan silt içeriğiyle birlikte çevrimsel mukavemet oranının başlangıçta küçük bir azalma ile birlikte dramatik olarak arttığını bildirmişlerdir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Artan silt içeriği ile çevrimsel mukavemetin artışı (Chang ve ark., 1982).

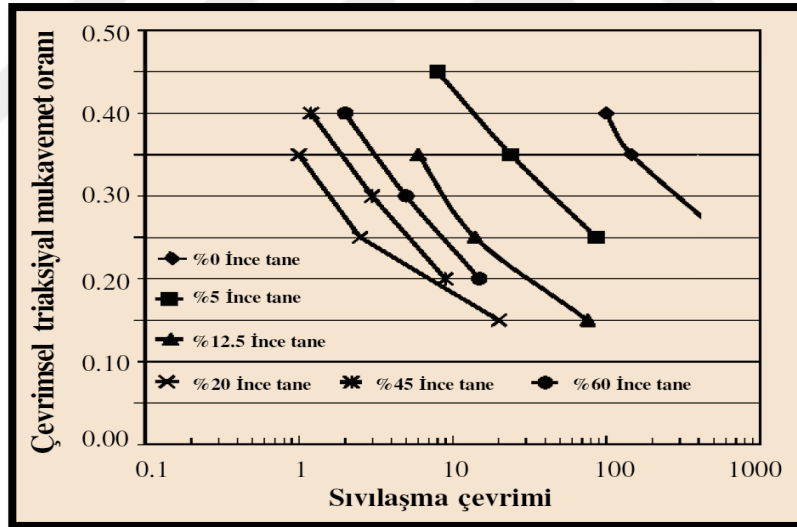
Diğer taraftan Shen ve diğ. (1977), Tronsco ve Verdugo (1985) ve Vaid (1994) hem sabit bir boşluk oranına hem de sabit kuru yoğunluğa sahip örnekler üzerinde yaptıkları çalışmalarda artan silt içeriği ile birlikte çevrimsel mukavemetin azalma eğilimi sergilediğini savunmaktadırlar. Şekil 3.7'den de görülebileceği gibi zemin silt içeriğindeki % 30'luk bir artış çevrimsel mukavemette temiz kuma göre %60 gibi önemli oranda azalmaya neden olmaktadır (Tronsco ve Verdugo, 1985).



Şekil 3.7. Artan silt içeriği ile çevrimsel mukavemetin azalması (Tronsco ve Verdugo, 1985).

Law ve Ling (1992) ve Koester (1994) hazırladıkları sabit boşluk oranına sahip örneklerde artan silt içeriğine bağlı olarak zemin çevrimsel mukavemetinin belirli

bir silt içeriğine kadar azaldığını, bu değerden sonra ise artışa geçtiğini belirlemişlerdir. Koester (1994), zeminin %60 oranında silt içermesi durumunda zemin çevrimsel mukavemetindeki azalmanın %20 silt içeren temiz kumun mukavemetinin dörtte birinden daha az olduğunu, çevrimsel mukavemetteki artışın ise temiz kumun mukavemetinden %32 daha fazla olduğunu rapor etmiştir. Yukarıda verilen araştırma sonuçlarıyla gerek Chang ve diğ. (1982) gerekse Dezfulian (1982)'de elde edilen bulgular karşılaştırıldığında her iki çalışmada da temiz kum için çevrimsel mukavemet değerlerinde Law ve Ling (1992) ve Koester (1994)'de bildirilen düzeyde artış rapor edilmemiştir. Artan ince tane oranına bağlı olarak çevrimsel mukavemette meydana gelen bu dalgalanmalar Şekil 3.8'de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.8. Silt içeriğine bağlı olarak çevrimsel mukavemette meydana gelen değişimler (Koester, 1994).

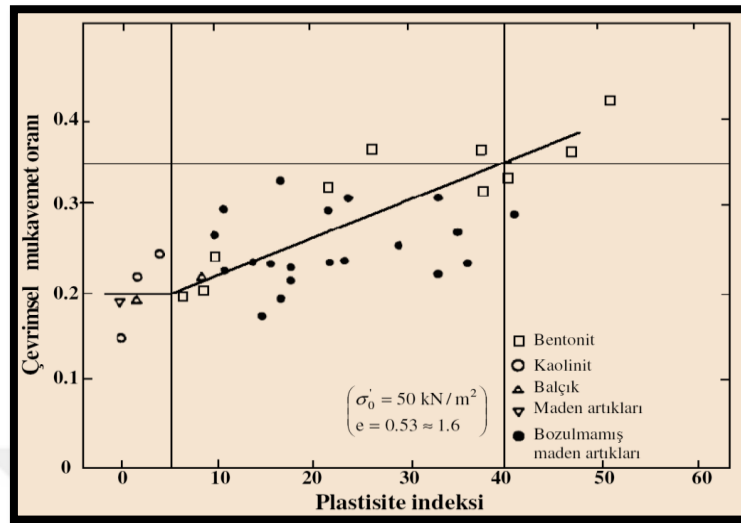
Diğer taraftan, bütün zeminler için geçerli olmamakla birlikte, zemin iskelet boşluk oranının sabit olması durumunda bazı zeminlerde çevrimsel mukavemet değeri sabit kalmaktadır (Polito, 1999). Shen ve diğ. (1977), Kuerbis ve diğ. (1988) ve Vaid (1994) sabit zemin (kum) iskelet boşluk oranına sahip örneklerde kumlu zeminin çevrimsel mukavemetinin sabit kalmayıp, artan silt içeriğiyle birlikte arttığını rapor etmişlerdir.

Yukarıda verilen bilgilerden açıkça görüldüğü üzere kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde tek başına ince tane oranına ilişkin verilerin kullanılması ile sağlıklı bir karar verebilmek olanaklı değildir.

### **3.2.1.2.2. İnce Tane Oranı ve Plastisite**

Yapılan çalışmalarda, ince taneli bileşenin plastisitesi ve miktarının kumlu zeminlerde sıvılaşma mukavemeti üzerine etkisi konusunda aynı düşüncede olduğu sağlanmıştır. İnce taneli materyalin siltli ya da killi olması, daha da önemlisi plastik veya plastik olmayan özellik göstermesi durumunda zemin çevrimsel mukavemetinde tutarlı farklılıklar olduğu gerçeği birçok araştırmacı tarafından kabul görmüştür (Polito, 1999). Bu konuda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda zeminde plastik ince tane olması durumunda zeminin sıvılaşma mukavemetinin arttığı bildirilmektedir.

Seed ve diğ. (1983), zemin kil içeriğinin %20'nin üzerinde olması durumunda sıvılaşma olmadığını rapor etmişlerdir. Dünya çapında meydana gelen depremleri inceledikleri çalışmalarında Tokimatsu ve Yoshimi (1983) da aynı sonuca ulaşmışlardır. Şekil 3.9'dan da görüldüğü üzere plastisite indeksindeki artış çevrimsel mukavemet değerindeki artışı da beraberinde getirmektedir (Ishihara ve Koseki 1989).



Şekil 3.9. Plastisite indeksi çevrimsel mukavemet ilişkisi (Ishihara ve Koseki 1989).

Ishihara ve Koseki (1989), zeminin kil içeriği yada ince tane oranı ile sıvılaşma mukavemeti arasında açık bir korelasyon bulunmadığını saptadıklarını ancak, artan plastisite indeksinin zemin sıvılaşma mukavemetini sürekli olarak arttırdığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde, Yasuda ve diğ. (1994), artan plastisite indeksinin sıvılaşma mukavemetini arttırdığını rapor etmişlerdir. Diğer taraftan yalnızca Koester (1994) tarafından bildirildiğine göre, zemin plastisite indeksi, plastik ince tane içeren zeminlerde, zemin sıvılaşma mukavemetini kontrol eden bir faktör değildir.

Seed ve diğ. (1973), Şubat 1971'deki San Fernando depremi sırasında Aşağı San Fernando Barajı'nda meydana gelen zemin oturmalarının, Jennings (1980) tarafından rapor edilen Çin kriterlerine uygunluk gösterdiğini bildirmişlerdir. Marsuson ve diğ. (1990), içerdiği materyalin %15'inden fazlasının tanecik boyutunun 0.005 mm'den daha küçük olan zeminler ile likit limiti %35'ten büyük ve likit limitin %90'ından daha az su içeren zeminlerin sıvılaşma riski taşımadığını bildirmişlerdir.

Finn ve diğ. (1994), ASTM standartları ile Çin standartları arasındaki likit limit belirlemelerindeki farklılıkların ve belirsizliklerin giderilmesi için Çin kriterlerinde bazı değişiklikler yapılmasını önermişlerdir. Araştırmacılar, ince tane oranında %5, likit limitte %1 ve su içeriğinde %2'lik bir azalma öngörmüşlerdir. Ayrıca

Koester (1994), Finn ve diğ. (1994) tarafından önerilen kriterlere ek olarak likit limitin %36'ya çıkarılması gerektiğini bildirmiştir.

### 3.2.1.3. Tane Boyutu Karakteristiği

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı göstermiş olduğu hassasiyeti zemini oluşturan tanelerin boyutlarına, şekline, derecelenmesine ve zemin türüne bağlıdır. Tane boyutu ve dağılımı boşluk suyu basıncı gelişimini ve dağılımını kontrol etmektedir (Ferritto, 1997). Kaba kumların geçirgenliği ince kumlara göre daha yüksektir. Titreşim neticesinde meydana gelen boşluk suyu basıncı iri taneli zeminlerde kolaylıkla düşmekte olup, böylesi kum zeminlerin sıvılaşma eğilimi daha az olmaktadır (Ferritto, 1997; Turoğlu, 2004). Kramer (1996)'da bildirildiğine göre killi zeminler sıvılaşmış zeminlerde olduğu gibi gerilme-yumuşama (strain-softening) davranışı sergileyebildiklerinden dolayı sıvılaşmaya karşı hassas zeminler olup, kumlu zeminlerin sıvılaşmasında olduğu gibi bir sıvılaşma davranışı göstermezler. Diğer taraftan tamamen üniform tane boyundaki parçacıklardan oluşan zeminler, tane boyutu geniş sınırlar içinde değişen parçacıklardan oluşan zeminlere kıyasla daha yüksek sıvılaşma riski taşımaktadırlar (Kramer, 1996). Farklı tane boyutlarından oluşan zeminlerde küçük çaplı parçacıklar daha büyük çaplı parçacıklar arasında yer alan boşlukları doldurma eğiliminde olup, bu durum herhangi bir sarsıntı sırasında meydana gelecek zemin sıkılaşması eğilimini ve boşluk suyu basıncının meydana gelme eğilimini azaltmaktadır. Ayrıca, şekilli taneler köşeli tanelere göre daha çabuk bir araya gelme eğiliminde olduklarından sıvılaşmaya daha yatkındırlar.

Taneleri köşeli olan zeminler belirli bir konsolidasyon basıncına kadar sıvılaşmaya karşı daha dirençli olmasına karşın, yüksek basınçlarda köşelerin kırılıp ince tane oluşturmaları nedeniyle sıvılaşmayı kolaylaştırmaktadırlar (Kramer, 1996). Sıvılaşabilir zeminlere ilişkin karakteristik değerler (Wang ve Law, 1994); *ortalama tane boyutu*  $d_{50} = 0.02-1.00 \text{ mm}$ , *ince tane* ( $d < 0.005 \text{ mm}$ ) *içeriği*  $< \%10$ , *üniformalite katsayısı* ( $d_{60}/d_{10}$ )  $< 10$ , *plastisite indeksi*,  $I_p < 10$  dir.



Silt, kil ve kum karışımlarının sıvılaştırılabilirliğinin belirlenmesine yönelik çalışmalarında Andrews ve Martin (2000), Seed ve diğ. (1984 ve 1985) veri tabanını yeniden değerlendirmişlerdir (Çizelge 3.2). Buna göre iri taneli (siltli ve killi) zemin parçacıklarının iri taneleri birbirinden ayıracak yada genel zemin davranışını kontrol edebilecek miktarlarda olduğu durumlarda, sıvılaşmasının meydana gelebilmesi için siltli yada killi malzemenin plastik özellik göstermemesi yada plastisitesinin  $\leq 10 - 12$  aralığında olması gereklidir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Düşük plastisiteli silt ve siltli kumlar hem sıvılaştırılabilir olmaları hem de boşluk suyu basıncının hızlı drenajını engelleyebilecek kadar düşük geçirimsizlikleri nedeniyle en tehlikeli zeminler olarak değerlendirilmektedir (Çetin ve Unutmaz, 2004).

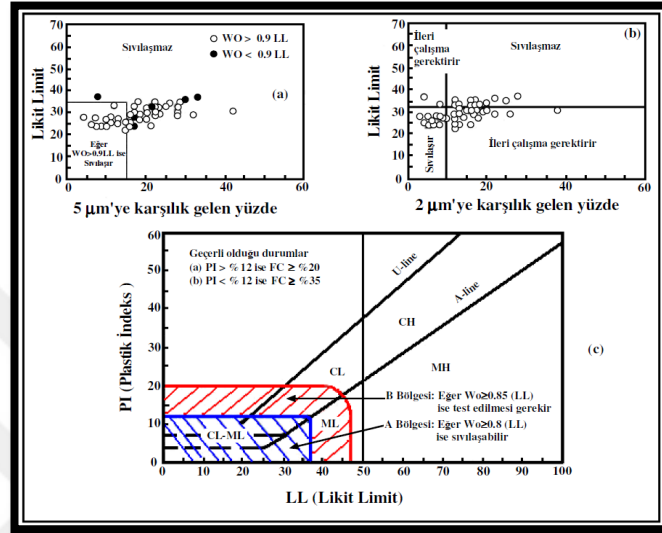
Çizelge 3.2. Siltli ve Killi Kumların Sıvılaştırılabilirliği (Andrews ve Martin, 2000).

	Likit limit <sup>1</sup> < 32	Likit limit <sup>1</sup> ≥ 32
Kil içeriği (<0.002 mm) < %10	Sıvılaştırılabilir	İleri çalışma gerekir (plastik kil harici boyutlu tane olduğu düşünülerek- Mika gibi)
Kil içeriği (<0.002 mm) ≥ %10	İleri çalışma gerekir (plastik olmayan kil boyutlu tane olduğu düşünülerek – maden veya ocak atığı gibi)	Sıvılaşmaz

<sup>1</sup> Casagrande tipi darbe aleti ile belirlenen likit limit değerleri

Buraya kadar verilen sıvılaşma kriterleri içinde tüm zemin türlerinin sıvılaşma davranışlarının tespit edilmesi için yeterli değildir. Örneğin, Bray ve diğ. (2004) tarafından 1999 Kocaeli depremi sonrası Adapazarı'nda yapılan bir çalışmada Çin kriterlerince sıvılaşmayacağı düşünülen zeminlerin de sıvılaşabileceği ortaya konmuştur (Çin kriterlerine göre ince taneli zeminlerde (FC>35) sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için likit limit,  $LL < 35$  ve  $W_p/LL > 0.9$  olması gerekmektedir). Şekil 3.10 (a) ve (b) Kocaeli depremi sonucunda Adapazarı'ndan elde edilen deney sonuçlarını göstermekte olup, açıkça görüldüğü üzere sıvılaşmış zeminlerin bir kısmı hem Çin kriterlerine hem de Andrews ve Martin (2000)'e göre sıvılaşmayacağı düşünülen kısımda yer almaktadır (Çetin ve Unutmaz, 2004). Bu verilere dayalı olarak Seed ve diğ. (2003) ince taneli zeminlerin sıvılaşma performansının belirlenmesine yönelik olarak Şekil 3.10 (c)'de verilen yeni ilişkileri

tanımlamışlardır. Likit limit (LL) değeri yükseldikçe risk artar. LL değeri arttıkça ortam daha akıcı bir durum alır ki buda sıvılaşma riskini artırır.



Şekil 3.10. 1999 Kocaeli depremi sonucunda Adapazarı'nda elde edilmiş test sonuçları (Bray ve diğ., 2004). (a) Çin kriterleri (Seed ve Idriss, 1982; Wang, 1979); (b) Andrews ve Martin (2000); (c) Seed ve diğ., 2003.

### 3.2.1.4. Zeminin Drenaj Koşulları

Özellikle çevrimsel yüklemelerde, zemin içerisinde dağılmasına izin verilen boşluk suyu basıncı hızı sıvılaşmanın olup olmayacağını belirleyen en önemli faktörlerden biridir (Wong ve diğ., 1974). Boşluk suyu basıncı dağılma hızının, en uzun drenaj hattı mesafesinin bir fonksiyonu olduğu bilindiğinden zemin profilinin ayrıntılı geometrisinin belirlenmesi son derece önemlidir (Ferritto, 1997). Yoshimi ve Kuwabara (1973), sıvılaşma oluşumu sırasında farklı katmanların sıkıştırılabilirliği ve geçirimsizlikleri arasındaki ilişkileri irdeleyen analitik çalışmalarında, sıvılaşmanın, başlangıçta oluşan sıvılaşma hattına kıyasla, alttaki sıvılaşmış olan katmandan bu tabakayı kaplayan geçirimsizliğe daha kolay aktarılabilirliğini rapor etmişlerdir.

### 3.2.1.5. Sıvılaştırılabilir Zeminin Derinliği ve Yeraltı Su Seviyesi Derinliği

Sıvılaştırılma oluşunu efektif dūřey gerilme tarafından kontrol edilmektedir. Őimdiye kadar meydana gelen sıvılaştırılma olayları incelendiğinde 15 m'nin altındaki derinliklerde rapor edilmiş bir sıvılaştırılma olayı geręekleřmemiřtir (Derinöz, 2004). Bu durum, bu derinlikte meydana gelen sıvılaştırılma olayı etkilerinin yūzeeye ulaşamadığını ya da belirli bir derinliğin altında sıvılaştırılma meydana gelmediğini gōstermektedir. Diđer taraftan, sıvılaştırılma olayının gōzlendiđi çođu bōlgelerde yer altı su seviyesi derinliği 3 metre'den daha az olup, sadece birkaç olayda 3-4 metre arasında değişmektedir. Yer altı su seviyesinin 5 metre'nin ūzerinde olduğu bōlgelerde sıvılaştırılma olayı gōzlenmemiřtir (Wang ve Law, 1994).

Yeraltı suyunun yūzeeye yakın olması ve depremlerin ani ve çok kısa sūreli hareketlere neden olması, taneler arasında suyun kaçması için gereken yeterli sūreye olanak sağlamakta, dolayısıyla ortamdan uzaklaşamayan gōzenek suyu basıncını birden arttırmaktadır. Gōzenek suyu basıncındaki bu ani artış, yerin tanelerini bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek taneleri birbirinden uzaklaştırır ve bōylece zemin dayanımını yitirir. Bu koşullar altında yerin, deprem ūncesinde gōsterdiđi rijit davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak suyla birlikte yer yūzeyine doğru hareket eder ve yer yūzeyinden çıkmaya başlar. Yeraltı suyunun yūzeeye yakın olmadığı durumlarda gōzenek suyu basıncında bir değişiklik olmayacak ve yer dayanımını yitirmeyecektir.

### 3.2.2. Jeolojik Şartların Sıvılaştırılmaya Etkisi

Kramer (1996)'ya gōre, zeminlerin oluřumuna iliřkin jeolojik sūrelerin tipi sıvılaştırılma hassaslıđı ūzerinde ūnemli bir etkiye sahiptir. Nehir ve gōl yataklarında sedimentasyon yoluyla oluřan dolgular (fluvial ya da alūviyal dolgular), yıkıntı, enkaz (debris) ya da ařınma (erosion) sūreciyle oluřmuř dolgular (kolūviyal dolgular) ya da rūzgar etkisiyle tařınarak oluřmuř dolgular (aeolian deposits) gibi suya doygun zemin tabakaları yūksek oranda sıvılaştırılma riski tařımaktadırlar. Zemin oluřumu

sırasında gerçekleşen jeolojik süreçler, zemini oluşturan partiküllerin tekdüze tane boyutunda düzenlenmesini sağlamakta ve herhangi bir deprem olduğu sırada bu parçacıkların sıkılaşma eğilimi sergileyecek şekilde gevşek bir formasyon oluşturmaya neden olurlar. Gevşek zemin materyalinin sıkılaşma eğilimi boşluk suyu basıncının artmasına, zemin mukavemetinin azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca, insan kaynaklı zemin çökelleri ve özellikle hidrolik doldurma işlemleri sonucu oluşturulan dolgular da sınıvlaşma potansiyeline sahiptirler.

Genel olarak, sınıvlaşma her zeminde ve her koşulda meydana gelen bir davranış biçimi olmayıp, belirli jeolojik ortamlarda ve hidrojeolojik koşullar altında gerçekleşmektedir. Çizelge 3.3'den de görüldüğü üzere genç ve gevşek çökeller sınıvlaşma için en uygun ortamlardır. Holosen yaşlı (10 000 yıldan daha genç) delta, akarsu, taşkın ovası ve kıyı ortamlarındaki çökeltme süreçleri sonucunda birikmiş çökeller sınıvlaşmaya karşı son derece duyarlıdır (Strahler, 1974; Forbes, 1985; Bradshaw ve diğ., 1989; Coates, 1990; Erinç 2000). Yol ve baraj çalışmalarında inşa edilen ince taneli ve iyi sıkıştırılmamış dolgular sınıvlaşma potansiyeli taşırlar. Sınıvlaşma, yeraltı su seviyesinin yüzeyden itibaren en fazla 10 m derinlikte bulunduğu ortamlarda yaygın olarak gözlenmektedir.

Sınıvlaşma hassaslığı zemin biriminin jeoteknik özellikleri ve topoğrafik durumu ile yakından ilişkilidir. Bölgedeki mevcut depremsellikten bağımsızdır. Sınıvlaşma hassaslığına etki eden faktörler; çökeltme koşulları, birimin yaşı, jeolojik geçmişi, yer altı suyu derinliği, tane çapı dağılımı, yoğunluğu, derinliği ve eğimidir (Siyahi ve ark., 2003). Çeşitli sedimentler için sınıvlaşma hassaslığına etki eden bu faktörler arasındaki niteliksel değerlendirme Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Deprem Sırasında Sınıvlaşabilecek Zeminlerin Tahmini Hassaslıkları (Youd ve Hoose 1977; Youd ve Perkins, 1978).

Zemin tipi	Zemindeki kohezyonsuz bileşenin genel dağılımı	Zeminlerin doygun olduklarında yaşlarına göre			
		<500 yıl	Holosen	Pleistosen	Pliyosen öncesi
a) Kıtasal					
Nehir yatağı	Bölgesel değişken	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok düşük
Sel ovaları	Bölgesel değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Alüvyon ova ve yelpazesi	Yaygın	Orta	Düşük	Düşük	Çok düşük

Deniz taraçası ve ovası	Yaygın	-	Düşük	-	Çok düşük
Delta ve delta yelpazesi	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Gölsel	Değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Kolüvyon	Değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Talus	Yaygın	-	Düşük	-	Çok düşük
Kum tepelikleri	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Lös	Değişken	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Bilinmiyor
Buzul etkisi	Değişken	Düşük	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Tüf	Seyrek	Düşük	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Tempra	Yaygın	Yüksek	Yüksek	?	?
Yerinde oluşan zemin	Seyrek	Düşük	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Sebka	Bölgesel değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
b) Kıyasal					
Delta	Yaygın	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok düşük
Esturin	Bölgesel değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Kumsal yüksek dalga	Yaygın	Orta	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Kumsal düşük dalga	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Gölsel	Bölgesel değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Sahil	Bölgesel değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
c) Yapay					
Sıkıştırılmamış dolgu	Değişken	Çok yüksek	-	-	-
Sıkıştırılmış dolgu	Değişken	Düşük	-	-	-

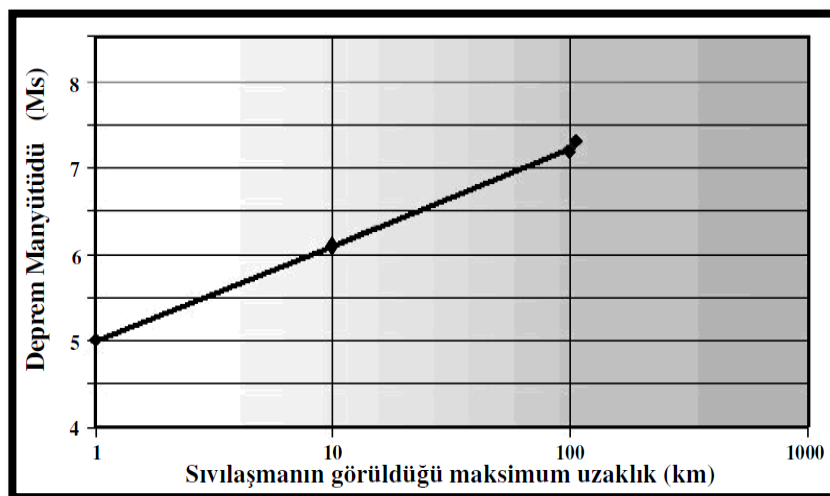
### 3.2.3. Yer Hareketlerinin Sıvılaşmaya Etkisi

Sıvılaşma çalışmalarında söz konusu zeminin sismik geçmişine ilişkin veriler büyük önem arz etmektedir (Ferritto, 1997). Sıvılaşma ve oturma, uygulanan dinamik yükün doğasına, büyüklüğüne ve tipine bağlıdır. Kuru kumlarda yatay titreşimler dikey titreşimlere kıyasla daha büyük oturmalara neden olmaktadır (Prakash ve Gupta, 1967). Seed (1976), çok yönlü gerilme veya sarsıntı koşullarında boşluk suyu basıncının tek yönlü sarsıntıya kıyasla daha hızlı yükseldiğini, pik boşluk suyu basıncı için gerekli gerilme değerinin ise çok yönlü sarsıntıda tek yönlü sarsıntıya göre %10 daha az olduğunu saptamıştır.

Belirli bir çevre basıncında, sıvılaşma mukavemeti zemin relatif sıkılığına bağlı olarak artmakta olup, sabit bir zemin sıkılığında ise sıvılaşma mukavemeti artan çevre basıncına (confining pressure) bağlı olarak artmaktadır (Kramer, 1996). Nitekim Castro (1969) ve Kramer ve Seed (1988) gibi çeşitli araştırmacılar bir zeminde önceden mevcut olan statik kesme direncinin bu zeminin statik sıvılaşma

potansiyelini önemli oranda etkilediğini ortaya koymuşlardır. Zeminin çevre basıncı ne kadar yüksek olursa sıvılaşma potansiyeli de o kadar artmakta olup, zeminin sıvılaşması için daha küçük miktarda bir sarsıntı yeterli olacaktır.

Ayrıca, bir bölgede sıvılaşma imkanı ya da genel anlamda zemin yenilmeleri olasılığı o bölgenin deprenselliğinin veya sıvılaşmaya hassas zeminlerde sıvılaşmaya neden olabilecek depremlerin tekrarlanma oranına bağlı olarak değişmektedir (Siyahi ve diğ., 2003). Sıvılaşma olayının başlangıç enerjisi yer hareketleri tarafından sağlandığından, deprem odaklarının, sıvılaşma riski incelen bölgelere olan uzaklıkları da önemlidir (Ündül ve Gürpınar, 2003). Youd ve Perkins (1978), geçmişte yaşanmış 57 depremi inceleyerek oluşturdukları deprem magnitüdü ve sıvılaşmaların görüldüğü en uzak mesafe arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak ifade etmişlerdir (Şekil 3.11). Buna göre sıvılaşma olayı daha çok büyüklüğü 5 ve 5'in üzerinde olan depremlerde depremin episantrından 100 km'ye kadar olan alanlarda görülebilmektedir. Deprem magnitüdü depremde çıkan enerji ile belirtildiğinden daha büyük bir deprem oluştuğunda çıkan enerjide büyük olmaktadır. Yani sarsıntı fazla olacaktır. Sarsıntıda sıvılaşma sırasında önemli olduğundan sıvılaşma etkisini arttıracaktır. Tanelerin yer değiştirmesi ve suyun boşluk bulduğu alanlarda dolaşımını artacaktır. Dolayısıyla depremin magnitüdü sıvılaşmayla doğrudan ilgili bir parametredir.



Şekil 3.11. Deprem magnitüdüne bağlı olarak sıvılaşmanın görüldüğü en uzak mesafe (Youd ve Perkins, 1978).

### 3.2.3.1. Kayma Dalga Hızı ( $V_s$ )

Kayma dalga hızı ( $V_s$ ) zeminin efektif basıncına, gerilme durumuna, zeminin boşluk oranına, katılığına bağlı olarak belirlenen önemli bir fiziksel parametredir. Özellikle, depremin yer tepkisi ve yapı-zemin ilişkisi için gerekli olan kayma modülü ile direkt ilişkilidir. Sahada ve laboratuvarında numuneler üzerinde belirlenebilmesinden dolayı karşılaştırma olasılığı olan kolay ve hızlı bir yöntemdir. Özellikle SPT ve CPT ölçümleri yapılmayan ortamlarda da kolaylıkla elde edilebilen  $V_s$  verilerine dayalı sıvılaşma analizleri de son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır (Dobry ve diğ.,1981a, Tokimatsu ve Uchida 1990). Ayrıca SPT'nin uygun olmadığı çakıllı zeminlerde  $V_s$  ölçümleri yapılabilmektedir.

Bununla birlikte sıvılaşma potansiyeli araştırmalarında SPT-N ve  $V_s$  dalga hızı arasında geliştirilen deneysel bağıntılar yardımıyla da analizler yapılabilmektedir (Akin ve diğ., 2011). Zeminde yapılan testlerde S dalgası hızının yüksek olması su içeriğinin olmadığını gösterir (Lade ve Yamamuro 1998,1999).

### 3.2.3.2. İvmenin Zemin Sıvılaşmasına Etkisi

İvme artmasıyla tanelerin yer değiştirmesi ve yeraltı suyunun hareket hızı artarak sıvılaşmaya çok büyük bir etken olarak katılmaktadır (Lade ve Yamamuro 1998,1999). Deprem sırasında oluşan zemin titreşimleri, zemin koşulları da dikkate alınarak odaktan uzaklaştıkça azalır. Sıvılaşma analizleri için deprem magnitudü kullanılmakta ve M magnitudünde ki bir depremin, R odak uzaklığındaki yeryüzünün bir noktasında yapacağı en büyük ivme değerini veren azalım ilişkilerine ihtiyaç duyulabilmektedir.

Deprem sırasında yapıyı etkileyen yanal yükler ivmenin sonucu olarak ele alındığından depremle ilgili mühendislik hesaplarında yer ivmesinin öneminden dolayı

birçok araştırmacı yeryüzünün çeşitli bölgeleri için azalım ilişkileri geliştirmişlerdir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Çeşitli araştırmacıların azalım ilişkisi bağıntıları (Uyanık, 2002)

Ivme Azalım İlişkileri	Referans	Açıklama
$a=2000e^{0,8M}(R+20)^{-2}$	Esteva&Rosenblueth,1963	Kaya
$A=1230e^{0,8M}(R+25)^{-2}$	Esteva(Gençoğlu&Tabban,1975)	Orta siki zemin
$a=2000e^{0,8M}(R+25)^{-2}$	Esteva(Gençoğlu&Tabban,1975)	Sert zemin
$a=1080e^{0,5M}(R+25)^{-1,32}$	Esteva(Gençoğlu&Tabban,1975)	Dolgu zemin
$A= \frac{5}{\sqrt{T_0}} 10^{0,61M-P \log R+Q}$ $P=1,66 + \frac{3,6}{R}; Q=0,167 - \frac{1,83}{R}$	Kanai,1966	Zemin
$A=10^{(-2,1+0,81M+0,027M^2)}$	Gutenberg&Richter,1956	Kaya
$T_0$ : Dalga Hakim Periyodu (s)	$a$ : Yatay Yer İvmesi (cm/s <sup>2</sup> )	
$R$ : Odak Uzaklığı (km)	$M$ : Magnitüd	

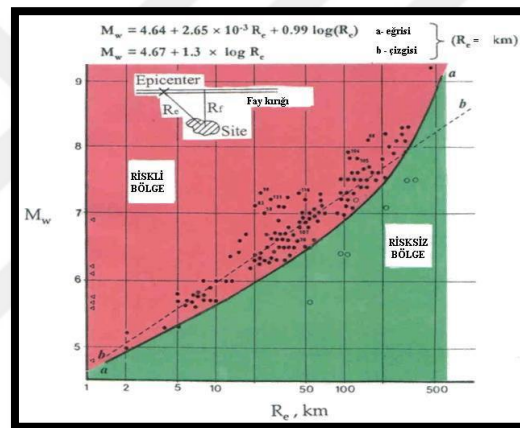
### 3.2.3.3. Deprem Magnitüdü, Deprem Eşik Şiddeti ve Maksimum Odak Uzaklığının Zemin Sıvılaşmasına Etkisi

Deprem magnitüdü depremde çıkan enerji ile belirtildiğinden büyük bir depremden çıkan enerjide büyük olacaktır. Sarsıntıda sıvılaşma sırasında önemli olduğundan sıvılaşma etkisini arttıracaktır. Tanelerin yer değiştirmesi ve suyun dolaşımı artacaktır. Dolayısıyla depremin magnitüdü sıvılaşmayla doğrudan ilgili bir parametredir.

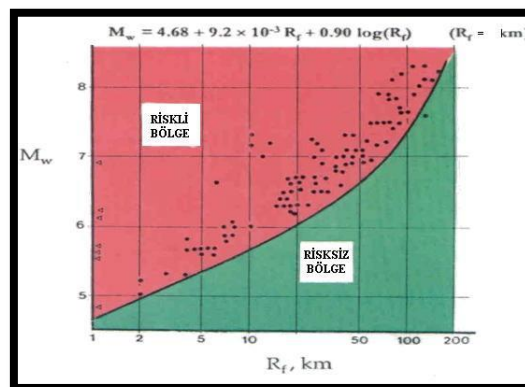
Belirli zemin koşulları ve çevre basıncı altında deprem süresince sıvılaşma hassasiyeti, gerilme büyüklüğüne ya da deformasyonlara dayanır. Bu durum yer sarsıntısının şiddeti ile ilişkilidir (Seed ve Idriss, 1971). Yapılan araştırmalar sonucunda, sıvılaşma potansiyelinin sismik kaynağa belirli bir mesafede olan bölgelerden etkilendiğini göstermiştir. Kuribayashi ve Tatsua (1975), Şekil 3.12'de sunulan;  $\log R_c=0,77M-3,60$  formülü ile tanımlanan b çizgisini ortaya koymuşlardır. Saha uygulamaları bu çizginin güvenli bir sınır oluşturmadığını göstermiştir. Ambraseys (1988) yüzey



depremlerinden elde ettiği dünya çapındaki verileri, farklı deprem büyüklüklerinde sıvılaşmanın gözlenmediği  $R_e$  (sınır odak uzaklığı) ve  $R_f$  (fay kırığı mesafesi) değerlerini hesaplamak için derledi. (Şekil 3.12) (a eğrisi) ve (Şekil 3.13) sırasıyla  $R_e$  uzaklığını yüzey depreminin odak mesafesinden sıvılaşma noktasına olan en uzak mesafeye kadar ki kısım ile  $R_f$ , deprem sismik kaynağına olan en yakın mesafeyi göstermektedir. Sıvılaşmanın beklendiği mesafe, deprem büyüklüğünün artması ile artış göstermektedir. Derin depremler ( $>50$  km) büyük mesafelerde dahi sıvılaşma oluşturabilir (Ambraseys, 1988).



Şekil 3.12. Odak noktası mesafesi  $R_e$  ve moment büyüklüğü arasındaki ilişki (a- çizgisi, Ambraseys, 1988; b-çizgisi, Kuribayashi ve Tatsuoka, 1975)



Şekil 3.13. Fay kırık mesafesi  $R_f$  ve moment büyüklüğü arasındaki ilişki (Ambraseys, 1988)

Deprem şiddetinin yüksek olması bir başka deyişle maksimum ivmesinin büyük olması sıvılaşma tehlikesini arttıran bir etkidir. Ayrıca magnitudü büyük olmayan bir

deprem hareketinin yüzeye doğru ilerlerken zemin tarafından büyütülebildiği söylenebilir.

Yeraltı suyu koşulları ve zemin değişken olmadığında aynı ortamda tekrar sıvılaşma oluşabilmektedir. Sıvılaşmanın etkisi sismik kaynaktan belirli bir uzaklıktaki kuşak içerisinde sınırlanabilmektedir. Sıvılaşmanın oluşacağı mesafe artan deprem büyüklüğüyle artar. Kayıtlara göre büyüklüğü 5'in altında şiddeti VI'nın altında, orta ve sığ derinlikteki bir deprem sonucu sıvılaşma olayı gözlenmemiştir (Wang ve Law, 1994).

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).

$$\Delta_{max} = 0.82 * 10^{0.862(M-5)} \quad (3.1)$$

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

$$\log D = 0.77 * M - 3.6 \quad (3.2)$$

bağıntısını önermişlerdir (Tezcan ve Özdemir, 2004).

#### **3.2.3.4. Sismik Geçmiş**

Geçmişte sıvılaşmaya maruz kalmış zeminlerin yeni depremler ile birlikte tekrar sıvılaşma gösterme ihtimalinin büyük olduğu hem laboratuvar çalışmalarından hem de arazi gözlemlerinden bilinmektedir (Ansal ve Ögünç, 1981). Yoğunlukları aynı olan ve geçmişte sismik sarsıntıya maruz kalmış daha yaşlı bir zemin tabakası ile genç bir zemin örneği kıyaslandığında; yaşlı olan zeminin daha yüksek bir sıvılaşma mukavemetine sahip olduğu gözlenmiştir.

### **3.3. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri**

Önceki bölümlerde verilen ölçütlerden sadece sıvılaşmaya karşı hassas olabilecek ortamların ve zeminlerin ayırt edilmesi için ön değerlendirme yapmak amacıyla yararlanılabilir. Dolayısıyla, bu ölçütlerden yararlanılarak yapılacak ön değerlendirmelerin sonuçlarına göre zeminlerin sıvılaşıp sıvılaşmayacağına kesin olarak karar verilmesi olanaklı değildir. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi çok sayıda zemin ve deprem parametrelerinin dikkate alındığı ayrıntılı analiz yöntemleriyle yapılmakta olup bunlara ilişkin bilgiler aşağıda başlıklar halinde verilmektedir.

#### **3.3.1. Laboratuvar Deneyleri**

Depremler sırasında meydana gelebilecek yapısal hasarlar üzerinde yerel zemin koşullarının etkisi büyüktür. Bu nedenle zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları ile deprem sonrası statik mukavemetlerinin belirlenmesi gereklidir. Zeminlerin deprem sırasındaki ve deprem sonrasındaki gerilme - şekil değiştirme davranışlarını laboratuvar ortamında çeşitli deneylerle belirlemek olanaklıdır. Özellikle suya doygun kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyelleri ve sıvılaşma sonrası davranışları laboratuvar ortamında dinamik basit kesme deneyi (Finn ve diğ., 1970; Seed ve Peacock, 1971), dinamik üç eksenli kesme deneyi (Seed ve Lee, 1966) ve dinamik burulmalı kesme deneyi (Yoshimi ve Oh-oka, 1973, Ishibashi ve Sherif, 1974), sarsma tablası (Das, 1993) gibi dinamik deney sistemleriyle incelenebilmektedir.

#### **3.3.2. Arazi Deneyleri**

Arazi deneyleri zemini doğal haldeyken test etme olanağı sunmaktadır. Daha büyük hacimde deney yapılarak ölçek etkisi dikkate alınabilmektedir. Yüzeyden itibaren istenilen derinliğe ulaşılabilir ve sürekli tanımlama yapılabilir. Fakat arazide sismik aktiviteyi simüle etmek zor olduğu için sıvılaşma potansiyelini ölçmede kullanılan

deneysel olarak, sıvılaşma dayanımı ile doğrudan ilgili zemin parametrelerine ulaşamaz. Değerlendirme kriterlerine ulaşmak için sıvılaşma meydana gelmiş geçmiş depremler incelenerek deneysel bağıntılar geliştirilmiştir (Wang ve Law, 1994).

Yüzeysel jeoloji ile yerel zemin koşulları arasında tekil bir ilişki olmaması nedeniyle, inceleme konusu olan alanlarda beklenebilecek sismik davranışın gerçeğe daha yakın olarak analiz edilebilmesi için jeo-teknik araştırmalara gereksinim vardır. Arazi zemin koşulları hakkında ayrıntılı bilgiler elde etmek amacıyla yapılacak jeo-teknik araştırmalar, taban kayası derinliğine kadar gerçekleştirilmelidir.

Genellikle kayma dalga hızı 700 m/s'den büyük olan formasyonlar "taban kayası" olarak kabul edilmektedir. Zemin profilinin sismik davranış açısından tanımlanabilmesi için kohezyonsuz zeminlerde ve katı zeminlerde Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), yumuşak zeminlerde ise Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) gibi arazi deneyleri çok faydalı bilgiler vermektedir. SPT deneyi, sınıflandırma için numune alınması ve zeminin sıklık derecesinin belirlenmesi için bilgiler vermesi yanında, darbe sayısı  $N$  ile kayma dalga hızı  $V_s$  arasında kurulan korelasyonlar açısından da yararlı olmaktadır. CPT deneyinde de zeminin cinsi ve sıklık derecesi zemin profili derinliği boyunca sürekli olarak belirlenebilmekte, CPT koni direnci ile SPT darbe sayısı arasındaki korelasyonlardan kayma dalga hızı belirlenebilmektedir (Özaydın, 2006).

### **3.4. Sıvılaşma Hasarları**

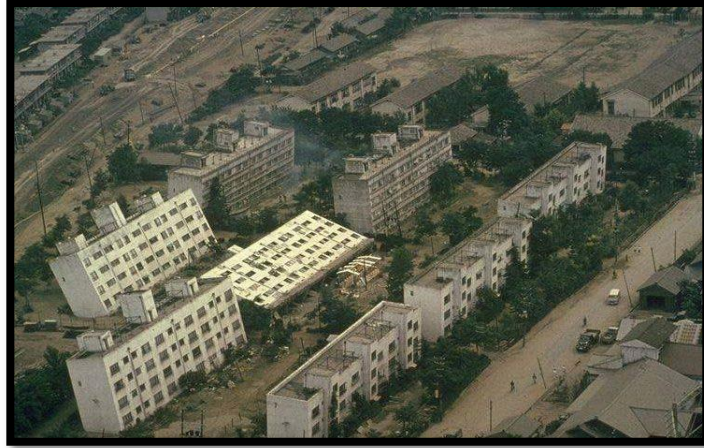
Suya doygun kum tabakaları ve bazı killi ve siltli formasyonlar, şiddetli bir depremde sıvılaşma yolu ile mühendislik yapılarına çok büyük hasarlar vermektedir. Geçmişte, 1964 Niigata depremi ( $M=7$ ), 1964 Alaska depremi ( $M=8.4$ ), 1995 Kobe depremi ( $M=7.2$ ) sırasında çok önemli sıvılaşma hasarları meydana gelmiştir. Kobe depreminde meydana gelen sıvılaşma hasarları, şehrin karayolu, demiryolu, metro ve liman gibi hayat damarlarını felce uğratmış, Japonya ekonomisine ağır bir darbe

indirmiştir. Sıvılaşma olayı depremlerin en beklenmedik, en kontrol edilemez ve en ağır hasar yaratan bir yönüdür. Bu çalışmada sıvılaşmaya elverişli yer cinsleri ile sıvılaşma kriterleri gözden geçirilmiş ve çalışma çevresinin sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir.

Sıvılaşmanın neden olduğu yer duraysızlıklarını yerin taşıma gücünü yitirmesi, yerin oturması, yerin salınımı, yanal yayılma, akma türü kayma olarak sınıflayabiliriz.

### 3.4.1. Yerin Taşıma Gücünü Yitirmesi

Yapıları taşıyan zemin sıvılaştığı zaman taşıma gücünü yitirerek deformasyona maruz kalır. Sıvılaşan kum yüzeye doğru yükselirken, dayanımını yitiren zemin yapının aktardığı yükleri taşıyamaz duruma gelir. Zemin üzerindeki yapılarda öne veya arkaya doğru yatar, ya da devrilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Yerinin taşıma gücünü yitirmesi sonucu yapılar yana yatmış veya devrilmiştir, Niigata, 1964 ( Ulusay, 2000 )

### 3.4.2. Yerin Oturması

Sıvılaşma sırasında sediman (veya kum) tanelerinin gösterdikleri bir araya gelme eğilimi ve zeminin taşıma gücünü yitirmesi, yüzeyde oturma şeklinde bir

deformasyona neden olabilir. Bu koşullarda yerde gelişen oturma yer değiştirmesi yerin üzerindeki yapıya yansıyarak, yapı yerin içine batar (Ulusay, 2000).

### **3.4.3. Yerin Salınımı**

Bu davranış biçimi, sıvılaşmanın yamaç eğiminin son derece az ve dolayısıyla yanal yönde bir değiştirmenin mümkün olduğu alanlarda gelişmesi halinde gözlenebilir. Sıvılaşma, yüzeye yakın derinlikteki yerinin bloklara ayrılmasına ve bu blokların ileriye ve geriye sürüklenmesine yol açar. Bu sürüklenme, deprem dalgaları gibi titreşimler yaratır. Titreşimle birlikte fisür veya çatlaklarda açılıp kapanmalar ve yerinde oturmalar meydana gelerek; yapılar, boru hatları ve yerin gömülü diğer alt yapı elemanları ciddi hasarlara maruz kalabilirler (Ulusay, 2000).

### **3.4.4. Yanal Yayılma**

Bu duraysızlık sırasında, sıvılaşan seviyenin üzerinde bulunan yer geniş bloklara ayrılır ve bloklar yanal yönde hareket eder. Bu hareket, depremden kaynaklanan çekim kuvvetleri ve içsel kuvvetlerin birlikte etkimesiyle meydana gelmektedir. Yanal yayılma, genellikle eğimi son derece küçük (0.3-3 derece) olan yamaçlarda boyunca ve nehir yatağı, göl veya deniz kıyısı gibi harekete engel olmayacak serbest yüzeyde doğru gelişir. Yatay yöndeki hareket, birkaç metreden onlarca metreye kadar ulaşabilir. Hareket sırasında yer ötelenir, bloklara ayrılır ve buna bağlı olarak yerinde fisürler, kırıklar, küçük çöküntüler ve yükselmeler meydana gelir.

Yanal yayılmaya maruz kalan yerlerdeki yapı temelleri, atık su şebekeleri ve boru hatları ile diğer alt yapı elemanları hasar görürler veya eklem yerlerinden koparlar. Ayrıca, kaymanın topuk bölgesindeki yapılar sıkışır ve bükülürler. Dolayısıyla, yanal yayılmanın neden olduğu hasarlar, yerin üzerindeki yapılaşmanın yoğunluğuna da bağlı olarak, afet düzeyine ulaşabilmektedir (Ulusay, 2000).

### 3.4.5. Akma Türü Kayma

Bu tür yer hareketleri, sıvılaşmanın neden olduğu en etkili duraysızlıklardır. Akma sırasında çok geniş yer kütleleri, çok kısa bir sürede ve saatte onlarca kilometreye ulaşan bir hızla, eğimli yüzeyler boyunca onlarca kilometre hareket edebilirler. Akma, tamamen sıvılaşmış bir yerde gelişebileceği gibi sıvılaşan yerin üzerinde yer alan daha sert bir malzemeye ait blokların hareket etmesiyle de meydana gelebilir. Bu tür hareketler eğimi 3 dereceden daha büyük olan yamaçlar boyunca, gevşek ve suya doymuş kumlar veya siltli kumlardan ileri gelmektedir (Ulusay, 2000). Sıvılaşma bazen çok önemli toprak kaymalarına neden olmaktadır, bir örneği 1976 Guatemala depreminde gözlenmiştir. Matagua nehri kapanmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Matagua nehri 1976 Guatemala Depremi ( Ulusay, 2000 )

#### 4. MATERYAL VE METOD

Tez kapsamında incelenecek sıvılaşma çalışmaları ile ilgili kuramsal temeller ve güncel formüller aşağıda teker teker ele alınmıştır.

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

Eşik ivme kriteri yönteminde, kayma dalgası hızı  $V_s$  ile  $a$  ivmesini kullanarak sıvılaşma potansiyelini belirleyen bir yöntemdir. Sıvılaşma potansiyeli deprem sırasında meydana gelen ivme ile yerin deformasyona uğramadan dayanabileceği ivme ilişkisine göre yüksek veya düşüktür.

Eşik ivme kriterinde emniyet faktörü  $F_a$  için

$$F_a = 1.6 (a_t/a_{max}) \quad (4.1.)$$

ile verilmiştir.

Formül (4.1)'de  $a_t$ ; sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç ivmesi,  $a_{max}$ ; depremin meydana getireceği maksimum yer ivmesidir.

Eğer,  $F_a < 1$  ise sıvılaşma potansiyeli yüksek,  $F_a \geq 1$  ise sıvılaşma potansiyeli düşüktür.

Kayma dalgası hızı,  $V_s$  değeri kullanılarak sıvılaşma potansiyelini belirleyen bu kriteri Dobry ve diğ. (1981), önermişlerdir.

$\gamma_t = 0.0001$  kabulü yapılmıştır.  $\gamma_t = 0.0001$  değerine karşılık gelen  $G/G_{max}$  değeri de 0.8 olarak kabul edilmiştir (Şekil 4.1.).

$$(a_t/g) = [\gamma_t (G/G_{max})_t V_s]/gzr_d \quad (4.2)$$

bağıntısı ile doğrudan hesaplanabilir.



Formül (4.2)'de  $a_{max}$ ; depremin ivmesi (gal),  $G_{max}$ ; kayma modülü,  $\rho$ ; yoğunluk, ton/m<sup>3</sup>,  $g$ ; yer çekimi ivmesi, 980 gal,  $\sigma_v$ ; toplam düşey gerilme (ton/m<sup>2</sup>) ve  $z$ ; derinlik (metre)'dir.

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (4.3)$$

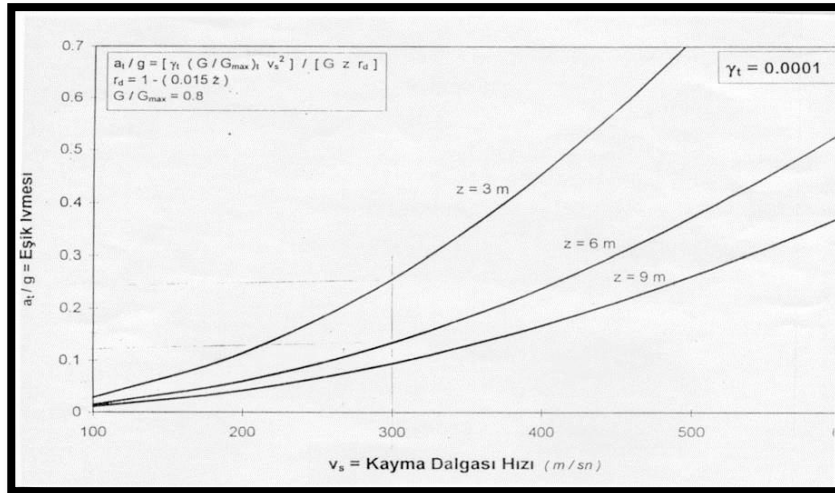
alınmıştır.

Formül (4.3)'de  $r_d$ ; yerin derinlikle artan sıvılaşmaya karşı direncini temsil eden bir azaltma faktörü olup,

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (4.4)$$

bağıntıları ile hesaplanır.

Formül (4.4)'de,  $G_{max}$ ; kayma modülü,  $\rho$ ; yoğunluk,  $V_S$ ; kayma dalga hızı (m/sn) dir.



Şekil 4.1. Eşik ivme değerleri önerisi, (Teri ve Tezcan, 1996)

#### 4.1.1. Başlangıç İvmesi Yöntemi

Başlangıç ivmesi yönteminde güvenlik sayısı,  $F_a$ , aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F_a = a_d/a_{max} = 1.6 \times a_t/a_{max} \quad (4.5)$$

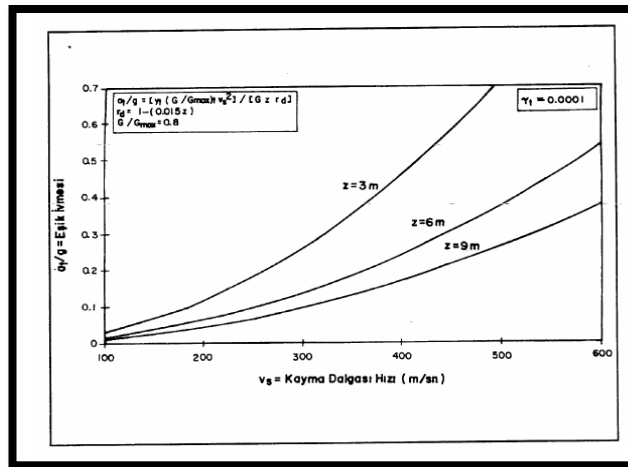
Formül (4.5)'de  $a_t$ ; sınıvlaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç (eşik) ivmesi,  $a_{max}$ ; Deprem meydana getirebileceği varsayılan maksimum ivme,  $a_d$ ; tasarım ivme değeridir.  $F_a < 1$  ise sınıvlaşma riski yüksek  $F_a > 1$  ise sınıvlaşma riski düşük olarak kabul edilir.

$$\tau = a/g \times \sigma_v \times r_d \quad (4.6)$$

Formül (4.6)'da,  $g$ ; yerçekimi ivmesi,  $r_d$ ; derinliğe bağlı olarak değişen gerilme düzeltme sayısıdır (Şekil 4.2).

$$r_d = 1 - 0.0015xz \quad (4.7)$$

Formül (4.7)'de,  $r_d$ ; derinliğe bağlı olarak değişen gerilme düzeltme sayısı,  $z$ ; derinlik (metre)'dir.



Şekil 4.2. Başlangıç ivme değerleri önerisi (Dobry, R., Stoke, K.H., Land, R.S., ve Youd, T.L., 1981).

#### 4.2. (Seed, 1979, Seed ve diğ., 1981)'e Göre Periyodik Kayma Gerilmesi Ve SPT Değerinden Sıvılaşmanın Elde Edilmesi

Bu yöntemde, kayma gerilmesi değerleri standart penetrasyon testi (SPT) değerinden elde edilerek sıvılaşma potansiyeli belirlemektedir. Depremde meydana gelen kayma gerilmesi yerin sınır kayma gerilmesi den büyükse sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Kayma gerilmesi kriterinde emniyet faktörü  $F_s$ , için

$$F_s = \tau_s / \tau_0 \quad (4.8)$$

Formül (4.8)'de  $\tau_s$ ; başlayabilmesi için gerekli sınır kayma gerilmesi,  $\tau_0$ ; aynı yerde belli bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir. Bu gerilmeler bulunduktan sonra  $F_s$  sıvılaşma emniyet faktörü elde edilir. Eğer,  $F_s \leq 1$  ise sıvılaşma potansiyeli yüksek,  $F_s > 1$  ise sıvılaşma potansiyeli düşüktür.

Yaratılmış çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR), ortalama eşdeğer kayma gerilmelerinin efektif düşey gerilmelere oranıdır.

Bu yöntemin birinci aşamasında, zemin kesitinde bir deprem sırasında oluşacak tekrarlı/devirsel/periyodik (cyclic)/çevrimsel mukavemet kayma gerilme oranı

$$CSR(\text{cyclic stress ratio}) = (\tau_0 / \sigma_{v0}^1) = (0.65) \cdot (a_{max} \cdot \sigma_{v0} / g \cdot \sigma_{v0} / g) \cdot r_d \quad (4.9)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

Formül (4.9)'da  $a_{max}$ ; yüzeyde oluşan en büyük yatay ivme değerini,  $g$ ; yerçekimi ivmesini,  $\sigma_{v0}$ ; incelenen derinlikteki toplam düşey gerilmeyi (overburden stress) ve  $\sigma_{v0}^1$ ; ise efektif düşey gerilmeyi,  $r_b$ ; deprem şiddetine bağlı etkili ivme katsayısını ve  $r_d$ ; katsayısı ise derinlikle meydana gelen kayma gerilmesi azalmasını gösteren bir düzeltme katsayısı olmaktadır. Bu katsayı üst 9.15 metre için ( $r_d = 1.0 - 0.00765z$ )

ve 9.15 metre ile 23 metre derinlikler arasında ise ( $r_d = 1.174 - 0.0267z$ ) bağıntıları kullanılarak hesaplanabilir. Burada  $z$  metre cinsinden derinlikleri göstermektedir (Youd, T.L. ve Idriss, I.M., 1997 ).

Ayrıca, sıvılaşmaya karşı zemin tabakalarının gösterdiği dayanım/direnç Standard Penetrasyon deneyinde bulunan düzeltilmiş SPT-N darbe sayısına veya jeofizik S dalga hızına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu hesaplarda  $N$  darbe sayısında enerji, derinlik ve ince dane yüzdesine göre düzeltmeler yapılmakta ve hesaplanan bu değere karşı gelen zeminin devirsel sıvılaşma direnci (CRR cyclic resistance ratio) bir gerilme oranı cinsinden (Youd, T.L. ve Idriss, I.M., 1997) tarafından verilen grafikten yararlanarak bulunabilmektedir. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü ise bu şekilde bulunan sıvılaşma direnci ve tasarım/proje depremin o zeminde oluşturacağı devirsel kayma gerilmesi oranına bağlı olarak

$$GF_{sv} = CRR/CSR \quad (4.10)$$

Formül (4.10)'da;  $CRR$ ; zeminin oluşturduğu devirsel kayma gerilmesi oranı,  $CSR$ ; depremin oluşturduğu devirsel kayma gerilmesi oranıdır.

Güvenlik faktörü 1'e eşit veya küçük olması durumunda zemin tabakalarında sıvılaşma, 1-1.2 arasında olması sıvılaşma potansiyeli var, 1.2'den büyük olması durumunda ise göz önüne alınan zemin tabakalarında sıvılaşma olmaz.

Çeşitli depremlerden elde edilen sıvılaşma anındaki periyodik yatay kayma gerilmesi  $\tau_s$ , nin  $\sigma'_v$  efektif düşey gerilme oranı  $\alpha$  ile SPT arasındaki ilişkiler, grafik olarak Seed vd. (1981) tarafından şekil 4.3.' de verilmiştir. Ancak SPT değerleri, üniform bir efektif düşey basınca karşı gelen ve derinliğe bağlı olarak değişen bir  $C_N$  düzeltme faktörü ile çarpılarak,

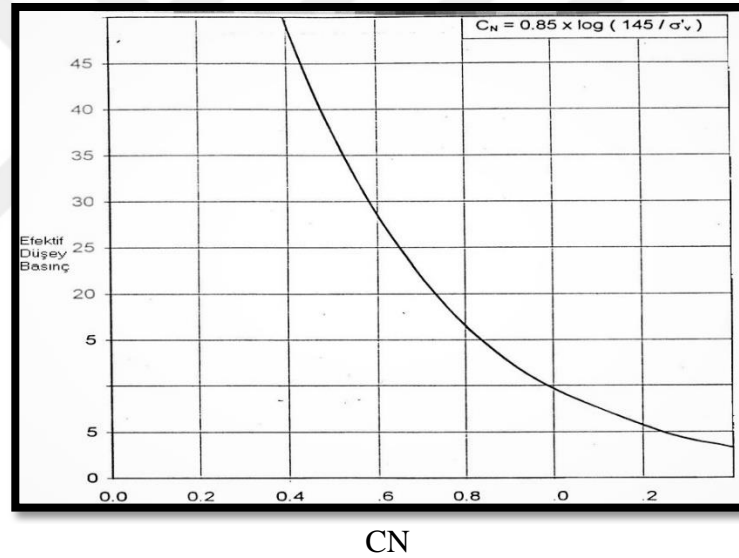
$$N_1 = C_N N \quad (4.11)$$

Formül (4.11)'de  $N$ ; SPT değeri,  $N_1$ ; revize edilmiş SPT değeri,  $C_N$ ; düzeltme faktörüdür.

$$C_N = 0.85 \log(145/\sigma'_v) \quad (4.12)$$

ampirik formülü ile hesaplanabilmektedir.

Formül (4.12)'de,  $\sigma'_v$ ; efektif düşey basınç değeridir.



Şekil 4.3. Standart penetrasyon azaltma faktörü, (Teri ve Tezcan, 1996)

Herhangi bir yer tabakasının  $N$  değeri bilinince, önce  $C_N$  değeri bulunarak  $N_1$  'e geçilir ve  $N_1$  yardımı ile Şekil 4.4' den, belli bir deprem magnitudü için,  $\alpha = \tau_s / \sigma'_v$  oranı okunur. Bu orana, periyodik sıvılaşma gerilmesi oranı denilir. Bu oran bulununca, sıvılaşma için gerekli,

$$\tau_s = \alpha \sigma'_v \quad (4.13)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

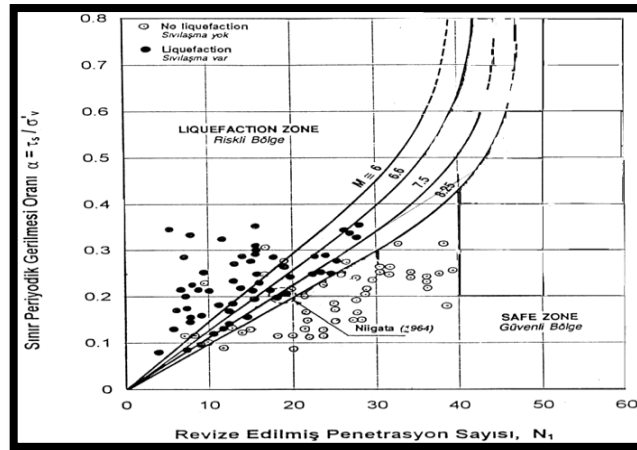
Formül (4.13)'de  $\tau_s$ ; periyodik yatay kayma gerilmesi,  $\alpha$ ; yüzeyde oluşan yatay ivme değerini  $\sigma'_v$ ; efektif düşey basınç değeridir.

Deprem maksimum yerin ivmesi  $a_{max}$ 'ın etkisi ile meydana getireceği ortalama yatay gerilmesi

$$\tau_0 = (a_{max}/1.6g) \sigma_v r_d \quad (4.14)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Formül (4.14)'de  $a_{max}$ ; depremin maksimum ivmesi (gal),  $\sigma_v$ ; toplam düşey basınç (ton/m<sup>2</sup>),  $g$ ; yer çekimi ivmesi, 980gal,  $r_d$ ; yerin derinlikle artan sıvılaşmaya karşı direncini temsil eden bir azaltma faktörü olup ( $r_d = 1 - 0.15z$ ) bağıntısı ile hesaplanır.



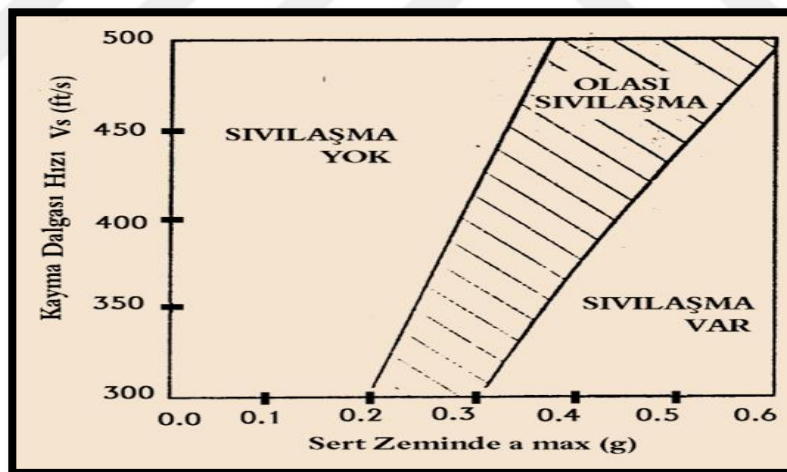
Şekil 4.4. Periyodik sınır gerilmesi değeri, (Teri ve Tezcan, 1996)

### 4.3. Sıvılaşma Direncini Belirlemede Jeofizik (S Dalga Hızı) Ölçümleri ve SPT (N) Değeri

S dalga hızı ölçümleri ve buna bağlı jeofizik çalışmalar; zeminin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde kullanışlı bir yöntem olarak kayma dalgası (S) hızının tanınmasına yol açmıştır (Şekil 4.5.). Ölçülmüş kayma dalgası hızları aşağıdaki bağıntı yardımıyla 1 ton/feet<sup>2</sup> lik standart bir efektif üst katman (overburden) basıncı değerine n basıncı değerine normalize edilebilir.

$$V_{S1} = V_S (\sigma'_{vo})^{-1/n} \quad (4.15)$$

Formül (4.15)'de  $\sigma'_{vo}$  (ton / feet<sup>2</sup>) biriminde ve n ise 3 (Tokimatsu ve diğ.,1991) ve 4 ( Kayen ve diğ., 1992 ) olarak alınabilir.



Şekil 4.5. Kayma Dalgası Hızı ve Pik Yer İvmesinden Sıvılaşma Potansiyelinin değerlendirilmesi için Abak (Stoke ve diğ., 1988)

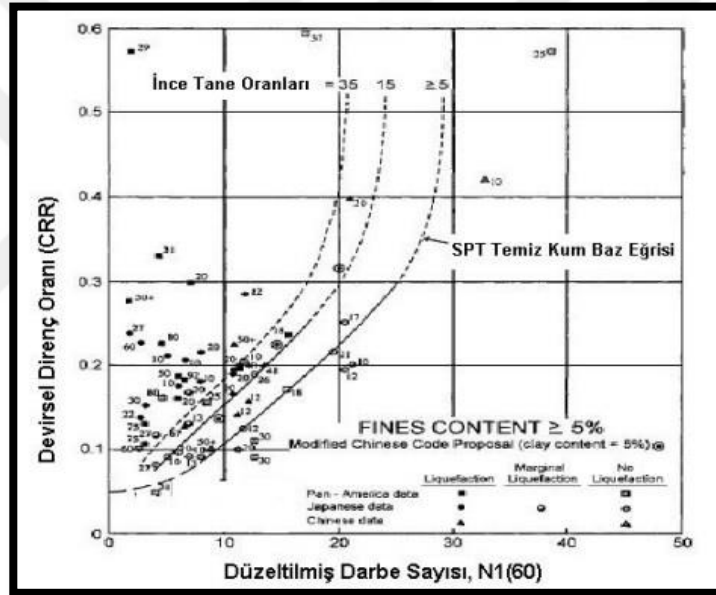
Standard Penetrasyon deneyi (SPT) zeminin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kramer, 1996). Ancak SPT değeri ortamın efektif gerilmesine bağlı olarak düzeltilmesi gerekmektedir (Şekil 4.6). Bu durumda düzeltilmiş SPT (N) değeri;

$$SPT_{düzeltmiş} = C_N SPT_{arazi} \quad (4.16)$$

Formül (4.16)'da  $C_N$  ; düzeltme faktörüdür.

$$C_N = 1/\sigma'_v \quad (4.17)$$

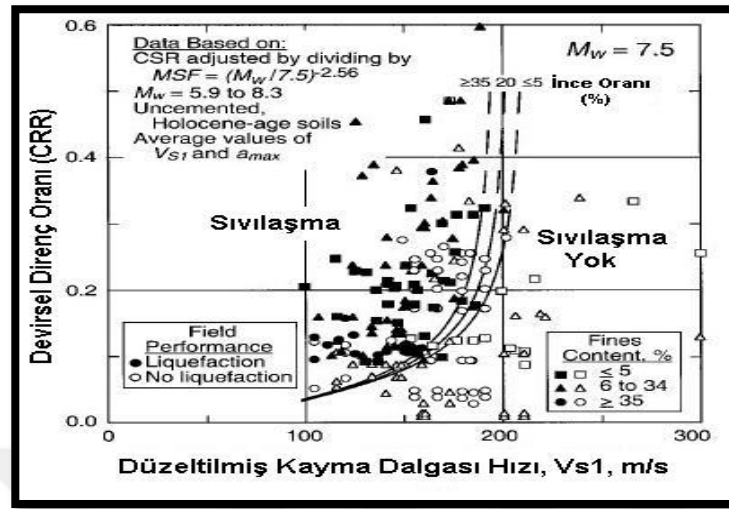
Formül (4.17)'de  $\sigma'_v$  ; efektif gerilmedir.



Şekil 4.6. Devirsel gerilmesi oranı ve düzeltilmiş SPT değerleri arasındaki ilişki ( Seed ve Idriss, 1983 )

Devirsel direnç oranı (CRR) ve düzeltilmiş  $V_s$  hızı arasındaki ilişki Şekil 4.7'de görülmektedir.





Şekil 4.7. Devirsel direnç oranı (CRR) ve düzeltilmiş  $V_s$  hızındaki ilişki ( Seed ve Idriss, 1983 ).

#### 4.3.1. Dobry ve diğ. (1981) Yaklaşımı İle Kayma Dalga Hızı Kullanılarak Sıvılaşma Analizi

Kayma dalgası hızı ile sıvılaşmanın değerlendirilmesine yönelik bir diğer yaklaşım (Dobry ve diğ., 1981) tarafından pik kayma streyni ölçütü kullanılarak verilmiştir. Bu yaklaşımda, deprem yer hareketi tarafından oluşturulan pik kayma streyni;

$$\gamma' = \tau_{\max(mod)} / G \quad (4.18)$$

Formül (4.18)'de  $G$ ; kayma modülü ve  $\gamma'$ ; kayma streynidir. Yer hareketi tarafından oluşturulan kayma streyni ise;

$$\tau_{\max(mod)} = CD[(\gamma h)a_{\max}] \quad (4.19)$$

Formül (4.19)'da  $CD$ ; kayma gerilmesi azaltma faktörü,  $a_{\max}$ ; yerin maksimum ivme değeri,  $\gamma$ ; kayma streynidir.

$$\gamma^1 = (CD \rho H a_{max})/G = (CD h a_{max})/(G/\rho)(G_{max}/G_{max}) = (CD h a_{max})/[(G/G_{max})V_S^2] \quad (4.20)$$

Formül (4.20)'de  $V_S$ ; zeminin kayma dalgası hızı,  $G_{max}$ ; maksimum kayma modülüdür.  $G/G_{max}$  değeri yaklaşık 0.8 varsayılırsa ve bu ortalama bir CD (zeminin deforme olabilir karakteri için kayma gerilmesi azaltma faktörü) değeri alınırsa

$$\gamma^1 = 1.2 a_{max}h/V_S^2 \quad (4.21)$$

Formül (4.21)'de  $a_{max}$ ; depremin ivmesi,  $V_S$ ; kayma dalga hızıdır. Derinlik ile kayma dalga hızı bilindiğinde  $\gamma$  değerinin değişimi hesaplanabilir. Eşik streynin tipik değeri % 0.01'dir.

#### 4.4. Iwasaki ve diğ.(1982) Yaklaşımı

Arazi bazlı incelemelere dayalı olarak sıvılaşmanın etkilerini ortaya koymak için, kullanılan yaklaşımlardan biri de Iwasaki ve diğ.(1982), tarafından sıvılaşma potansiyeli indeksi  $P_L$  adlı bir faktörün kullanılarak yapılan sıvılaşma analizidir.

$$P_L = \int_0^{20} F(Z)W(Z)d_z \quad (4.22)$$

Formül (4.22)'de,  $Z$ ; yeryüzeyinden aşağıya doğru metre olarak derinlik,  $F(Z)$ ; sıvılaşma direnci faktörü  $GK$ 'nın bir fonksiyonudur.  $F(Z) = 1 - GK$  olarak hesaplanabilmektedir. Ancak,  $GK > 1$  ise;  $F(Z) = 0$  ve  $W(Z) = 10 - 0.5Z$  dir.

#### 4.5. (Iwasaki, 1986) Yaklaşımı ile Sıvılaşma Endeks Kriteri Kullanılarak Sıvılaşma Analizi

##### 4.5.1. Sıvılaşma Emniyet Faktörü

Kayma direnci oranı ve kayma gerilmesi oranı kullanarak sıvılaşma potansiyeli belirleyen yöntemdir. Kayma direnci oranını SPT ve ortalama dane çapı ( $D_{50}$ ) değerinden hesaplamaktadır. Kayma gerilmesi değerini ise düşey gerilmelerden hesaplanmaktadır. Bu kriterde depremde meydana gelecek kayma gerilmesi oranı yerin periyodik kayma direncinden büyük ise sıvılaşma potansiyeli yüksektir.

Bir yer tabakasındaki sıvılaşma emniyet faktörü  $F_L$ ,

$$F_L = R/L \quad (4.23)$$

Formül (4.23)'de,  $R$ ; yerin sıvılaşma anındaki periyodik kayma direnci oranı,  $L$ ; şiddetli bir depremde meydana gelebilecek kayma gerilmesidir.  $F_L$  oranınının 1' den büyük olması halinde sıvılaşma olacağı varsayılır.

$$R = 0.0882 [N/(\sigma'_v + 0.7)]^{1/2} + B \quad (4.24)$$

Formül (4.24)'de,  $\sigma'_v$ ; efektif düşey gerilme ( $\text{kg/cm}^2$ ),  $N$ ; SPT değeri,  $B$ ;

$$B = 0.225 \log (0.35/D_{50}) \quad (0.04\text{mm} < D_{50} < 0.6 \text{ mm}) \quad (4.25)$$

$$B = -0.05 \quad (0.6\text{mm} < D_{50} < 1.5 \text{ mm}) \quad (4.26)$$

Formül (4.25) ve (4.26)'da  $D_{50}$ ; ortalama dane çapı (mm) dir.

$$L = (a_{max}/g)(\sigma_v/\sigma'_v)r_d \quad (4.27)$$

Formül (4.27)'de  $\sigma_v$  ; toplam düşey gerilme ( $\text{kg/cm}^2$ ),  $a_{max}$ ; maksimum yer ivmesi (gal),  $r_d$  ; derinlik azaltma faktörüdür. Eğer,  $F_L < 1$  ise sıvılaşma potansiyeli yüksek,  $F_L \geq 1$  ise sıvılaşma potansiyeli düşüktür.

#### 4.5.2. Sıvılaşma Endeksi

Iwasaki ve diğ. (1986), tarafından önerilen sıvılaşma endeks kriteri için, sıvılaşma potansiyeli emniyet faktörü  $F_L$  değeri ve tabaka derinlik değeri alınarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmektedir. Herhangi bir yer tabakasının sıvılaşma potansiyelini daha sağlıklı belirleyebilmek ve özellikle derinliğin bu potansiyel üzerindeki etkilerini bilinçli bir şekilde göz önüne alabilmek üzere tabakalı ortamlar için aşağıda verilen  $I_L$  sıvılaşma potansiyeli indeksi hesaplanır.

$$I_L = \sum_i^n (FWh)_i \quad (4.28)$$

Formül (4.28)'de  $i$ ; yukarıdan aşağıya doğru tabaka numarası,  $h$  ;tabaka derinliğidir. Eğer;  $F_L < 1$  ise,  $F = 1 - F_L$  olarak hesaplanmakta,  $F = 0$  ise  $F \geq 1$  olmaktadır. Ayrıca,  $z_1$  ; tabaka orta noktasının derinliği (metre) olmakla birlikte,  $z_1 < 20$  metre ise  $W = 10 - 0.5z_1$  olarak hesaplanmakta,  $z_1 \geq 25$  metrede  $W = 0$  alınmaktadır.

Her tabaka için hesaplanan  $I_L$  değeri ve yukarıdan aşağı toplamlar alınarak yine her tabakanın toplu olarak  $I_L$  değeri bulunur. Çizelge 4.1'de belirlenen  $I_L$  değerine göre sıvılaşma risk derecesi görülmektedir.

Çizelge 4.1. Sıvılaşma Risk Derecesi

Sıvılaşma endeksi	Sıvılaşma riski
0	Çok düşük
$0 < I_L \leq 5$	Düşük
$5 < I_L \leq 15$	Yüksek
$15 < I_L$	Çok yüksek

#### 4.6. Tokimatsu ve Yoshimi Yöntemi (Tokimatsu ve Yoshimi, 1983)

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yönteminde,  $\tau_d / \sigma_0'$  oranı depremden kaynaklanan periyodik gerilme oranı,  $\tau_1 / \sigma_0^1$  oranı yerin periyodik gerilme direnci olarak düşünülmektedir.

$$\tau_d / \sigma_0' = 0.1(M-1)(a_{max} / g)(\sigma_0 / \sigma_0')(1-0.15z) \quad (4.29)$$

Formül (4.29)'da, M; deprem magnitüdü,  $a_{max}$ ; depremin ivmesi (cm/sn<sup>2</sup>),  $\sigma_0$  ; toplam gerilme (kgf/cm<sup>2</sup>),  $\sigma_0'$  ; efektif gerilme (kgf/cm<sup>2</sup>), z ; derinlik (metre)'dir.

Periyodik gerilme direnci ise

$$\tau_1 / \sigma_0' = aC_r [(16(N_a)^{1/2} / 100) + (16(N_a)^{1/2} / C_s)] \quad (4.30)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

Formül (4.30)'da; a,  $C_r$ ,  $C_s$  ve n birer katsayı olup değerleri sırayla 0.45, 0.57, 80 ve 14' dür.  $N_a$ ; ince tane düzeltilmesinden önce SPT-N değeridir.

SPT-N değeri N,  $N_1$  düzeltilmesine tabii tutulmuştur.

$$N_1 = 1.7 / (\sigma_0' + 0.7)N \quad (4.31)$$

Formül (4.31)'de verilen düzeltmede,  $N_1$  örtü yüküne göre düzeltilmiş SPT-N değeri ve diğeri de kullanılan şahmerdan düzeneği kedi başı-halka tipi olduğu için tijlere iletilen net enerji teorik olarak iletilmesi gereken enerjinin yaklaşık % 63-72'sini iletebildiği için yapılan enerji düzeltmesidir. Tokimatsu ve Yoshimi (1983), yönteminde dikkate alınan şahmerdan düzeneği vasıtası ile tijlere iletilen net enerji yaklaşık % 80-90 arasındadır. Bu durumda, kedibaşı sisteminde elde edilen SPT – N değeri 0.8 ile çarpılarak enerji düzeltilmesine tutulmuştur ve yeni SPT – N değeri  $N_{1(80)}$  olarak ifade edilmiştir.  $N_a$  değeri ise;

$$N_a = N_{1(80)} + \Delta N_f \quad (4.32)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

Formül (4.32)'de,  $\Delta N_f$ ; ince tane düzeltme katsayısı olup çizelge 4.2 yardımıyla belirlenir.

Çizelge 4.2.  $\Delta N_f$  İnce tane düzeltme katsayısı

İnce tane yüzdesi (FC)	$\Delta N_f$
0-5	0
6-10	interpolasyonla
>10	0.1FC+4

Yapılan hesaplamalardan sonra;

$$F = (\tau_1/\sigma'_0)/(\tau_d/\sigma'_0) \quad (4.33)$$

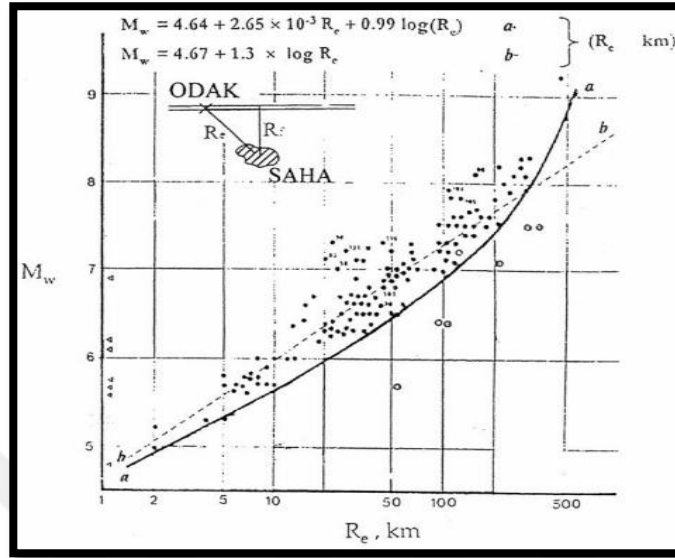
bağıntısı sonucunda çıkan değere göre  $F < 1$  ise ise sıvılaşma potansiyeli yüksek,  $F \geq 1$  ise sıvılaşma potansiyeli düşüktür veya yoktur diyebiliriz.

#### 4.7. Ambraseys (1988)'e Göre Deprem Şiddeti Ve Odak Uzaklığı Kullanılarak Yapılan Sıvılaşma Analizi

Ambraseys (1988)'de farklı deprem magnitüdüleri için standart penetrasyon direnci (SPT) ve ortalama tekrarlı gerilme oranı (CSR)'ni ilişkilendirmiştir. Ancak bu ilişkinin geçerli olabilmesi için sıvılaşan zemin çatlaklarında magnitüdüleri sırasıyla  $M_w \geq 7,5$  ve  $6 < M_w < 7,5$  depremleri boyunca efektif gerilme  $\sigma'_{vo} \leq 1,2 \text{ kg/cm}^2$  olması koşulu ile değerlendirilmiştir ( Şekil 4.8). Buna göre deprem magnitüdü;

$$M_w = 4.64 + 2.65 * 10^{-3} R_e + 0.99 \log R_e \quad (4.34)$$

Formül (4.34)'de,  $R$ ; sıvılaşma alanına en uzak episantral mesafesi (km) dir.



Şekil 4.8. Moment büyüklüğü ve odak uzaklığı ilişkisi (Seed, H. B., 1976)

#### 4.8. Sıvılaşma Analizleri İçin Güvenlik Faktörü

Depremlerde zeminlerin sıvılaşma potansiyeli iki faktöre dayanır. İlki oluşan tekrarlı kayma genliklerinin oranı, ikincisi ise zemin yapısının sıvılaşmaya karşı direnci olup olmamasıdır. Boşluk suyu basıncının hücre basıncına eşit olduğu durumda zemin taneleri artık kuvvet taşımadığından zeminde sıvılaşma meydana gelir. Bir depremin oluşturduğu tekrarlı yükleme ve zeminlerin sıvılaşma direnç özellikleri ortaya konulduktan sonra, sıvılaşma potansiyeli değerlendirilebilir. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi belirli bir zemin profili için yükleme ile direnç arasında bir karşılaştırma yapmaya yöneliktir. Yani kayma direnci oranı ve kayma gerilmesi oranı kullanarak sıvılaşma potansiyelini belirlenir. Sıvılaşma aşağıdaki bağıntıda gösterildiği gibi emniyet katsayısının 1'den küçük olduğu durumlarda gelişir.

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

Ancak güvenlik faktörünün kabul edilebilir değerleri bir kaç unsura bağlıdır. Bunlar yapılan proje için riskin kabul edilebilir düzeyi, sismik hız ölçümünün doğruluğu ve

değeri, çalışılan alandaki zemine ait diğer bilgilerin kabul edilebilirliği ve deprem magnitüdü ile yatay yer ivmesinin belirlenmesindeki hassasiyettir (Uyanık, 2002).

Genel kural olarak güvenlik faktörü 1.2'den büyük olması durumunda sıvılaşma olmadığı, 1-1.2 arasında potansiyel sıvılaşma olduğu ve 1'den küçük olması durumunda sıvılaşma olacağı tahmin edilmektedir (Seed ve Idriss, 1982).





## 5. TARTIŞMA ve BULGULAR

Tez çalışması kapsamında, zemin sıvılaşmasında, zemin ve deprem parametrelerinin etkisi farklı yöntemler kullanılarak, A Microsoft Excels spreadsheet & programı ile teorik örnekler verilerek değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılıp yorumlanmıştır.

### 5.1. Zemin Analizi: A Microsoft Excels Spreadsheet & Programı

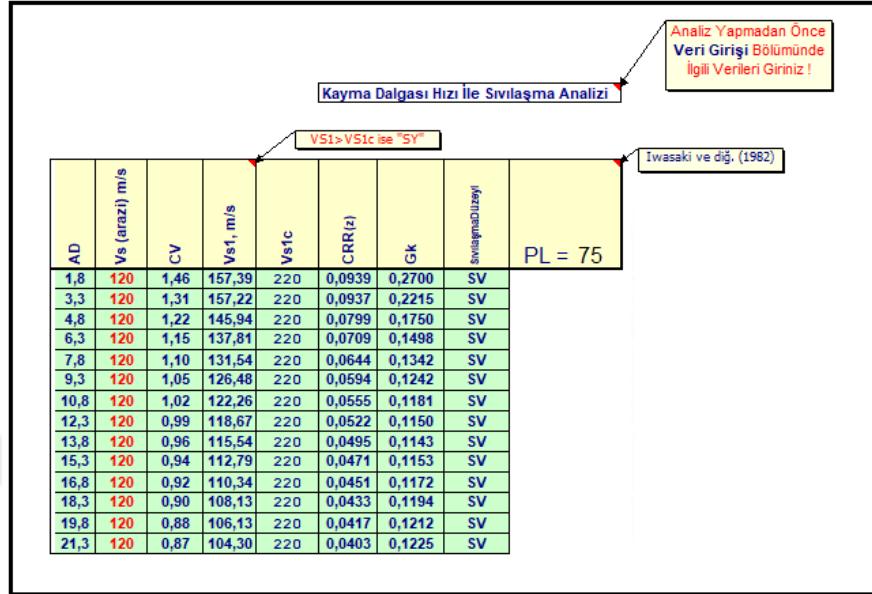
Zemin sıvılaşmasının pratik şekilde elde edilmesi amacıyla yönelik Excel'de Özçep (2010), tarafından oluşturulan programa ait görünüm Şekil 5.1' de verilmektedir.

Modüller	
Jeofizik (Sismik) Kırılma Verisi Jeofizik (Elektrik) Verisi Sondaj ve SPT Verisi Laboratuvar Verileri	Verilerin Hazırlanması
Jeofizik Veri & Geoteknik Parametreler Vs Hızı & SPT ilişkisi	Parametreler
Depreme Dayanıklı Yapı Yönetmeliği (1998) Saha & Laboratuvar Deneyleri İle Zemin Özellikleri	Zemin Özellikleri
Sığ ve Derin Temeller için Taşıma Gücü Oturma Analizi (Statik & Dinamik) Yatak Katsayısının Belirlenmesi Şev/Yamaç Stabilite Analizi Deprem Tehlike Analizi İvme Azalım İlişkisi Spektral İvme Analizi İvme / Hız / Yerdeğiştirme Spektrumular Zemin Büyütme Analizi	Zemin Problemlerinin (Statik ve Dinamik Yüklerle) Analizi
⇒ Zemin Sıvılaşma Analizi	

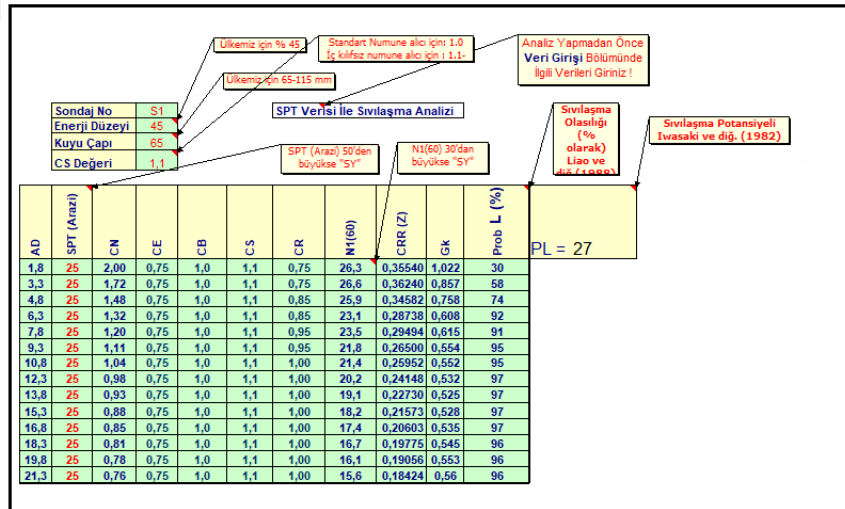
Şekil 5.1. A Microsoft Excels spreadsheet & programı ( Özçep, F., 2010 )

#### 5.1.1. Kayma Dalgası ve SPT ile Sıvılaşma Analizi

A Microsoft Excels spreadsheet & programı zemin sıvılaşma analizi bölümünde kayma dalga hızı ve SPT kullanılarak yapılmıştır. Örnek grafikler Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Kayma dalgası hızı ile sıvılaşma analizi

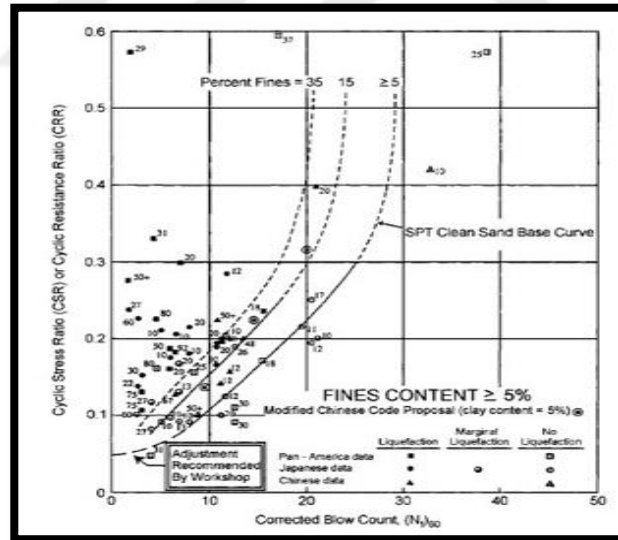


Şekil 5.3. SPT ile sıvılaşma analizi

Proje alanı 1 için çizelge 5.1'de verilen laboratuvar verilerine göre  $M=7.5$  ve  $a=0.05$  g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için sıvılaşma analizinde, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4'de görülen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)' a göre hesaplanarak çizelge 5.2 ve şekil 5.5'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. Proje alanı laboratuvar ve arazi verileri

AD	SPT	Arazi birim hacim ağırlığı	FC (İnce oranı)	Vs arazi (m/sn)
1.8	15	1.7	5	120
3.3	18	1.8	5	143
4.8	18	1.8	5	143
6.3	18	1.8	5	143
7.8	18	1.8	5	143
9.3	18	1.8	5	143
10.8	18	1.8	5	143
12.3	18	1.8	5	143
13.8	18	1.8	5	143
15.3	18	1.8	5	143
16.8	18	1.8	5	143
18.3	18	1.8	5	143
19.8	18	1.8	5	143
21.3	18	1.8	5	143



Şekil 5.4. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı (Youd ve diğ.,2001)

Çizelge 5.2. SPT' ye Göre Yapılan Sıvılaşma Analizi Sonuçları

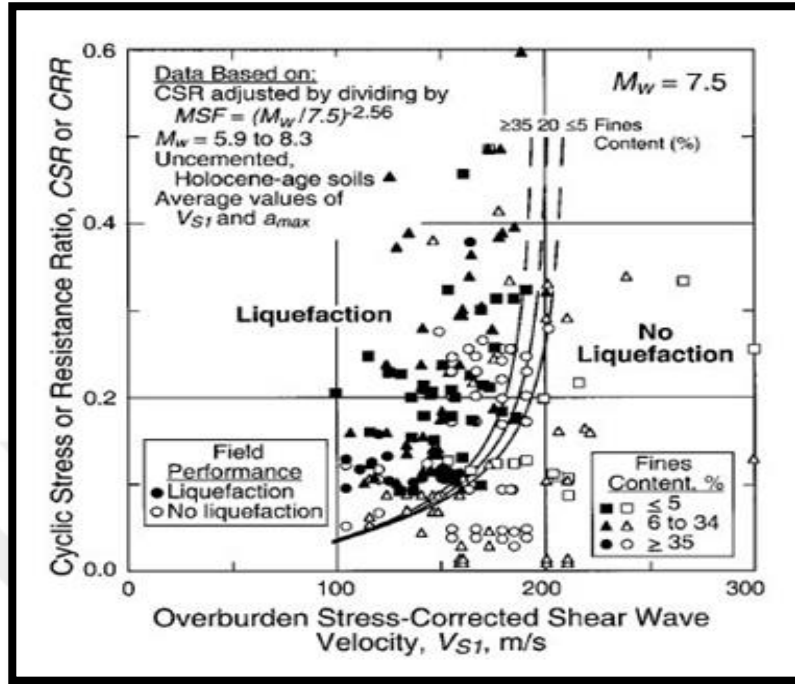
AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (z)	G <sub>k</sub>
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	<b>3,863</b>
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	<b>3,871</b>
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	<b>3,496</b>

6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	<b>2,995</b>
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	<b>3,007</b>
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	<b>2,79</b>
10,8	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	<b>2,797</b>
12,3	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	<b>2,736</b>
13,8	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	<b>2,733</b>
15,3	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	<b>2,772</b>
16,8	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	<b>2,834</b>
18,3	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	<b>2,903</b>
19,8	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	<b>2,965</b>
21,3	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	<b>3,014</b>

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N <sub>1</sub> (60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	3,86
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	3,87
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	3,5
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	3
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	3,01
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	2,79
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	2,8
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	2,74
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	2,73
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	2,77
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	2,83
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	2,9
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	2,96
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	3,01

Şekil 5.5. SPT ye göre yapılan sıvılaşma analizi program görüntüsü (M=7.5 ve ivme değeri 0,05 )

$V_s$  verileri için şekil 5.6'da verilen abak kullanılarak çizelge 5.3 ile şekil 5.7'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş Vs-CSR abağı (Andrus ve Stokoe,2001)

Çizelge 5.3.  $V_s$  (Kayma dalga hızı)' ye Göre Yapılan Sıvılaşıma Analizi Sonuçları

AD	$V_s$ (arazi) m/s	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	<b>1,9456</b>
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	<b>2,4351</b>
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	<b>1,8609</b>
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	<b>1,5724</b>
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	<b>1,3986</b>
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	<b>1,2882</b>
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	<b>1,2209</b>
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	<b>1,1864</b>
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	<b>1,1774</b>
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	<b>1,1861</b>
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	<b>1,2045</b>
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	<b>1,2252</b>
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	<b>1,2431</b>
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	<b>1,2555</b>

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1c	CRR (z)	Gk
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	1,9456
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	2,4351
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	1,8609
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	1,5724
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	1,3986
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	1,2882
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	1,2209
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	1,1864
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	1,1774
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	1,1861
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	1,2045
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	1,2252
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	1,2431
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	1,2555

Şekil 5.7. Vs ye göre sıvılaşma analizi sonuçlarının program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,05 )



Şekil 5.8. M=7.5 ve a=0.05 g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının değişimi)

Proje alanı 1 'de yapılan çalışmaların sonucuna bakıldığında, SPT ve Kayma Dalgası Hızına göre yapılan sıvılaşma analizlerinde elde edilen sonuçlara göre SPT verilerine göre yüksek olasılıkla sıvılaşma olmadığı anlaşılmaktadır. Vs verilerine bakacak olursak sıvılaşmanın yüksek oranda olmadığı anlaşılmaktadır ( Şekil 5.8. ).

Proje alanı 2 için çizelge 5.1’de verilen laboratuvar verileri kullanılarak farklı değerler alınarak, bu değerler  $M=7.5$  ve  $a=0.10$  g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durumlarda sıvılaşma analizinde, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4’de görülen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)’ a göre hesaplanarak çizelge 5.4 ve şekil 5.9’daki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. SPT Verilerine Göre Proje alanı analiz verileri (  $M=7.5$  ve ivme değeri 0.10 için )

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	$G_k$	Prob L (%)
1.8	15	2.00	0.75	1.0	1.1	0.75	15.8	0.16797	<b>1.931</b>	0
3.3	18	1.72	0.75	1.0	1.1	0.75	19.1	0.20469	<b>1.935</b>	0
4.8	18	1.48	0.75	1.0	1.1	0.85	18.7	0.19945	<b>1.748</b>	1
6.3	18	1.32	0.75	1.0	1.1	0.85	16.6	0.17707	<b>1.498</b>	2
7.8	18	1.20	0.75	1.0	1.1	0.95	17.0	0.18031	<b>1.504</b>	2
9.3	18	1.11	0.75	1.0	1.1	0.95	15.7	0.16688	<b>1.395</b>	3
10.8	18	1.04	0.75	1.0	1.1	1.00	15.4	0.16425	<b>1.398</b>	3
12.3	18	0.98	0.75	1.0	1.1	1.00	14.5	0.15529	<b>1.368</b>	3
13.8	18	0.93	0.75	1.0	1.1	1.00	13.8	0.14790	<b>1.366</b>	3
15.3	18	0.88	0.75	1.0	1.1	1.00	13.1	0.14168	<b>1.386</b>	3
16.8	18	0.85	0.75	1.0	1.1	1.00	12.6	0.13635	<b>1.417</b>	2
18.3	18	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	12.1	0.13172	<b>1.451</b>	2
19.8	18	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	11.6	0.12764	<b>1.482</b>	2
21.3	18	0.76	0.75	1.0	1.1	1.00	11.2	0.12402	<b>1.507</b>	2

Olasılık Değerleri	Simge	Değer Aralığı
Yüksek Olasılık	$A_L$	<b><math>PL &gt; 15</math></b>
Orta Olasılık	$B_L$	<b><math>5 \leq PL \leq 15</math></b>
Düşük Olasılık	$C_L$	<b><math>PL &lt; 5</math></b>

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	1,93	0
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	1,94	0
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	1,75	1
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	1,5	2
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	1,5	2
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	1,4	3
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	1,4	3
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	1,37	3
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	1,37	3
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	1,39	3
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	1,42	2
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	1,45	2
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	1,48	2
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	1,51	2

Olasılık	Simge	Değer
Yüksek Olasılık	A <sub>L</sub>	PL > 15
Orta Olasılık	B <sub>L</sub>	5 ≤ PL ≤ 15
Düşük Olasılık	C <sub>L</sub>	PL < 5

Şekil 5.9. SPT ye göre sıvılaşma analiz verilerinin program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,10 )

$V_s$  ( kayma dalgası hızı ) verileri için şekil 5.5’de verilen abak kullanılarak CRR değerleri hesaplanarak çizelge 5.5 ile şekil 5.10’daki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.10 alınarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.5. Kayma Dalgası Hızı (  $V_s$  ) verilerine göre Sıvılaşma Analizi

AD	$V_s$ (m/s)	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1.8	120	1.46	157.39	220	0.0846	<b>0.9728</b>
3.3	143	1.31	187.35	220	0.1288	<b>1.2176</b>
4.8	143	1.22	173.91	220	0.1062	<b>0.9305</b>
6.3	143	1.15	164.23	220	0.0930	<b>0.7862</b>
7.8	143	1.10	156.75	220	0.0839	<b>0.6993</b>
9.3	143	1.05	150.72	220	0.0771	<b>0.6441</b>
10.8	143	1.02	145.70	220	0.0717	<b>0.6105</b>
12.3	143	0.99	141.41	220	0.0674	<b>0.5932</b>
13.8	143	0.96	137.69	220	0.0637	<b>0.5887</b>
15.3	143	0.94	134.41	220	0.0606	<b>0.5930</b>
16.8	143	0.92	131.49	220	0.0579	<b>0.6022</b>



18.3	143	0.90	128.86	220	0.0556	<b>0.6126</b>
19.8	143	0.88	126.47	220	0.0535	<b>0.6216</b>
21.3	143	0.87	124.29	220	0.0517	<b>0.6278</b>

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1c	CRR (z)	Gk	SıvılaşmaDüzeyi	PL = 19
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	0,9728	SO	
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	1,2176	SY	
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	0,9305	SO	
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	0,7862	SV	
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	0,6993	SV	
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	0,6441	SV	
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	0,6105	SV	
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	0,5932	SV	
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	0,5887	SV	
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	0,5930	SV	
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	0,6022	SV	
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	0,6126	SV	
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	0,6216	SV	
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	0,6278	SV	

Şekil 5.10. Vs ye göre sıvılaşma analizi sonuçlarının program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,10 )



Şekil 5.11. M=7.5 ve a=0.10 g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının) değişimi

Proje alanı 2’de yapılan çalışmaya sonuç olarak bakıldığında, SPT ve Kayma Dalgası Hızına göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlara göre SPT verilerine göre yüksek olasılıkla sıvılaşmanın olmadığı anlaşılmaktadır.  $V_s$  verilerine göre, sıvılaşmanın yüksek oranda olacağı anlaşılmaktadır. Sadece ilk 3.5 metrede sıvılaşma olmayabilir ( Şekil 5.11. ).

Proje alanı 3 için verilen verilerden çizelge 5.1’deki değerler kullanılarak aynı şekilde deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri ise 0.15 olarak alındığında, yeraltı su seviyesi 1 metrede varsayıldığında elde edilecek sıvılaşma analizi sonuçları, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4’de verilen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)’ a göre hesaplanarak çizelge 5.6 ile şekil 5.12’deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.6. Proje Alanında SPT Verilerine Göre Sıvılaşma Analizi Sonuçları

AD	(Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	$C_k$	TIYOR (%)
1.8	15	2.00	0.75	1.0	1.1	0.75	15.8	0.16797	<b>1.288</b>	5
3.3	18	1.72	0.75	1.0	1.1	0.75	19.1	0.20469	<b>1.29</b>	5
4.8	18	1.48	0.75	1.0	1.1	0.85	18.7	0.19945	<b>1.165</b>	8
6.3	18	1.32	0.75	1.0	1.1	0.85	16.6	0.17707	<b>0.998</b>	21
7.8	18	1.20	0.75	1.0	1.1	0.95	17.0	0.18031	<b>1.002</b>	20
9.3	18	1.11	0.75	1.0	1.1	0.95	15.7	0.16688	<b>0.93</b>	29
10.8	18	1.04	0.75	1.0	1.1	1.00	15.4	0.16425	<b>0.932</b>	29
12.3	18	0.98	0.75	1.0	1.1	1.00	14.5	0.15529	<b>0.912</b>	32
13.8	18	0.93	0.75	1.0	1.1	1.00	13.8	0.14790	<b>0.911</b>	32
15.3	18	0.88	0.75	1.0	1.1	1.00	13.1	0.14168	<b>0.924</b>	29
16.8	18	0.85	0.75	1.0	1.1	1.00	12.6	0.13635	<b>0.945</b>	26
18.3	18	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	12.1	0.13172	<b>0.968</b>	23
19.8	18	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	11.6	0.12764	<b>0.988</b>	20
21.3	18	0.76	0.75	1.0	1.1	1.00	11.2	0.12402	<b>1.005</b>	18

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	1,29	5
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	1,29	5
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	1,17	8
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	1	21
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	1	20
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	0,93	29
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	0,93	29
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	0,91	32
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	0,91	32
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	0,92	29
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	0,94	26
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	0,97	23
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	0,99	20
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	1	18

Şekil 5.12. SPT ye göre sıvılaşma analizi sonuçlarının program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,15)

$V_s$  ( kayma dalgası hızı ) verileri için şekil 5.5’de verilen abak kullanılarak CRR değerleri hesaplanarak çizelge 5.7 ve şekil 5.13’deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 alınıp elde edilmiştir.

Çizelge 5.7. Kayma Dalgası Hızı (  $V_s$  ) ile Sıvılaşma Analizi Sonuçları

AD	m/s	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1.8	120	1.46	157,391	220	0.0846	<b>0.6485</b>
3.3	143	1.31	187,348	220	0.1288	<b>0.8117</b>
4.8	143	1.22	173,909	220	0.1062	<b>0.6203</b>
6.3	143	1.15	164,227	220	0.0930	<b>0.5241</b>
7.8	143	1.10	156,754	220	0.0839	<b>0.4662</b>
9.3	143	1.05	150,721	220	0.0771	<b>0.4294</b>
10.8	143	1.02	145,695	220	0.0717	<b>0.4070</b>
12.3	143	0.99	141,410	220	0.0674	<b>0.3955</b>
13.8	143	0.96	137,688	220	0.0637	<b>0.3925</b>
15.3	143	0.94	134,410	220	0.0606	<b>0.3954</b>
16.8	143	0.92	131,489	220	0.0579	<b>0.4015</b>
18.3	143	0.90	128,859	220	0.0556	<b>0.4084</b>
19.8	143	0.88	126,474	220	0.0535	<b>0.4144</b>
21.3	143	0.87	124,294	220	0.0517	<b>0.4185</b>

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1c	CRR (z)	Gk
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	0,6485
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	0,8117
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	0,6203
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	0,5241
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	0,4662
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	0,4294
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	0,4070
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	0,3955
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	0,3925
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	0,3954
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	0,4015
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	0,4084
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	0,4144
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	0,4185

Şekil 5.13. Vs ye göre sıvılaşma analizi sonuçlarının program görüntüsü (  $M=7.5$  ve ivme değeri  $0,15$  )



Şekil 5.14.  $M=7.5$  ve  $a=0.15$  g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının) değişimi

Proje alanı 3 de yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında, SPT verileri ile yapılan analiz değerlerinde zemin yüzeyinden yeraltına doğru 8 metreye kadar yüksek olasılıkla

sıvılaşmanın olmadığı görülmektedir. Fakat, ilk 8 metreden sonra  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşma olacağı anlaşılmaktadır. Proje alanı verilerinden  $V_s$  değerleri sonucunda çıkan güvenlik faktörü 1'in altında olduğundan tüm zeminde sıvılaşmanın büyük oranda olduğu görülmektedir ( Şekil 5.14. ).

Proje alanı 4 için elde edilen verilerden çizelge 5.1'deki değerler kullanılarak aynı şekilde deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri ise 0.20 olarak alındığında, yeraltı su seviyesi 1 metrede varsayıldığında elde edilecek sıvılaşma analizi sonuçları, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4'de verilen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)' a göre hesaplanarak çizelge 5.8 ve şekil 5.15'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.8. Proje Alanındaki SPT Verilerinin Analiz Sonuçları

AD	(Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	$G_k$	(%)
1.8	15	2.00	0.75	1.0	1.1	0.75	15.8	0.16797	<b>0.966</b>	24
3.3	18	1.72	0.75	1.0	1.1	0.75	19.1	0.20469	<b>0.968</b>	23
4.8	18	1.48	0.75	1.0	1.1	0.85	18.7	0.19945	<b>0.874</b>	37
6.3	18	1.32	0.75	1.0	1.1	0.85	16.6	0.17707	<b>0.749</b>	63
7.8	18	1.20	0.75	1.0	1.1	0.95	17.0	0.18031	<b>0.752</b>	62
9.3	18	1.11	0.75	1.0	1.1	0.95	15.7	0.16688	<b>0.698</b>	73
10.8	18	1.04	0.75	1.0	1.1	1.00	15.4	0.16425	<b>0.699</b>	72
12.3	18	0.98	0.75	1.0	1.1	1.00	14.5	0.15529	<b>0.684</b>	75
13.8	18	0.93	0.75	1.0	1.1	1.00	13.8	0.14790	<b>0.683</b>	75
15.3	18	0.88	0.75	1.0	1.1	1.00	13.1	0.14168	<b>0.693</b>	73
16.8	18	0.85	0.75	1.0	1.1	1.00	12.6	0.13635	<b>0.709</b>	69
18.3	18	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	12.1	0.13172	<b>0.726</b>	65
19.8	18	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	11.6	0.12764	<b>0.741</b>	61
21.3	18	0.76	0.75	1.0	1.1	1.00	11.2	0.12402	<b>0.754</b>	58

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	0,97	24
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	0,97	23
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	0,87	37
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	0,75	63
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	0,75	62
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	0,7	73
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	0,7	72
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	0,68	75
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	0,68	75
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	0,69	73
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	0,71	69
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	0,73	65
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	0,74	61
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	0,75	58

Şekil 5.15. SPT ye göre sıvılaşma analizi sonuçları program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,20 )

$V_s$  ( kayma dalgası hızı ) verileri için şekil 5.5’de verilen abak kullanılarak CRR değerleri hesaplanarak çizelge 5.9 ile şekil 5.16’daki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 alınıp elde edilmiştir.

Çizelge 5.9. Kayma Dalgası Hızı Verileri ile Sıvılaşma Analiz Sonuçları

AD	$V_s$ (arazi) m/s	CV	$V_{sl}$ , m/s	$V_{slc}$	CRR (z)	$G_k$
1.8	120	1.46	157.39	220	0.0846	<b>0.4864</b>
3.3	143	1.31	187.35	220	0.1288	<b>0.6088</b>
4.8	143	1.22	173.91	220	0.1062	<b>0.4652</b>
6.3	143	1.15	164.23	220	0.0930	<b>0.3931</b>
7.8	143	1.10	156.75	220	0.0839	<b>0.3496</b>
9.3	143	1.05	150.72	220	0.0771	<b>0.3221</b>
10.8	143	1.02	145.70	220	0.0717	<b>0.3052</b>
12.3	143	0.99	141.41	220	0.0674	<b>0.2966</b>
13.8	143	0.96	137.69	220	0.0637	<b>0.2943</b>
15.3	143	0.94	134.41	220	0.0606	<b>0.2965</b>
16.8	143	0.92	131.49	220	0.0579	<b>0.3011</b>
18.3	143	0.90	128.86	220	0.0556	<b>0.3063</b>
19.8	143	0.88	126.47	220	0.0535	<b>0.3108</b>
21.3	143	0.87	124.29	220	0.0517	<b>0.3139</b>

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1c	CRR (z)	Gk
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	0,4864
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	0,6088
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	0,4652
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	0,3931
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	0,3496
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	0,3221
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	0,3052
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	0,2966
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	0,2943
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	0,2965
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	0,3011
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	0,3063
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	0,3108
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	0,3139

Şekil 5.16. Vs ye göre sıvılaşma analizi program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,20 )



Şekil 5.17. M=7.5 ve a=0.20 g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının) değişimi

Proje alanı 4'de yapılan analiz sonuçları ve çıkan değerler incelendiğinde, SPT verileri ve  $V_s$  verileri sonucunda  $G_k < 1$  olduğundan zeminde büyük oranda sıvılaşmaya rastlanılmaktadır ( Şekil 5.17. ).

Proje alanı 5 için elde edilen verilerden çizelge 5.1'deki değerler kullanılarak aynı şekilde deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri ise 0.30 olarak alındığında, yeraltı su seviyesi 1 metrede varsayıldığında elde edilecek sıvılaşma analizi sonuçları, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4'de verilen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)' a göre hesaplanarak çizelge 5.10 ve şekil 5.18'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.10. SPT Verileri İle Sıvılaşma Analizi Sonuçları

AD	(Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1.8	15	2.00	0.75	1.0	1.1	0.75	15.8	0.16797	<b>0.644</b>	82
3.3	18	1.72	0.75	1.0	1.1	0.75	19.1	0.20469	<b>0.645</b>	81
4.8	18	1.48	0.75	1.0	1.1	0.85	18.7	0.19945	<b>0.583</b>	89
6.3	18	1.32	0.75	1.0	1.1	0.85	16.6	0.17707	<b>0.499</b>	96
7.8	18	1.20	0.75	1.0	1.1	0.95	17.0	0.18031	<b>0.501</b>	96
9.3	18	1.11	0.75	1.0	1.1	0.95	15.7	0.16688	<b>0.465</b>	97
10.8	18	1.04	0.75	1.0	1.1	1.00	15.4	0.16425	<b>0.466</b>	97
12.3	18	0.98	0.75	1.0	1.1	1.00	14.5	0.15529	<b>0.456</b>	98
13.8	18	0.93	0.75	1.0	1.1	1.00	13.8	0.14790	<b>0.455</b>	98
15.3	18	0.88	0.75	1.0	1.1	1.00	13.1	0.14168	<b>0.462</b>	97
16.8	18	0.85	0.75	1.0	1.1	1.00	12.6	0.13635	<b>0.472</b>	97
18.3	18	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	12.1	0.13172	<b>0.484</b>	96
19.8	18	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	11.6	0.12764	<b>0.494</b>	96
21.3	18	0.76	0.75	1.0	1.1	1.00	11.2	0.12402	<b>0.502</b>	95

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	0,64	82
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	0,65	81
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	0,58	89
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	0,5	96
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	0,5	96
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	0,47	97
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	0,47	97
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	0,46	98
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	0,46	98
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	0,46	97
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	0,47	97
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	0,48	96
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	0,49	96
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	0,5	95

Şekil 5.18. SPT ye göre sıvılaşma analiz sonuçları program görüntüsü (M=7.5 ve ivme değeri 0,30)



$V_s$  ( kayma dalgası hızı ) verileri için şekil 5.5’de verilen abak kullanılarak CRR değerleri hesaplanarak çizelge 5.11 ile şekil 5.19’daki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 alınıp hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11. Kayma Dalgası Hızı ile Sıvılaşma Analizi Sonuçları

AD	m/s	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1.8	120	1.46	157.39	220	0.0846	<b>0.3243</b>
3.3	143	1.31	187.35	220	0.1288	<b>0.4059</b>
4.8	143	1.22	173.91	220	0.1062	<b>0.3102</b>
6.3	143	1.15	164.23	220	0.0930	<b>0.2621</b>
7.8	143	1.10	156.75	220	0.0839	<b>0.2331</b>
9.3	143	1.05	150.72	220	0.0771	<b>0.2147</b>
10.8	143	1.02	145.70	220	0.0717	<b>0.2035</b>
12.3	143	0.99	141.41	220	0.0674	<b>0.1977</b>
13.8	143	0.96	137.69	220	0.0637	<b>0.1962</b>
15.3	143	0.94	134.41	220	0.0606	<b>0.1977</b>
16.8	143	0.92	131.49	220	0.0579	<b>0.2007</b>
18.3	143	0.90	128.86	220	0.0556	<b>0.2042</b>
19.8	143	0.88	126.47	220	0.0535	<b>0.2072</b>
21.3	143	0.87	124.29	220	0.0517	<b>0.2093</b>

AD	$V_s$ (arazi) m/s	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	0,3243
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	0,4059
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	0,3102
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	0,2621
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	0,2331
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	0,2147
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	0,2035
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	0,1977
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	0,1962
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	0,1977
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	0,2007
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	0,2042
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	0,2072
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	0,2093

Şekil 5.19.  $V_s$  ye göre sıvılaşma analiz sonuçları program görüntüsü (  $M=7.5$  ve ivme değeri 0,30 )



Şekil 5.20. M=7.5 ve a=0.30 g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının) değişimi

Proje alanı 5 'deki farklı ivme değerinde yapılan analiz sonuçları ve çıkan değerler incelendiğinde, SPT ve  $V_s$  verilerinin  $G_k < 1$  olduğundan zeminde yüksek oranda sıvılaşmaya rastlanılmaktadır ( Şekil 5.20. ).

Proje alanı 6 için verilen verilerden çizelge 5.1'deki değerler kullanılarak aynı şekilde deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri ise 0.40 olarak alındığında, yeraltı su seviyesi 1 metrede varsayıldığında elde edilecek sıvılaşma analizi sonuçları, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4'de verilen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)' a göre hesaplanarak çizelge 5.12 ve şekil 5.21'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.12. SPT Verileri İle Sıvılaşma Analizi Sonuçları

AD	(Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (z)	G <sub>k</sub>	(%)
1.8	15	2.00	0.75	1.0	1.1	0.75	15.8	0.16797	<b>0.483</b>	97
3.3	18	1.72	0.75	1.0	1.1	0.75	19.1	0.20469	<b>0.484</b>	96
4.8	18	1.48	0.75	1.0	1.1	0.85	18.7	0.19945	<b>0.437</b>	98
6.3	18	1.32	0.75	1.0	1.1	0.85	16.6	0.17707	<b>0.374</b>	99
7.8	18	1.20	0.75	1.0	1.1	0.95	17.0	0.18031	<b>0.376</b>	99
9.3	18	1.11	0.75	1.0	1.1	0.95	15.7	0.16688	<b>0.349</b>	100

10.8	18	1.04	0.75	1.0	1.1	1.00	15.4	0.16425	<b>0.35</b>	100
12.3	18	0.98	0.75	1.0	1.1	1.00	14.5	0.15529	<b>0.342</b>	100
13.8	18	0.93	0.75	1.0	1.1	1.00	13.8	0.14790	<b>0.342</b>	100
15.3	18	0.88	0.75	1.0	1.1	1.00	13.1	0.14168	<b>0.347</b>	100
16.8	18	0.85	0.75	1.0	1.1	1.00	12.6	0.13635	<b>0.354</b>	99
18.3	18	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	12.1	0.13172	<b>0.363</b>	99
19.8	18	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	11.6	0.12764	<b>0.371</b>	99
21.3	18	0.76	0.75	1.0	1.1	1.00	11.2	0.12402	<b>0.377</b>	99

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	0,48	97
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	0,48	96
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	0,44	98
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	0,37	99
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	0,38	99
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	0,35	100
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	0,35	100
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	0,34	100
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	0,34	100
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	0,35	100
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	0,35	99
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	0,36	99
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	0,37	99
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	0,38	99

Şekil 5.21. SPT ye gör sivilaşma analizi sonuçları program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,40 )

$V_s$  ( kayma dalgası hızı ) verileri için şekil 5.5’de verilen abak kullanılarak CRR değerleri hesaplanarak çizelge 5.13 ve şekil 5.22’deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.40 alınıp hesaplanmıştır.

Çizelge 5.13. Kayma Dalgası Hızı ile Sivilaşma Analizi Sonuçları

AD	m/s	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1.8	120	1.46	157.39	220	0.0846	<b>0.2432</b>
3.3	143	1.31	187.35	220	0.1288	<b>0.3044</b>
4.8	143	1.22	173.91	220	0.1062	<b>0.2326</b>
6.3	143	1.15	164.23	220	0.0930	<b>0.1966</b>
7.8	143	1.10	156.75	220	0.0839	<b>0.1748</b>
9.3	143	1.05	150.72	220	0.0771	<b>0.1610</b>

10.8	143	1.02	145.70	220	0.0717	<b>0.1526</b>
12.3	143	0.99	141.41	220	0.0674	<b>0.1483</b>
13.8	143	0.96	137.69	220	0.0637	<b>0.1472</b>
15.3	143	0.94	134.41	220	0.0606	<b>0.1483</b>
16.8	143	0.92	131.49	220	0.0579	<b>0.1506</b>
18.3	143	0.90	128.86	220	0.0556	<b>0.1532</b>
19.8	143	0.88	126.47	220	0.0535	<b>0.1554</b>
21.3	143	0.87	124.29	220	0.0517	<b>0.1569</b>

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1c	CRR (z)	Gk
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	0,2432
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	0,3044
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	0,2326
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	0,1966
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	0,1748
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	0,1610
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	0,1526
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	0,1483
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	0,1472
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	0,1483
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	0,1506
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	0,1532
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	0,1554
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	0,1569

Şekil 5.22. Vs ye göre sıvılaşma analizi sonuçları program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,40 )



Şekil 5.23. M=7.5 ve a=0.40 g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının) değişimi

Proje alanı 6 da ki çalışmaların farklı ivme değerinde yapılan analiz sonuçları ve çıkan değerler incelendiğinde, SPT ve  $V_s$  verilerinin  $G_k < 1$  olduğundan zeminde yüksek oranda sıvılaşmanın olacağı anlaşılmaktadır ( Şekil 5.23. ).

Proje alanı 7 için elde edilen verilerden çizelge 5.1'deki değerler kullanılarak aynı şekilde deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri ise 0.50 olarak alındığında, yeraltı su seviyesi 1 metrede varsayıldığında elde edilecek sıvılaşma analizi sonuçları, SPT verileri için CRR değerleri şekil 5.4'de verilen abaktan belirlenerek CSR değeri formül (4.9)' a göre hesaplanarak çizelge 5.14 ve şekil 5.24'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.14. SPT Verileri İle Sıvılaşma Analizi Sonuçları

AD	(Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (z)	$G_k$	(%)
1.8	15	2.00	0.75	1.0	1.1	0.75	15.8	0.16797	<b>0.386</b>	99
3.3	18	1.72	0.75	1.0	1.1	0.75	19.1	0.20469	<b>0.387</b>	99
4.8	18	1.48	0.75	1.0	1.1	0.85	18.7	0.19945	<b>0.35</b>	100
6.3	18	1.32	0.75	1.0	1.1	0.85	16.6	0.17707	<b>0.3</b>	100
7.8	18	1.20	0.75	1.0	1.1	0.95	17.0	0.18031	<b>0.301</b>	100
9.3	18	1.11	0.75	1.0	1.1	0.95	15.7	0.16688	<b>0.279</b>	100
10.8	18	1.04	0.75	1.0	1.1	1.00	15.4	0.16425	<b>0.28</b>	100
12.3	18	0.98	0.75	1.0	1.1	1.00	14.5	0.15529	<b>0.274</b>	100
13.8	18	0.93	0.75	1.0	1.1	1.00	13.8	0.14790	<b>0.273</b>	100
15.3	18	0.88	0.75	1.0	1.1	1.00	13.1	0.14168	<b>0.277</b>	100
16.8	18	0.85	0.75	1.0	1.1	1.00	12.6	0.13635	<b>0.283</b>	100
18.3	18	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	12.1	0.13172	<b>0.29</b>	100
19.8	18	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	11.6	0.12764	<b>0.296</b>	100
21.3	18	0.76	0.75	1.0	1.1	1.00	11.2	0.12402	<b>0.301</b>	100

AD	SPT (Arazi)	CN	CE	CB	CS	CR	N1(60)	CRR (Z)	G <sub>k</sub>	Prob L (%)
1,8	15	2,00	0,75	1,0	1,1	0,75	15,8	0,16797	0,39	99
3,3	18	1,72	0,75	1,0	1,1	0,75	19,1	0,20469	0,39	99
4,8	18	1,48	0,75	1,0	1,1	0,85	18,7	0,19945	0,35	100
6,3	18	1,32	0,75	1,0	1,1	0,85	16,6	0,17707	0,3	100
7,8	18	1,20	0,75	1,0	1,1	0,95	17,0	0,18031	0,3	100
9,3	18	1,11	0,75	1,0	1,1	0,95	15,7	0,16688	0,28	100
11	18	1,04	0,75	1,0	1,1	1,00	15,4	0,16425	0,28	100
12	18	0,98	0,75	1,0	1,1	1,00	14,5	0,15529	0,27	100
14	18	0,93	0,75	1,0	1,1	1,00	13,8	0,14790	0,27	100
15	18	0,88	0,75	1,0	1,1	1,00	13,1	0,14168	0,28	100
17	18	0,85	0,75	1,0	1,1	1,00	12,6	0,13635	0,28	100
18	18	0,81	0,75	1,0	1,1	1,00	12,1	0,13172	0,29	100
20	18	0,78	0,75	1,0	1,1	1,00	11,6	0,12764	0,3	100
21	18	0,76	0,75	1,0	1,1	1,00	11,2	0,12402	0,3	100

Şekil 5.24. SPT ye göre sıvılaşma analizi sonuçları program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,50 )

$V_s$  ( kayma dalgası hızı ) verileri için şekil 5.5’de verilen abak kullanılarak CRR değerleri hesaplanarak çizelge 5.15 ve şekil 5.25’deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 alınıp elde edilmiştir.

Çizelge 5.15. Kayma Dalgası Hızı Verileri İle Sıvılaşma Analizi

AD	m/s	CV	$V_{s1}$ , m/s	$V_{s1c}$	CRR (z)	$G_k$
1.8	120	1.46	157.39	220	0.0846	<b>0.1946</b>
3.3	143	1.31	187.35	220	0.1288	<b>0.2435</b>
4.8	143	1.22	173.91	220	0.1062	<b>0.1861</b>
6.3	143	1.15	164.23	220	0.0930	<b>0.1572</b>
7.8	143	1.10	156.75	220	0.0839	<b>0.1399</b>
9.3	143	1.05	150.72	220	0.0771	<b>0.1288</b>
10.8	143	1.02	145.70	220	0.0717	<b>0.1221</b>
12.3	143	0.99	141.41	220	0.0674	<b>0.1186</b>
13.8	143	0.96	137.69	220	0.0637	<b>0.1177</b>
15.3	143	0.94	134.41	220	0.0606	<b>0.1186</b>
16.8	143	0.92	131.49	220	0.0579	<b>0.1204</b>
18.3	143	0.90	128.86	220	0.0556	<b>0.1225</b>
19.8	143	0.88	126.47	220	0.0535	<b>0.1243</b>
21.3	143	0.87	124.29	220	0.0517	<b>0.1256</b>

AD	Vs (arazi) m/s	CV	Vs1, m/s	Vs1c	CRR (z)	Gk
1,8	120	1,46	157,39	220	0,0846	0,1946
3,3	143	1,31	187,35	220	0,1288	0,2435
4,8	143	1,22	173,91	220	0,1062	0,1861
6,3	143	1,15	164,23	220	0,0930	0,1572
7,8	143	1,10	156,75	220	0,0839	0,1399
9,3	143	1,05	150,72	220	0,0771	0,1288
10,8	143	1,02	145,70	220	0,0717	0,1221
12,3	143	0,99	141,41	220	0,0674	0,1186
13,8	143	0,96	137,69	220	0,0637	0,1177
15,3	143	0,94	134,41	220	0,0606	0,1186
16,8	143	0,92	131,49	220	0,0579	0,1204
18,3	143	0,90	128,86	220	0,0556	0,1225
19,8	143	0,88	126,47	220	0,0535	0,1243
21,3	143	0,87	124,29	220	0,0517	0,1256

Şekil 5.25. Vs ye göre sıvılaşma analizi sonuçları program görüntüsü ( M=7.5 ve ivme değeri 0,50 )



Şekil 5.26. M=7.5 ve a=0.50 g lik ivme için yeraltı suyunun 1 metrede olduğu durum için, SPT ve Kayma Dalga Hızı Vs na göre GK (Güvenlik katsayısının) değişimi

Proje alanı 7 de ki çalışmaların farklı ivme değerinde yapılan analiz sonuçları ve çıkan değerler incelendiğinde, SPT ve  $V_s$  verilerinin  $G_k < 1$  olduğundan zeminde yüksek oranda sıvılaşmanın olacağı anlaşılmaktadır ( Şekil 5.26. ).

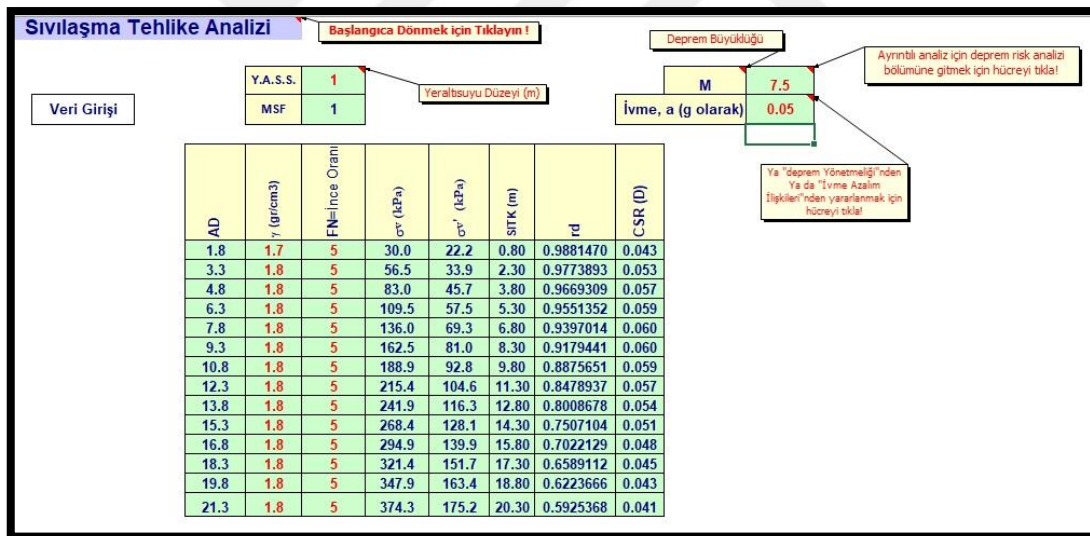
### 5.1.1.1. Deprem Şiddeti Ve Odak Uzaklığı Kullanılarak Sıvılaşma Analizi

Proje alanına 50 km uzaklıkta ve deprem üretme olasılığı yüksek bir zonun hangi büyüklükte oluşturacağı sıvılaşma analizi formülü (4.34) kullanılarak,

$$M_w = 4.64 + 2.65 * 10^{-3} 50 + 0.99 \log 50 = 6.5 \text{ bulunur.}$$

Sonuç olarak bu deprem kaynağında 6.5 ve yukarıdaki her deprem proje alanında sıvılaşma oluşturur.

### 5.1.2. Deprem Büyüklüğü ve İvme Kullanılarak Yapılan Sıvılaşma Analizi



Şekil 5.27. Deprem büyüklüğü ve ivme kullanılarak yapılan sıvılaşma analizi

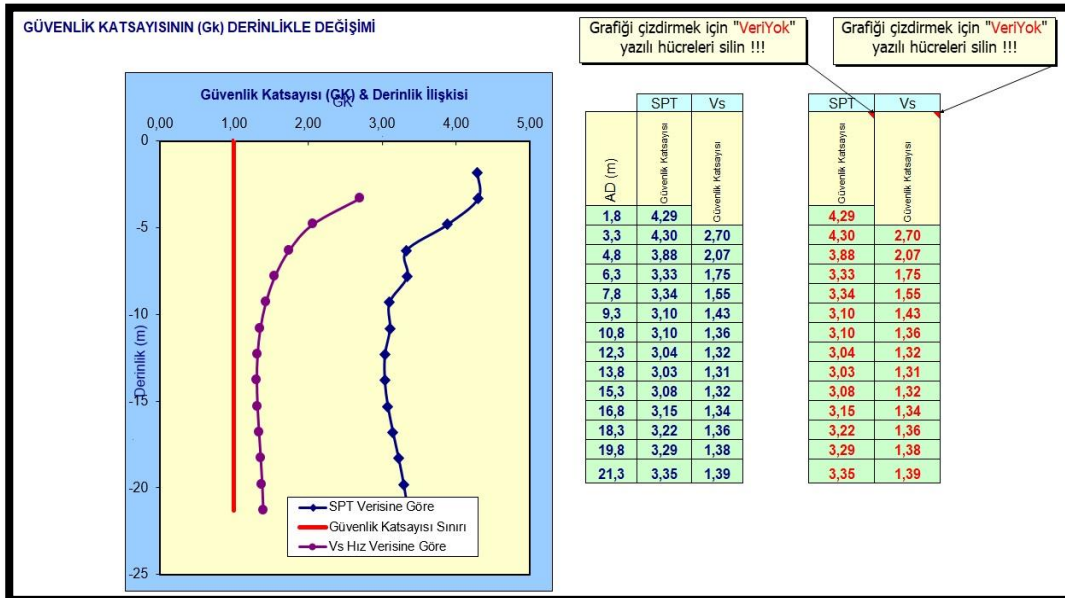
Proje alanı 1'de yeraltı su seviyesi 1 metre, ortalama birim hacim ağırlığı 1,8 g/cm<sup>3</sup>, depremin büyüklüğü 7,5 ve ivme değeri 0,05 olarak belirlenmiştir. Alandaki diğer veriler Çizelge 5.16'da görülmektedir. Bu koşullarda yapılan sıvılaşma analizinde,



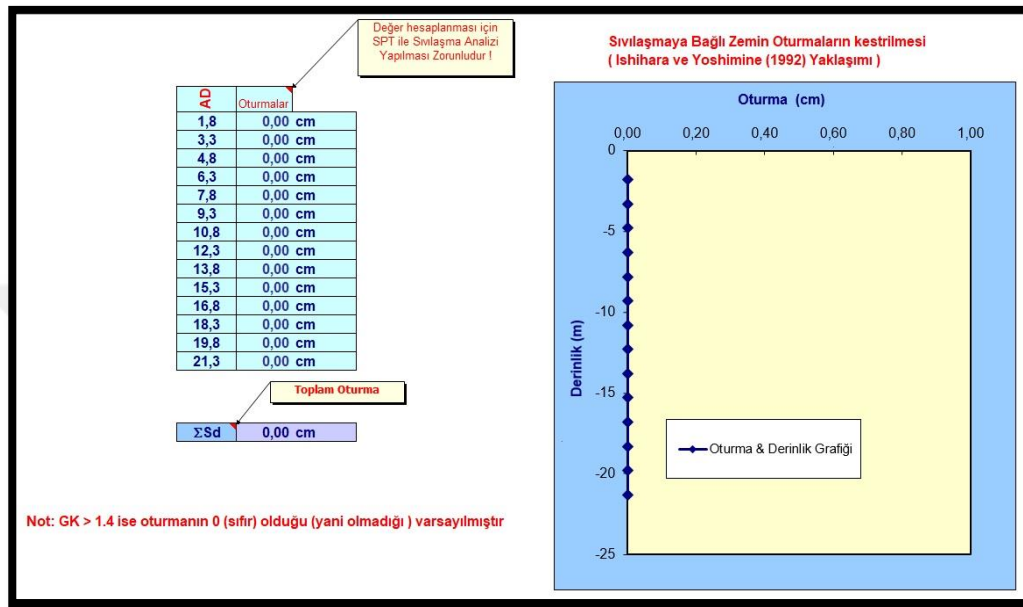
Çizelge 5.16 Proje alanı 1 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.05 g için)

AD	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	FN (İnce oranı)	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma'_v$ (kPa)	SITK (metre)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.043
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.053
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.057
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.059
7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.060
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.060
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.059
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.057
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.054
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.051
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.048
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.045
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.043
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.041

Şekil 5.28'de  $V_s$  kayma dalga hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görülmektedir.

Şekil 5.28. G<sub>k</sub>' nın derinlikle değişimi ve SPT ile V<sub>s</sub> arasındaki ilişkisi

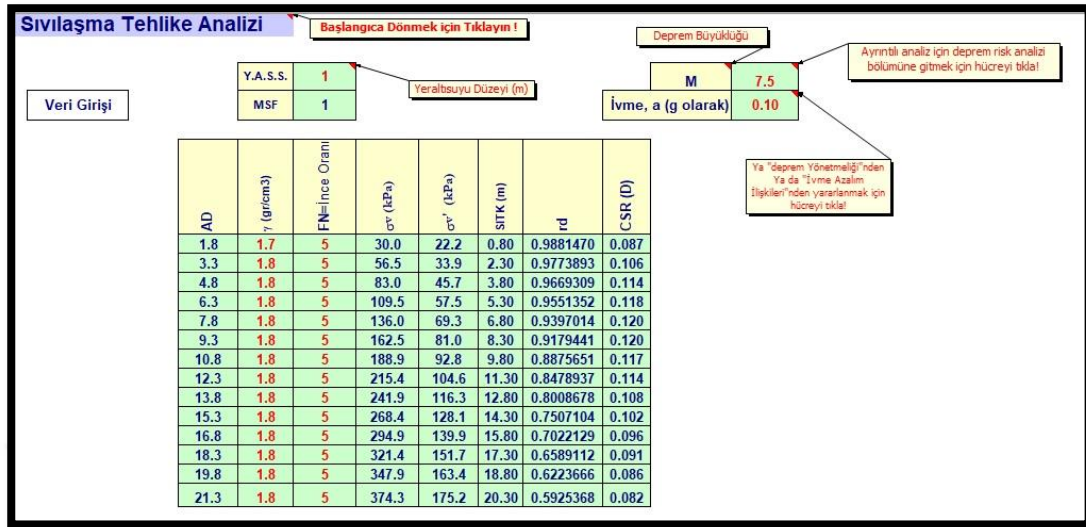
Şekil 5.29'de ivme değeri 0.05 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.29. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.05 için Sıvılaşmaya zemin oturmaların kestirilmesi analizi

Proje alanı 1'in sonuçlarına göre, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.05 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde zeminde herhangi bir oturma olmayacağı analizler sonucunda ortaya çıkmıştır. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde sıvılaşmanın olmayacağı  $G_k > 1$  olduğundan yapılan analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Proje alanı 2'de farklı ivme değeri verilerek yapılan sıvılaşma analizinde, yeraltı su seviyesinin 1 metrede varsayılarak, ortalama zeminin birim hacim ağırlığı  $1,8 \text{ g/cm}^3$  olup, deprem büyüklüğü 7.5 ve 0.10 g ivme değeri verilmiştir. Bu verilerden elde edilen analiz sonuçları şekil 5.30'da ve çizelge 5.17'de diğer sonuçlar verilmiştir.

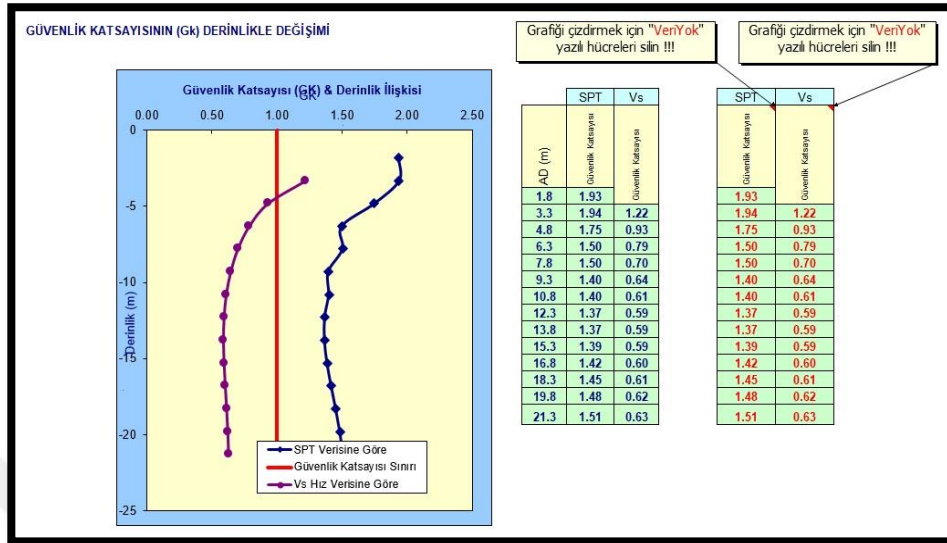


Şekil 5.30. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.10 için sıvılaşma analizi sonuçları

Çizelge 5.17. Proje alanı 2 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.10 için )

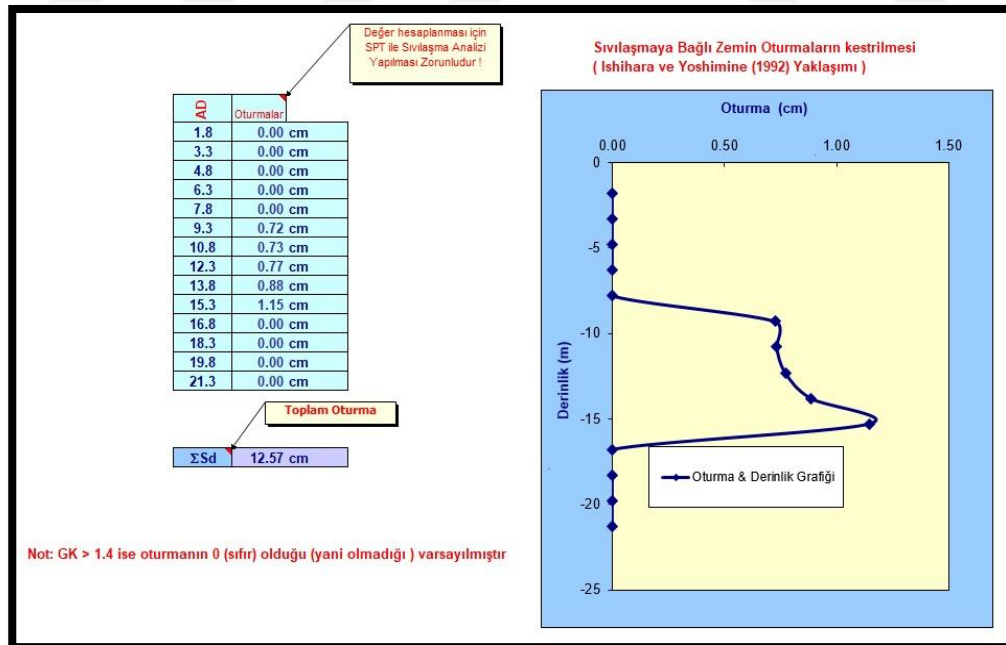
AD	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FN=İnce Oranı	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	SITK (m)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.087
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.106
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.114
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.118
7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.120
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.120
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.117
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.114
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.108
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.102
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.096
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.091
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.086
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.082

Şekil 5.31'de  $V_s$  kayma dalga hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görülmektedir. Bu değişim, derem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.10 için verilmiştir.



Şekil 5.31. G<sub>k</sub> 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile V<sub>s</sub> arasındaki ilişkisi

Şekil 5.32'de ivme değeri 0.10 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görülmektedir.

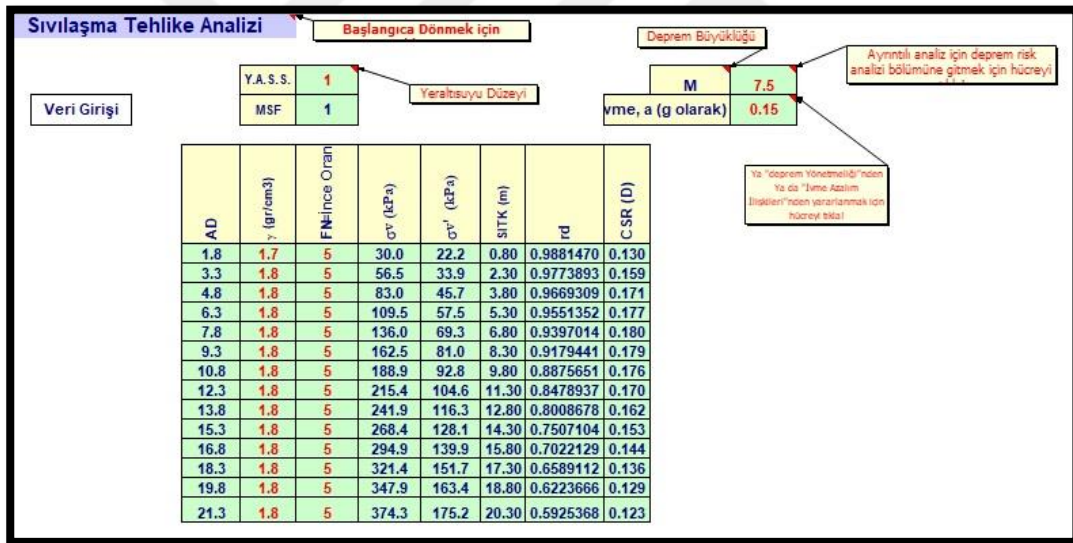


Şekil 5.32. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.10 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi

Proje alanı 2'nin sonuçlarına göre, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.10 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde

zeminde derinlik 9.3 m 'den sonra 15.3 m'ye kadar oturma olup toplamda 12.57 cm oturmanın olacağı görülmüştür. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde ilk 3.5 m de sıvılaşmanın olmayacağı  $G_k > 1$  olduğundan yapılan analiz sonuçlarından ortaya çıkmaktadır. Bunun dışındaki derinliklerde sıvılaşmanın  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşma olacağı anlaşılmaktadır.

Proje alanı 3'de farklı ivme değeri verilerek yapılan sıvılaşma analizinde, yeraltı su seviyesinin 1 metrede varsayılarak, ortalama zeminin birim hacim ağırlığı  $1,8 \text{ g/cm}^3$  olup, deprem büyüklüğü 7.5 ve 0.15 g ivme değeri verilmiştir. Bu verilerden elde edilen analiz sonuçları şekil 5.33'de ve çizelge 5.18'de diğer sonuçlar verilmiştir.



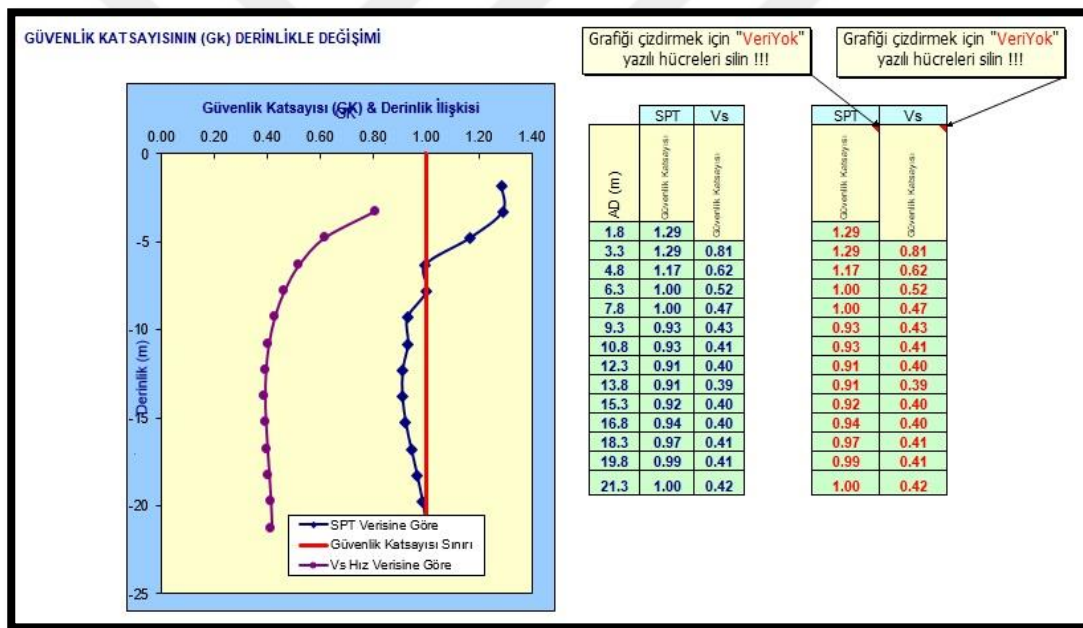
Şekil 5.33. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 için verilen analiz sonuçları

Çizelge 5.18. Proje alanı 3 veri sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.15 için )

AD	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FN=İnce Oranı	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	SITK (m)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.130
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.159
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.171
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.177
7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.180
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.179
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.176

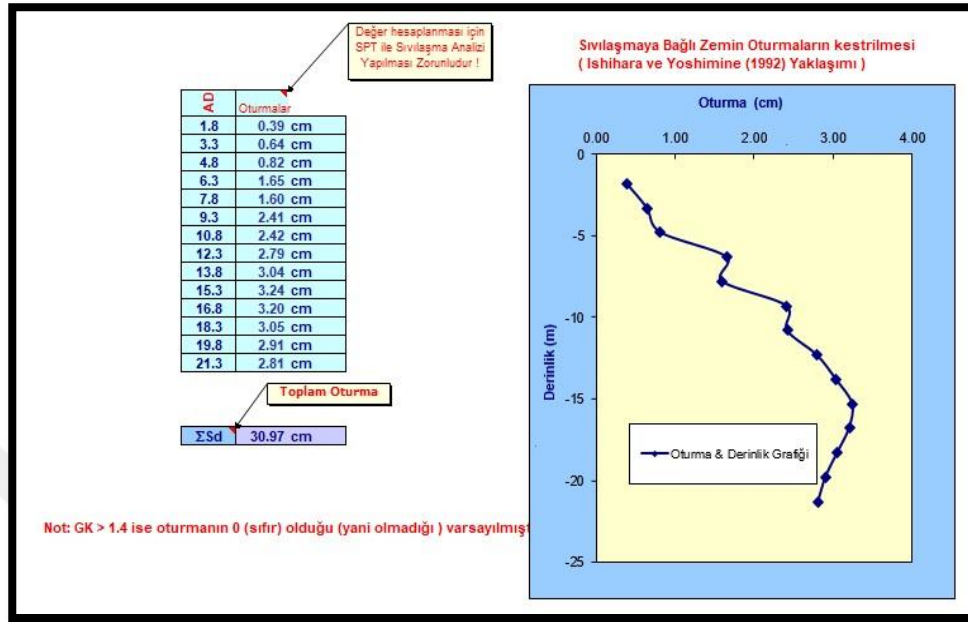
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.170
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.162
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.153
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.144
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.136
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.129
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.123

Şekil 5.34'de  $V_s$  kayma dalgı hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görölmektedir. Bu değişim, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 için verilmiştir.



Şekil 5.34.  $G_k$  'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile  $V_s$  arasında ki ilişkisi

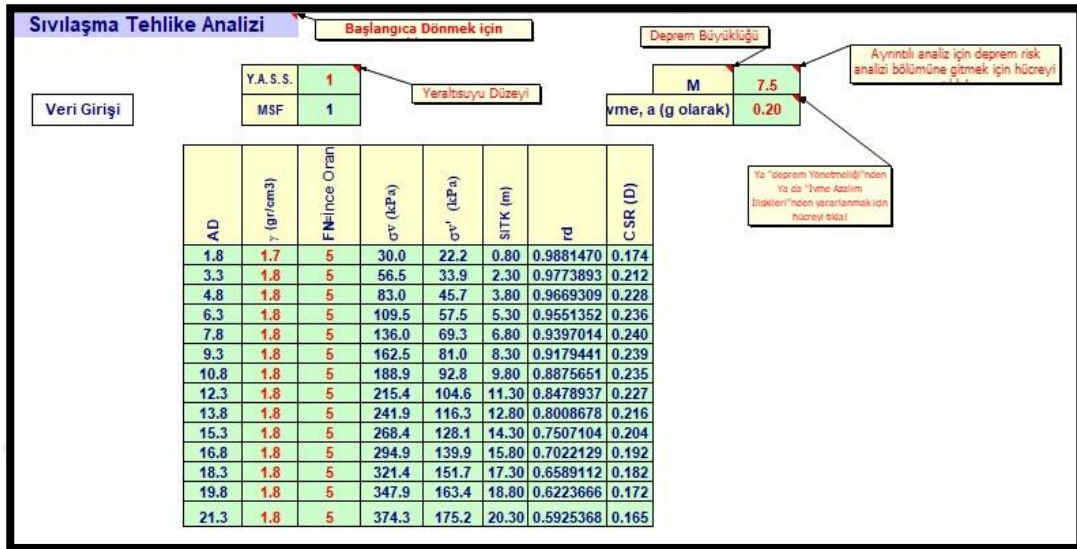
Şekil 5.35'de deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görölmektedir.



Şekil 5.35. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.15 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi

Proje alanı 3'ün sonuçlarına göre, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.15 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde zeminde derinlikle bağlantılı olarak artan bir grafik çizdiğinden toplamda 30.97 cm oturmanın olacağı düşünülmelidir. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde SPT ile yapılan analizlerde 8 metreye kadar sıvılaşma olmayabilir. Bu metreden sonra ki derinliklerde sıvılaşmaya rastlanılmaktadır. Aynı proje alanında  $V_s$  için yapılan analizde çıkan sonuçlara bakıldığında  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşmanın olacağı ortaya çıkmaktadır.

Proje alanı 4'de farklı ivme değeri alınarak yapılan sıvılaşma analizinde, yeraltı su seviyesinin 1 metrede varsayılarak, ortalama zeminin birim hacim ağırlığı  $1,8 \text{ g/cm}^3$  olup, deprem büyüklüğü 7.5 ve 0.20 g ivme değeri verilmiştir. Bu verilerden elde edilen analiz sonuçları şekil 5.36'da ve çizelge 5.19'da diğer sonuçlar verilmiştir.



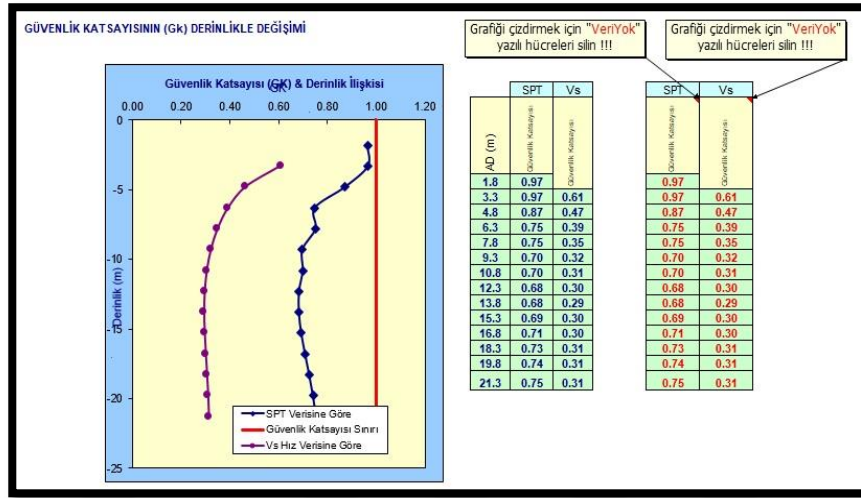
Şekil 5.36. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 için analiz verileri

Çizelge 5.19. Proje alanı 4 veri analiz sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.20 için )

AD	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FN=İnce Oranı	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	SITK (m)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.174
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.212
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.228
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.236
7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.240
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.239
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.235
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.227
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.216
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.204
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.192
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.182
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.172
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.165

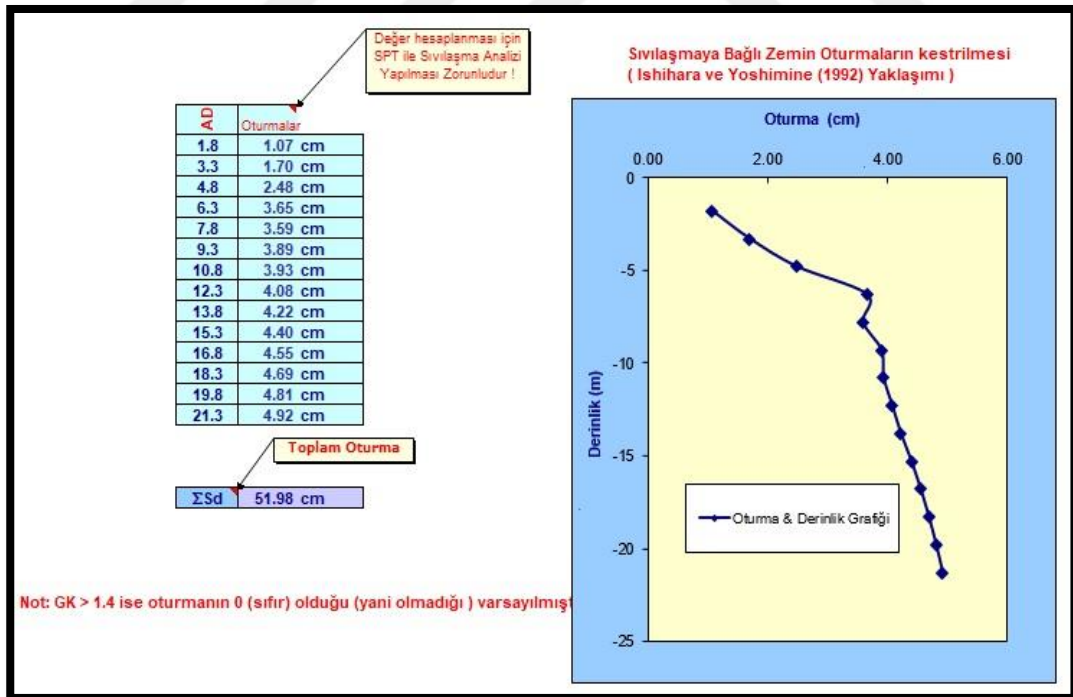
Şekil 5.37'de  $V_s$  kayma dalga hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görülmektedir. Bu değişim, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 için verilmiştir.





Şekil 5.37. G<sub>K</sub>'nin derinlik ile değişimi ve SPT ile V<sub>s</sub> arasındaki ilişkisi

Şekil 5.38'de deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görülmektedir.

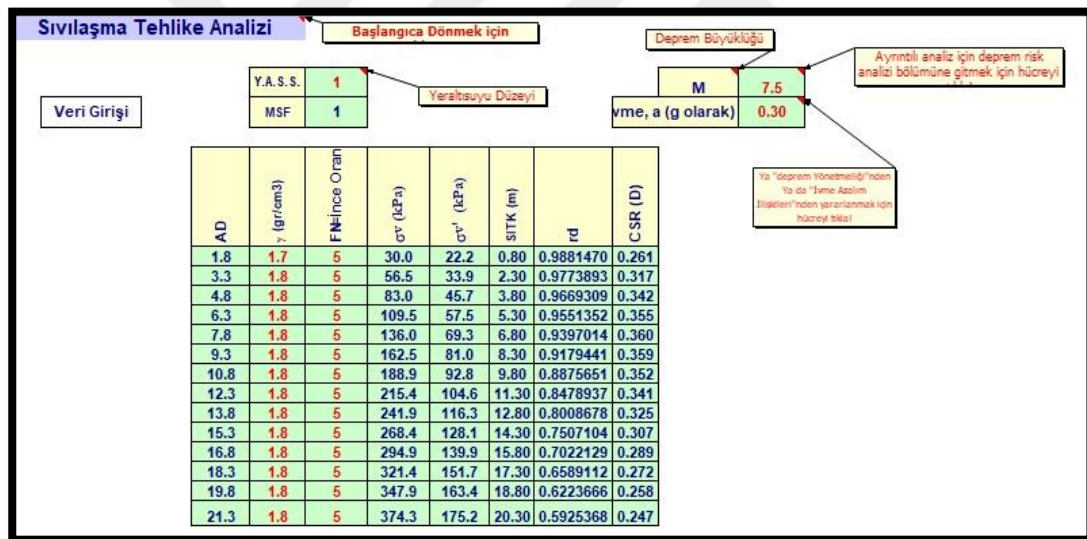


Şekil 5.38. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.20 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi

Proje alanı 4'ün sonuçlarına göre, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.20 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde

zeminde derinlik ile ilişkili olarak artan bir eğilim gösterdiğinden toplamda 51.98 cm oturmanın olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde SPT ile yapılan analizlerde sıvılaşmanın yüksek oranda gerçekleşecektir. Aynı proje alanında  $V_s$  için yapılan analizde çıkan sonuçlara bakıldığında  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşma var diyebiliriz.

Proje alanı 5’de farklı ivme değeri alınarak yapılan sıvılaşma analizinde, yeraltı su seviyesinin 1 metrede olup, ortalama zeminin birim hacim ağırlığı  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , deprem büyüklüğü 7.5 ve 0.30 g ivme değeri verilmiştir. Bu verilerden elde edilen analiz sonuçları şekil 5.39’da ve çizelge 5.20’de diğer sonuçlar verilmiştir.



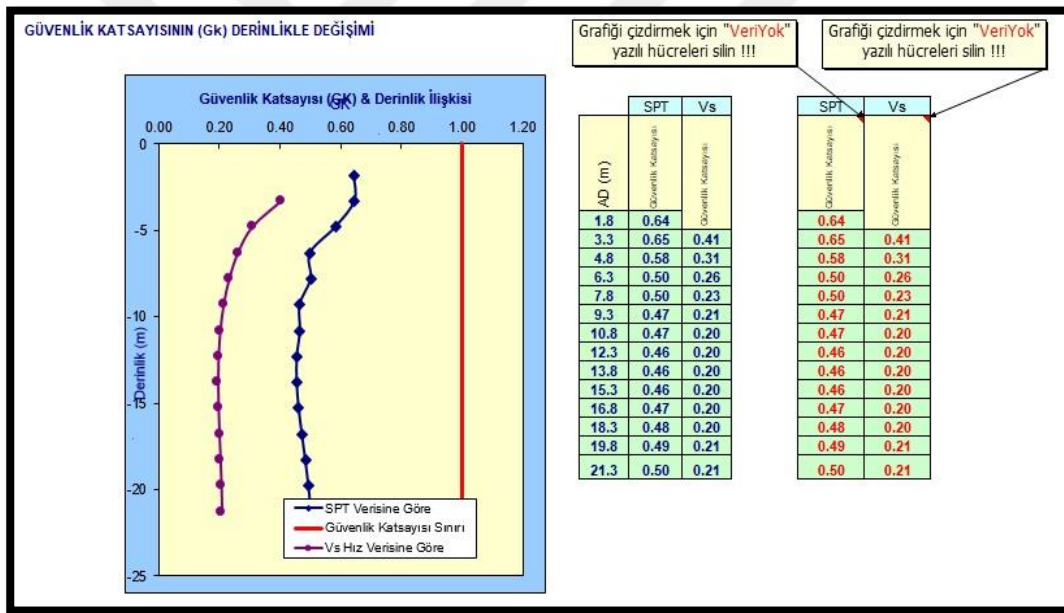
Şekil 5.39. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 için sıvılaşma analizi sonuçları

Çizelge 5.20. Proje alanı 5 veri sonuçları ( M=7.5 ve ivme değeri 0.30 için )

AD	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FN=İnce Oranı	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	SITK (m)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.261
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.317
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.342
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.355
7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.360
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.359
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.352

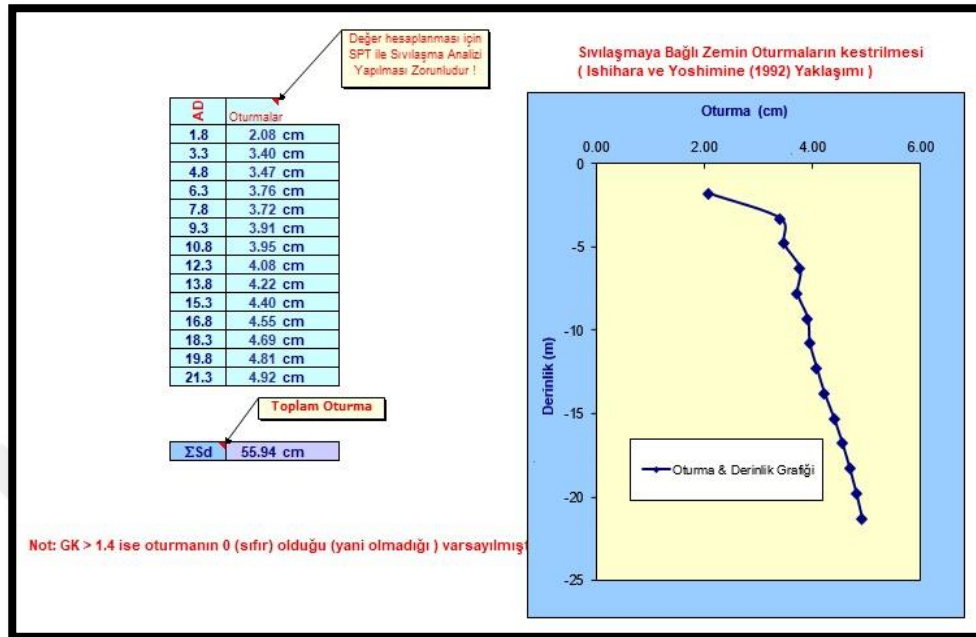
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.341
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.325
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.307
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.289
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.272
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.258
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.247

Şekil 5.40'da  $V_s$  kayma dalga hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görülmektedir. Bu değişim, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 için verilmiştir.



Şekil 5.40.  $G_k$ 'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile  $V_s$  arasındaki ilişkisi

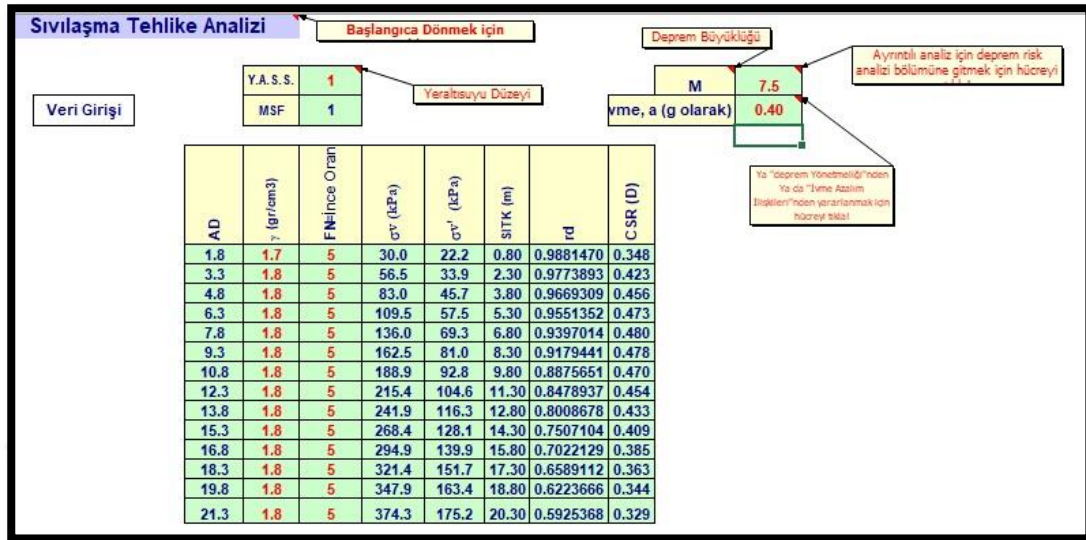
Şekil 5.41'de deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.41. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.30 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi

Proje alanı 5'in değerlendirilmesinde sonuç olarak, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.30 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde zeminde derinlikle ilişkili olarak artarak toplamda 55.94 cm oturma olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde SPT ile yapılan analizlerde sıvılaşma yüksek oranda gerçekleşecektir. Aynı proje alanında  $V_s$  için yapılan analizde çıkan sonuçlara bakıldığında  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşma olacaktır.

Proje alanı 6'da farklı ivme değeri alınarak yapılan sıvılaşma analizinde, yeraltı su seviyesinin 1 metrede olup, ortalama zeminin birim hacim ağırlığı  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , deprem büyüklüğü 7.5 ve 0.40 g ivme değeri verilmiştir. Bu verilerden elde edilen analiz sonuçları şekil 5.42'de ve çizelge 5.21'de diğer sonuçlar verilmiştir.

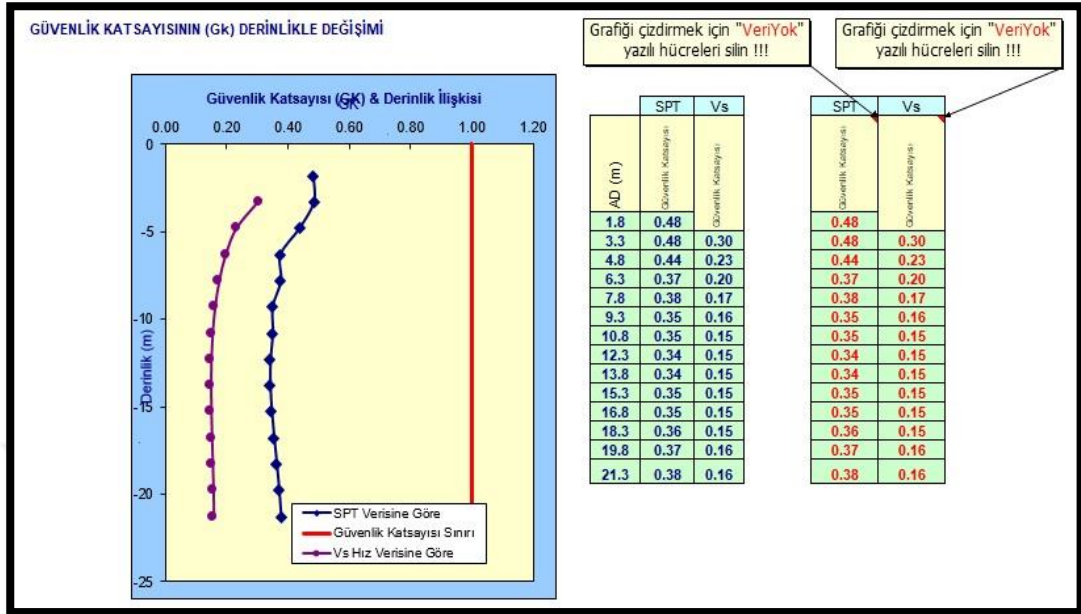


Şekil 5.42. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme Değeri 0.40 için sıvılaşma analizi sonuçları

Çizelge 5.21. Proje alanı 6 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.40 için )

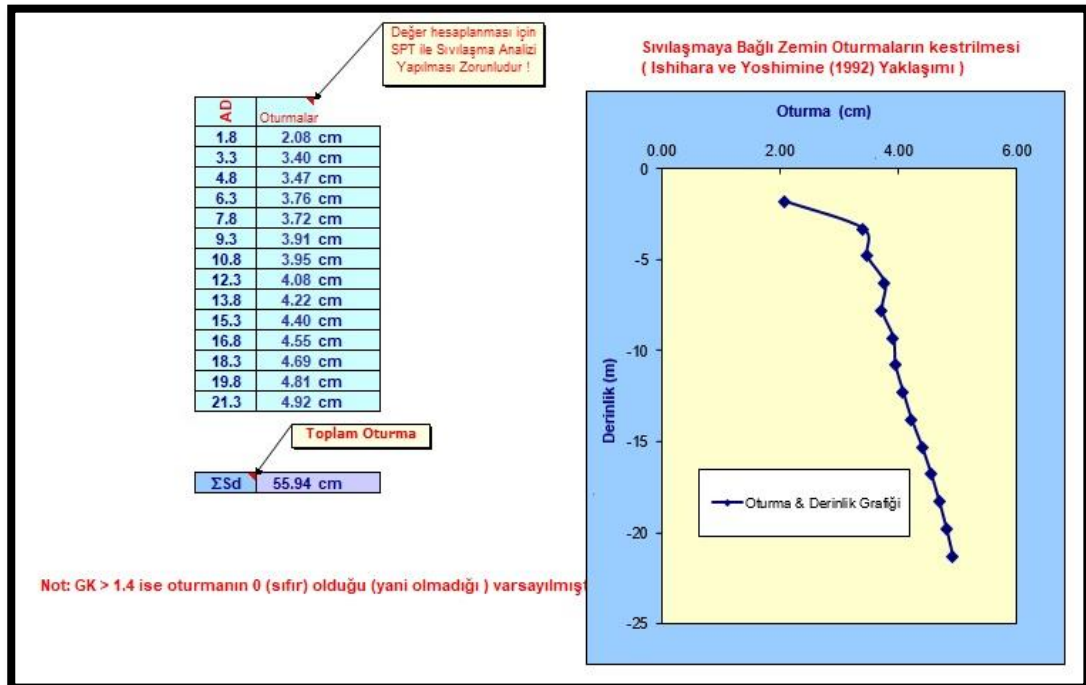
AD	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FN=İnce Oranı	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	SITK (m)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.348
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.423
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.456
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.473
7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.480
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.478
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.470
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.454
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.433
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.409
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.385
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.363
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.344
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.329

Şekil 5.43'da  $V_s$  kayma dalga hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görülmektedir. Bu değişim, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.40 için verilmiştir.



Şekil 5.43. G<sub>k</sub>'nin derinlikle değişimi ve SPT ile V<sub>s</sub> arasındaki ilişki

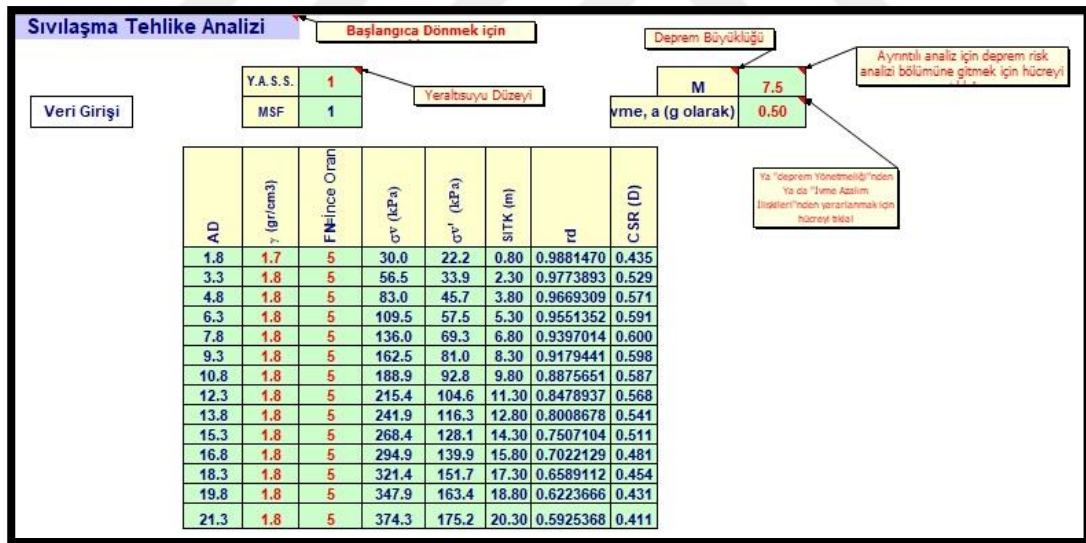
Şekil 5.44'de deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.40 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.44. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.40 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi

Proje alanı 6'nın değerlendirilmesinde sonuç olarak, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.40 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde zeminde derinlik arttıkça oturma değeri artarak toplamda 55.94 cm oturmanın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde SPT ile yapılan analizlerde sıvılaşma yüksek oranda gerçekleşecektir. Aynı proje alanında  $V_s$  için yapılan analizde çıkan sonuçlara bakıldığında  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşmanın olacağı ortaya çıkmaktadır.

Proje alanı 7'de farklı ivme değeri alınarak yapılan sıvılaşma analizinde, yeraltı su seviyesinin 1 metrede olup, ortalama zeminin birim hacim ağırlığı  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , deprem büyüklüğü 7.5 ve 0.50 g ivme değeri verilmiştir. Bu verilerden elde edilen analiz sonuçları şekil 5.45'de ve çizelge 5.22'de diğer sonuçlar verilmiştir.



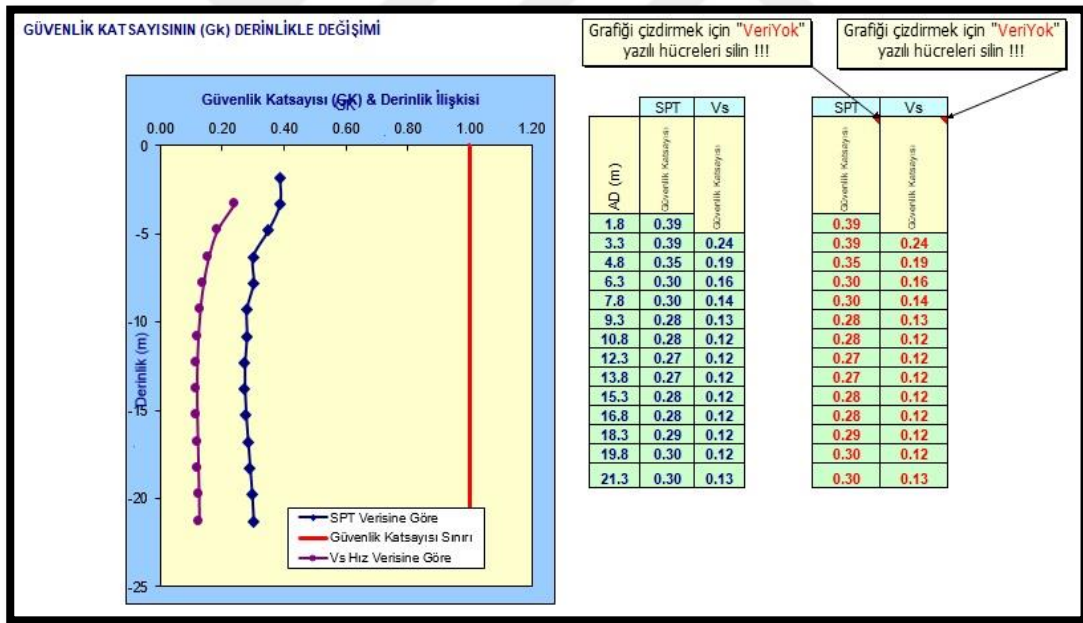
Şekil 5.45. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 için sıvılaşma analizi sonuçları

Çizelge 5.22. Proje alanı 7 verileri ( M=7.5 ve ivme değeri 0.50 için )

AD	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	FN=İnce Oranı	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_v'$ (kPa)	SITK (m)	$r_d$	CSR (D)
1.8	1.7	5	30.0	22.2	0.80	0.9881470	0.435
3.3	1.8	5	56.5	33.9	2.30	0.9773893	0.529
4.8	1.8	5	83.0	45.7	3.80	0.9669309	0.571
6.3	1.8	5	109.5	57.5	5.30	0.9551352	0.591

7.8	1.8	5	136.0	69.3	6.80	0.9397014	0.600
9.3	1.8	5	162.5	81.0	8.30	0.9179441	0.598
10.8	1.8	5	188.9	92.8	9.80	0.8875651	0.587
12.3	1.8	5	215.4	104.6	11.30	0.8478937	0.568
13.8	1.8	5	241.9	116.3	12.80	0.8008678	0.541
15.3	1.8	5	268.4	128.1	14.30	0.7507104	0.511
16.8	1.8	5	294.9	139.9	15.80	0.7022129	0.481
18.3	1.8	5	321.4	151.7	17.30	0.6589112	0.454
19.8	1.8	5	347.9	163.4	18.80	0.6223666	0.431
21.3	1.8	5	374.3	175.2	20.30	0.5925368	0.411

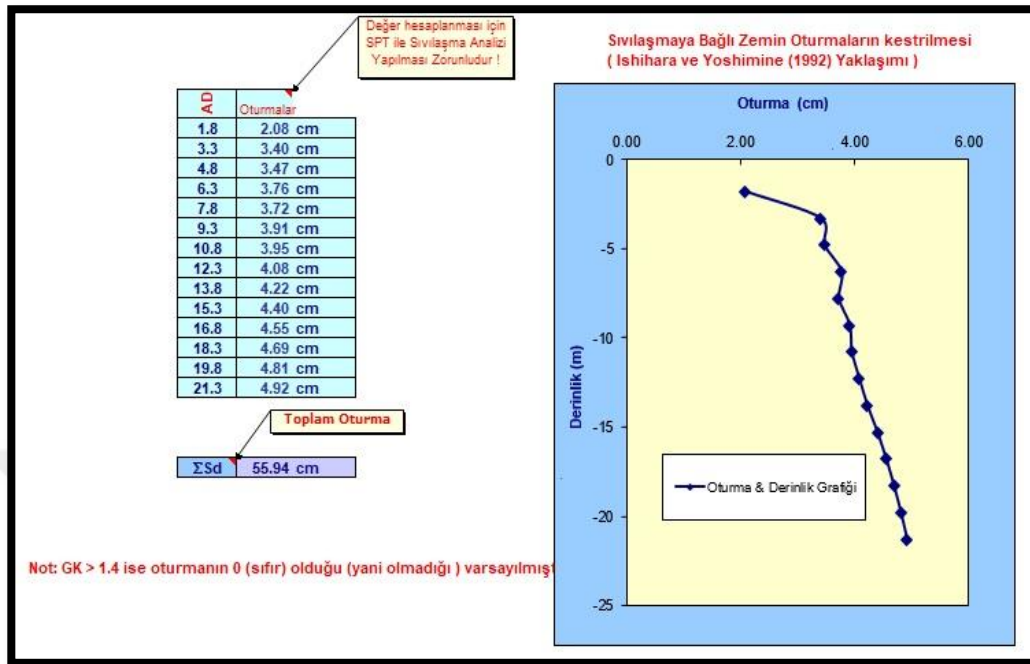
Şekil 5.46'de  $V_s$  kayma dalga hızı ve SPT değerlerine göre güvenlik katsayısı ve derinlik değişimi görülmektedir. Bu değişim, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 için verilmiştir.



Şekil 5.46. Gk'nın derinlik ile değişimi ve SPT ile Vs arasındaki ilişkisi

Şekil 5.47'de deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 g olarak alınan, sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi ile ilgili sonuçlar görülmektedir.





Şekil 5.47. Deprem büyüklüğü 7.5 ve ivme değeri 0.50 için sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi

Proje alanı 7'nin değerlendirilmesinde sonuç olarak, deprem büyüklüğü 7.5 ve ivmesi değeri 0.50 olarak belirlenen proje alanında yapılacak veya yapılması düşünülen bina/konut yerleşiminde zeminde derinlikle bağlantılı olarak artan eğilim gösterdiğinden toplamda 55.94 cm oturmanın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, aynı ivme değerinde zeminde SPT ile yapılan analizlerde sıvılaşma yüksek oranda var diyebiliriz. Aynı proje alanında  $V_s$  için yapılan analizde çıkan sonuçlara bakıldığında  $G_k < 1$  olduğundan sıvılaşmanın olacağı ortaya çıkmaktadır.

## 5.2. Elde Edilen Sonuçların Genel Değerlendirilmesi

Bilindiği gibi su seviyesi altındaki gevşek granüler zeminlerin deprem etkisi altında ani olarak doğacak boşluk suyu basınç artışları ile taşıma gücünü kaybetme (sıvılaşma) olasılığı vardır. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde Seed ve Idriss (1971), Seed ve diğ. (1985), Youd ve diğ. (2001), Dobry ve diğ. (1981) ve Iwasaki ve diğ. (1978) tarafından modifiye edilmiş yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlere göre

sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde proje alanında 7.5 büyüklüğünde bir deprem olacağı varsayılarak, depremin zemin yüzeyinde oluşturacağı en büyük yatay yer ivmesi  $a_{max}$ 'ın değerleri; 0,05 g; 0,10 g; 0,15 g; 0,20 g; 0,30 g; 0,40 g ve 0,50 g olmak üzere yedi farklı ivme değeri olarak alınmış ve

$$CSR(\text{cyclic stress ratio}) = (\tau_0/\sigma_{v0}^1) = (0.65) \cdot (a_{max} \cdot \sigma_{v0}/g \cdot \sigma_{v0}/g) \cdot r_d$$

eşitliği kullanılarak deprem sırasında zeminin oluşturduğu devirsel/çevrimsel kayma gerilmesi oranı ( CSR ) hesaplanmıştır (Çizelge 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22). Sonraki aşamada sıvılaşma direncini değerlendirmek için Seed ve Idriss (1981) tarafından önceki bölümde verilen grafik abağı (Şekil 5.4 ve 5.5) kullanılarak 7.5 büyüklüğünde deprem ve düzeltilmiş standart penetrasyon sayısı N' değerlerine karşılık gelen zeminin oluşturduğu devirsel/çevrimsel kayma gerilmesi oranı ( CRR ) belirlenmiştir. Grafikten okunan dinamik kayma direnç oranları, deprem sırasında zemin tabakasında oluşacak dinamik kayma gerilme oranlarına bölünerek sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü ( $GF_{siv} = CRR / CSR$ ) hesaplanmıştır. Güvenlik faktörü  $GF_{siv} \geq 1$  durumunda sıvılaşmanın olmayacağı,  $GF_{siv} < 1$  olması durumunda ise silt ve kum tabakaları için sıvılaşma olacağı değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.28.'de görüldüğü üzere  $a_{max}=0,05$  g proje alanı 1'de yapılan çalışmalarda 1.80, 3.30, 4.80, 6.30, 7.80, 9.30, 10.80, 12.30, 13.80, 15.30, 16.80, 18.30, 19.80 ve 21.30 m derinliklerinde elde edilen SPT güvenlik faktörü değerleri 3,87 ile 2.73 arasında değişmekte olup, 1'den büyüktür. Bu durum inceleme alanında sıvılaşma riskinin yok olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere proje alanında farklı derinliklerdeki Kayma Dalgası  $V_s$  ile sıvılaşma güvenlik faktörü değerleri 2,40 ile 1,17 arasında değişmekte olup, 1'den büyüktür ve sıvılaşmanın olmadığını göstermektedir. Ayrıca, şekil 5.29'da  $a_{max}=0,05$  g için; sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizine bakılacak olursa, yapı/bina etkileşiminin sıvılaşma yönünden incelendiğinde görüldüğü üzere herhangi bir oturma problemi bulunmamaktadır. Burada ki kriter  $G_k > 1,4$  ise oturmanın 0 (sıfır) olduğu varsayılmaktadır.

Çizelge 5.4 ve şekil 5.31’de görüldüğü gibi  $a_{max}=0,10$  g proje alanı 2’de yapılan çalışmalar sonucunda kuyunun aynı derinliklerinde ( 1.80 ile 21.30 m ) elde edilen SPT güvenlik faktörü değerleri 1,94 ile 1,37 arasında değişmekte olup, 1’den büyüktür. Bu durumda inceleme alanında SPT ile sıvılaşma riskinin yok olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.5’de görüldüğü gibi proje alanında farklı derinliklerdeki kayma dalgası hızı  $V_s$  güvenlik faktörü değerleri 1,22 ile 0,59 arasında olup, ilk 3.50 m’de ki güvenlik faktörü 1,22 değerinde olduğundan, güvenlik faktörü değeri 1’den büyük olduğundan sıvılaşma olmadığını göstermektedir. Aynı yerdeki inceleme alanında 4.80 m’den itibaren 21.30 m ‘ye kadar  $V_s$  güvenlik faktörü değeri 0,93 ile 0,59 değerleri arasında değişip, 1’den küçüktür. Bu durumda inceleme alanında, sıvılaşma riskinin yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Yukarıda ki şekil 5.32 grafiğinde sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizine bakılacak olursa belirtilen derinliklerde ki SPT verileri doğrultusunda 9.3 m ‘den 15.3 m ‘ye kadar 0,72 cm ile 1,15 cm arasında değişmekte olup  $G_k > 1,4$  değerinden küçük olduğu için, toplamda 12,57 cm oturma problemiyle karşılaşıldığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.6 ve şekil 5.34’de ki grafiklerde görüldüğü gibi  $a_{max}=0,15$  g proje alanı 3’de yapılan çalışmalarda aynı derinliklerde elde edilen SPT güvenlik faktörü değerleri 1,29 ile 0,91 arasında değişmektedir. Bu durumda inceleme alanında ilk 8 m’ye kadar sıvılaşma riskinin olmadığını göstermektedir. Bu derinlikten sonra zeminin her metresinde sıvılaşma olma olasılığı vardır. Aynı inceleme alanında yapılan diğer bir çalışmada çizelge 5.7’de derinliklerden alınan kayma dalgası hızı  $V_s$  güvenlik faktörü değeri 0,81 ‘den başlayıp 0,39’a kadar olup,  $V_s$  güvenlik faktörü değeri 1’den küçüktür. Bu durumda inceleme alanında sıvılaşma riski yüksek seviyede olduğunu göstermektedir. Yukarıda ki şekil 5.35 grafiğinde  $a_{max}= 0,15$  g değeri grafiğinden yola çıkarak, bu kuyudaki SPT verileri doğrultusunda sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizine bakacak olursak  $G_k < 1,4$  değerinden küçük olduğu için ilk metrelerden 21.30 m’ye kadar ki derinliklerde oturmalar olup 0,39 cm ile 3,24 cm arasında toplamda 30,97 cm oturma problemiyle karşılaşılmaktadır.

Çizelge 5.8 ve şekil 5.37’de ki grafiklerde görüldüğü üzere  $a_{max}=0,20$  g proje alanı 4’de açılan sondaj kuyusundaki 1.80 m ile 21.30 m derinlikte elde edilen SPT güvenlik faktörü değeri 0,96 ile 0,68 değeri arasında olup, 1’den küçük olduğundan sıvılaşma riskinin var olduğu görülmektedir. Aynı proje alanında çizelge 5.9’da ki verilerinden 1.80 m ile 21.30 m arasında ki derinliklerde kayma dalgası  $V_s$  ile sıvılaşma analizini incelendiğinde güvenlik faktörü 0,61 ile 0,30 değerleri arasında değişerek,  $G_k < 1$  olduğundan dolayı sıvılaşma riskinin yüksek seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır. Yukarıdaki şekil 5.38 grafiğinde  $a_{max}=0,20$  g değeri için; grafikten yola çıktığından sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizine bakılacak olursa; 1.80 m’ den 21.30 m’ye kadar ki derinliklerde 1,07 cm ile 4,92 cm arasında değişen oturma değerlerini alıp toplamda 51,98 cm oturma oluşmaktadır. Bundan dolayı yapı/bina etkileşimi yönünden incelendiğinde zemin oturma probleminin iyi irdelenmesi analiz edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 5.10 ve şekil 5.40’da ki grafiklerde görüldüğü üzere  $a_{max}= 0,30$  g proje alanı 5’de açılan sondaj kuyusundaki 1.80 m ile 21.30 m derinliklerden elde edilen SPT ile sıvılaşma analizi güvenlik faktörü değeri 0,64 ile 0,45 arasında değişmekte olup,  $G_k < 1$ ’den küçüktür. Bu durumda inceleme alanında sıvılaşma riski yüksek seviyede olduğunu göstermektedir. Proje alanında çizelge 5.11’de ki gibi aynı derinlikte elde edilen kayma dalgası hızı  $V_s$  ile sıvılaşma analizi güvenlik faktörü değeri 0,40 ile 0,20 arasında değişmekte olup, 1’den küçük olduğundan sıvılaşma riskinin yüksek seviyede olduğunu göstermektedir. Yukarıda verilen şekil 5.41’de  $a_{max}=0,30$  g değeri için grafiği incelendiğinde, derinliğin 1.80 m’ den 21.30 m’ye kadar ki seviyelerde sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizi sonuçlarına bakılacak olursa 2,08 cm ile 4,92 cm değerleri arasında oturmalar görülmekte olup, toplamda 55,94 cm oturma ile karşılaşılmaktadır. Bu değer sonucunda yapı/bina etkileşimi için analiz edilecek olursa ciddi oranda oturma problemiyle karşı karşıyayız demektir. Bu kriter göz önünde bulundurularak, yapı tasarımı ve kurulumu yapılmalıdır.

Çizelge 5.12 ve şekil 5.43’de ki grafiklerde görüldüğü gibi  $a_{max}=0,40$  g değeri için proje alanı 6’da sondaj kuyusundaki farklı derinliklerde 1.80 m ile 21.30 m arasında

yapılan SPT ile sıvılaşma analizi güvenlik faktörü değerleri 0,48 ile 0,34 arasında değişmektedir. Bunun sonucunda güvenlik faktörü 1'den küçük olduğu için sıvılaşma riskinin yüksek seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır. Proje alanında ki veriler doğrultusunda çizelge 5.13'de kayma dalgası hızı  $V_s$  ile sıvılaşma analizi güvenlik faktörü değerleri 0,30 ile 0,14 sonuçları çıktığından,  $G_k < 1$ 'den olduğu için sıvılaşma riskinin ciddi anlamda yüksek olduğu görülmektedir. Aynı ivme değeri için yukarıdaki şekil 5.44 grafiğine bakıldığında, 1.80 m ile 21.30 m derinliklerle değişen sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizi sonuçlarına bakacak olursak 2,08 cm ile 4,92 cm değerleri arasında çıkmakta olup, toplamda 55,94 cm oturma problemi bulunmaktadır. Bunun dışında, sıvılaşma yapı/bina etkileşimi değeri 3 ile 20 arasında olması yapıların sıvılaşmayı tetikleme potansiyeli üzerinde olumsuz yönde etki ettiğini göstermektedir. Bundan dolayı, oturma değerlerinin bu ivme değerine göre ciddi anlamda yüksek olduğu ve yapılacak bina/yapı tasarımında zeminin bu tür özelliklerde olduğu ve ciddi problemlerle karşılaşacağını unutulmamalıdır.

Çizelge 5.14 ve şekil 5.46'da ki grafiklerde  $a_{max}=0,50$  g değeri için proje alanı 7'de sondaj kuyusundaki farklı derinliklerde 1.80 m ile 21.30 m arasında yapılan SPT ile sıvılaşma analizi güvenlik faktörü değerleri 0,38 ile 0,27 arasında değişmektedir. Bunun sonucunda güvenlik faktörü 1'den küçük olduğu için sıvılaşma riskinin yüksek seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır. Aynı proje alanında ki veriler doğrultusunda çizelge 5.15'de kayma dalgası hızı  $V_s$  ile sıvılaşma analizi güvenlik faktörü değerleri 0,24 ile 0,11 sonuçları çıktığından,  $G_k < 1$ 'den olduğu için sıvılaşma riskinin yüksek olduğu görülmektedir. Aynı ivme değeri için yukarıdaki şekil 5.47 grafiğine bakıldığında, 1.80 m ile 21.30 m derinliklerle değişen sıvılaşmaya bağlı zemin oturmalarının kestirilmesi analizi sonuçlarına bakacak olursak 2,08 cm ile 4,92 cm değerleri arasında çıkmakta olup, toplamda 55,94 cm oturma problemi bulunmaktadır. Bu denli ciddi oturma problemi olan zeminde gerekli mühendislik önlemleri alınmalı veya yapı/bina tasarımında bu sonuç değerleri göz önünde bulundurularak çalışmalar yapılmalıdır.

## 6. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında, zemindeki sıvılaşma potansiyeli zemin jeofizik analiz programı kullanılarak, teorik örnekler ile değerlendirilip yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1-) Bir deprem esnasında sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek amacıyla, kum-siltli kum gibi zeminler içeren tabakaların, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilebilen zemin ve sismik parametrelerin bir arada kullanıldığı birçok kriterler, deneysel formüller ve ampirik bağıntılar mevcuttur. Bütün bu kriterler bir arada değerlendirilerek sıvılaşma hesaplarının yapılması gereklidir.

2-) Sıvılaşmanın arazide bütün zemin tabakalarında oluşmadığı bilinmektedir. Bu nedenle sıvılaşma tehlikesi analizlerinde öncelikli olarak sıvılaşmanın meydana gelmesi için gerekli koşulların mevcut olup olmadığının incelenmesi gerekmektedir. Bu koşullar arasında en önemlilerinin deprem büyüklüğü ve merkezine uzaklık, zemin tabakasının genel durumu ve jeolojik yapısıdır. Herhangi bir mühendislik yapısının inşasından önce arazinin sismik geçmişine bakarak sıvılaşma tehlikesi açısından durumu ve bölgeye ait mikrobölgeleme çalışmaları sonucunda elde edilen haritalar da sıvılaşmayı belirleyen diğer önemli etkenlerdir.

3-) Depremler sırasında zemin tabakalarında sıvılaşma oluşması, yer hareketinin özellikleri ile zeminin rijitlik ve mukavemet özelliklerinde yol açtığı değişiklikler ve oluşan şekil değiştirmelerden dolayı, zemin üstündeki ve içindeki yapılarda, toprak dolgularda ve şevlerde bir çok olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu olumsuz etkilerin hesaplanması, bu tezde kullanılan program üzerinden SPT ve  $V_s$  değerlerine bağlı olarak sıvılaşma analizinde zemin oturmalarının kestirilmesi grafiklerinde açıkça ortaya koymaktadır. Analizde çıkan sonuçlara göre, ivme değeri 0.10 g üzerinde olması, yeraltı suyu seviyesinin yüzeye

yakın olması ve deprem büyüklüğü 7.5 üzerindeyse sıvılaşmaya bağlı olarak zeminlerde deformasyon ile zemin üzerinde veya altında ki yapılarda şekil değişiklikleri ve/veya hasarların ortaya çıkacağı varsayılmaktadır. Mühendislik yapıları açısından en önemli olumsuz etkilerin, zeminde mukavemet ve rijitlik kaybı ile aşırı şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler sonucu oluşan, temellerin taşıma gücü kaybı, aşırı toplam ve farklı oturmalar, yanal akmlar ve şev göçmeleri, zemin yapıları ve istinat yapılarında hasarlar, kazıklar üzerinde ek yüklemeler ve yanal destek azalması, gömülü yapılar üzerinde basınçlar ve kaldırma etkisi olduğu ifade edilebilir. Bu etkilerin bir çoğunun henüz tasarım için gerekli doğrulukta ve güvenilirlikte tanımlanabildiğini söylemek zordur.

4-) Zeminin çakıllı, killi ve anakaya gibi rijt birimlerden oluşan yerleşimlerde gözlemsel olarak sıvılaşmaya rastlanılmamakla beraber, zemin özelliklerinin kumlu, siltli, siltli kum, çakıllı kum, killi kum gibi jeolojik birimlerin olması ve yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu yerleşimlerde büyük oranda sıvılaşma oluşabilmektedir.

5-) Dobry ve diğ. (1981), önerdiği sıvılaşma potansiyeli uygulamasında, proje alanı için sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu hesaplanmıştır. Aynı yöntem aynı proje verileri, başka bir proje alanına uygulandığında sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu görülmüştür. Bu yöntemde sismik hızlar ( $V_s$ ) ve ivme ( $a_{max}$ ) azalım ilişkisinden sonuca gidilmiştir ve proje alanında ki gözlemsel verilerle analiz sonuçları verileri üst üste binmiştir.

6-) Dobry ve diğ. (1981)'nin önerdiği yöntemi ve gözlemselde sıvılaşma görülmediğini göz önünde bulundurarak, bu proje alanı için yapılmış olan çalışmalarda programdan yapılan hesaplama sonucunda SPT değeri 8'in altında ise sıvılaşma potansiyelinin, yüksek ihtimalli olduğunu söylenebilir.

7-) Iwasaki ve Tokido (1978)'nin önerdiği sıvılaşma potansiyeli emniyet faktörü uygulaması yapıldığında tüm proje alanlarında hesaplama sonucunda sıvılaşma

potansiyeli olduğu ortaya çıkmaktadır. Sıvılaşma endeksi kriterinde de sıvılaşma potansiyeli yüksek çıkmaktadır. Çünkü Iwasaki ve Tokido (1978)'nin önerdiği emniyet faktörü yönteminin sonucu giriş verisi olarak kullanılmakta ve sıvılaşma potansiyeli hesaplanmaktadır. Dolayısıyla bu yöntemde de Iwasaki ve Tokido (1978)'nin emniyet faktörü yöntemi gibi tutarsız bir sonuç çıkartmaktadır.

8-) Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yöntemi gibi Iwasaki ve diğ. (1986)'nin yöntemide SPT ve  $D_{50}$ ' yi kullanarak sıvılaşma analizi yaparak, sonuçta bu iki yöntemde tutarsız sonuçlar çıkmıştır. Bunun nedeni bizce sıvılaşmanın SPT ve  $D_{50}$ 'ye duyarlı olmamasından kaynaklanmaktadır. Sadece bu iki parametreye göre sıvılaşma hesabı yapıldığı takdirde bizi yanıltabilir.

9-) Dobry ve diğ.(1981), Seed ve Idriss (1981) yöntemlerinin daha sağlıklı çalıştığı görülmüştür. Çünkü deprem sırasında oluşan sıvılaşma parametreleri daha iyi örneklenmiştir. Çalışma yapılan bölgede meydana gelen depremlerde ve arazide belgelenen sıvılaşmaların söz konusu yöntemlerle de matematiksel olarak belirlenmesi, sismik davranışın sıvılaşma için ne denli önemli olduğunu ortaya koymuştur. Yerin sismik davranışının önemli olduğu bu çalışma sonucunda anlaşılmış olmaktadır.

10-) Sonuç olarak; sıvılaşmanın olabilmesi için zemin özelliğinin kumlu-siltli ve kum içeriğinin yüksek olan tabii zeminlerde ve yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyine max. 10 m. derinlikte olacak seviyelerde büyük oranda görülmektedir. Aynı şekilde, sıvılaşacak zeminin depremsel bölgenin yakın bölgelerinde olması ve en ufak sarsıntılarda dahi sıvılaşma olayının gerçekleşeceği gerçeği unutulmamalıdır. Deprem parametrelerinin etkisinin sıvılaşma için ne derece önemli bir etkiye sahip olduğu, yapılan analiz sonuçları ve ivme değerlerine göre farklılık kazandığı grafiklerden iyi bir şekilde anlaşılmaktadır. Bundan dolayı, hangi ivme değerinden sonra sıvılaşma oluyor? Sorusunu soracak olursak; yapılan analiz ve incelemeler sonucunda ivme değerinin 0,10 g olduğunda ve 4,80 m derinlikten sonra sıvılaşma olabilir veya sıvılaşma riski var diyebiliriz. Aynı şekilde, ivme değerinin (a,g) 0,10 üzerinde olduğu



andan itibaren sıvılaşma riskinin olduğu ve giderek güvenlik katsayısının 1'den küçük olup azaldığı bilinmektedir. Fakat, ivme değerinin 0,10 ve üzeri olduğu her zeminde sıvılaşma olacağından söz edemeyiz. Çünkü, sıvılaşmaya etki eden faktörlerin zeminde var olması ve yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyine yakın olması ile zemin içeriğinde kumlu-siltli ve kum oranının yüksek olması gerekmektedir.

11-) Sıvılaşmaya bağlı olarak zemin oturmalarının kestirilmesi analizleri sonucunda, ivme değerlerinin 0,10 g büyük olduğu andan itibaren oturma problemleriyle karşılaşıldığı gerçeği aşıkardır. Bundan dolayı, yapı/bina tasarımı etkileşimine bağlı olarak yapılan veya yapılacak sıvılaşma analizlerinin zeminin fiziksel özellikleri göz önünde bulundurulması gerektiğinden, sıvılaşmayı tetikleme potansiyeli üzerinde olumsuz yönde etki ettiğini göstermektedir. Bunun için, yapılacak yapı tasarımında ve kurulumunda zemin sıvılaşma potansiyeli ve oturma değerleri sonuçlarına göre gerekli mühendislik önlemleri alınarak tedbirler alınmalıdır. Buda unutulmamalıdır ki, ülkemiz depremsellik yönünden aktif fayların varlığı ile yaşamaktadır ve her an bununla karşılaşabileceğimizin farkında olmalıyız.

12-) Zemin sıvılaşması irdelemeleri yapılırken, bir geoteknik mühendisinin öncelikli olarak aşağıdaki sorulara yanıt araması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

- ✓ İncelenen zemin, herhangi bir deprem veya tekrarlı yükler altında, sıvılaşabilir nitelikte mi?
- ✓ Zemin sıvılaşabilir nitelikte ise, sıvılaşmanın meydana gelmesi olası mı?
- ✓ İncelenen zeminde sıvılaşma meydana gelmesi durumunda, üst yapıda bir hasar oluşturur mu?
- ✓ Oluşabilecek herhangi bir hasarı engellemek amacı ile nasıl bir önlem alınmalıdır?

Yukarıda belirtilen sorulara verilecek yanıtlarla, incelenen zemin için sıvılaşma potansiyeli irdelemesi tamamlanmış olur.

## 7. KAYNAKLAR

- Akın, K.M., Kramer, S.L. and Topal, T., 2011. Empirical Correlations of Shear Wave Velocity ( $V_s$ ) and Penetration Resistance (SPT-N) for Different Soils in an Earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Eng. Geol.*, 119,(1-2),1-17
- Alpaslan, N., 2013, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi Cilt 3, Sayı 2, Sayfa: 68-70 ve 79-84.
- Ambraseys, N.N., and Barazangi, M., 1989. The 1759 earthquake in the Bekaa Valley: Implications for earthquake hazard assessment in the eastern Mediterranean region. *Journal Geophysics Research*, 94: 4007-4013.
- Andrews, D. C. A. and Martin, G. R., 2000. Criteria for liquefaction of silty soils. 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand.
- Anonymous, 2006. Why does liquefaction occur? Explanation. On-line: <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why1.html>. Accessed at 08 August, 2006.
- Ansal, A. ve Ögünç G., (1981), “Dinamik Üç Eksenli Sıvılaşma Deneyleri ve Tekrar Sıvılaşma”, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, 8 (35) ,61-82.
- Ansal, A., (1998), “The Effect of Local Soil Conditions in Earthquake Characteristics”, *Proc. Int. Sem. on Natural Disaster Reduction for Roads in Mediterranean Countries*.
- Castro, G., 1969. Liquefaction of sands, Harvard Soil Mechanics Series, No.87 Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Castro, G., (1975), “Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands”, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101 (6), 551-569.
- Castro, G. and Poulos, S.J., 1977. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103 (6): 501-516.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2000, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Beta Yayınevi, İstanbul.
- Chang, N.Y., Yeh, S.T., and Kaufman, L.P., 1982. Liquefaction potential of clean and silty sands. *Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, USA*, 2: 1017-1032.

- Coates, D.R., 1990. Geomorphic controls of groundwater hydrology in: Groundwater Geomorphology, The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Process and Landforms. Edited by Charles G. Higgins. Geological Society of America, New York, Special Paper 252, 341-349.
- Dezfulian, H., 1982. Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils. Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, 63-70.
- Dobry, R., Powell, D.J., Yokel, F.Y. and Ladd, R.S., 1981A. Geotechnical Aspect. Liquefaction Potential of Saturated Sand – The Stiffness Method. Proceeding of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering Istanbul, Turkey.
- Dobry, R., Stoke, K.H., Land, R.S. and Youd, T.L., 1981B. Liquefaction for S wave, Preprint 81-544, ASCE National Convention, St Lois, Missouri.
- Erinç, S., 2000. Jeomorfoloji I. DER Yayınları, İstanbul.
- Ferritto, J.M., 1997. Seismic design criteria for soil liquefaction. Technical Report TR-2077-SHR. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, 58p.
- Finn, W.D.L., Ledbetter, R.H. and Wu, G. 1994. Liquefaction in silty soils: Design and Analysis, Ground Failures under Seismic Conditions, Geotech. Spec. Publ., 44, p. 51-76, ASCE, New York.
- Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. and Masaaki, E., (1988), “Cyclic Undrained Shear Properties of High Quality Undisturbed Tokyo Gravel”, J. Soils and Foundations, (28) 4, 57-68.
- Hazen, A., 1920. Hydraulic fill of dams. ASCE Transactions, 83: 1713-1745.
- Ishihara, K., and Koseki, J., 1989. Discussion on the cyclic shear strength of finescontaining sands. Earthquakes Geotechnical Engineering, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janiero, Brazil, 101-106.
- Iwasaki, T. and Tokida, K.-I. 1978. Studies on Soil Liquefaction Observed During the Miyagi-Ken Oki Earthquake of June 12, 1978. Proceeding of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering Istanbul, Turkey Geotechnical Aspect.
- Iwasaki, T. 1986. Soil Liquefaction studies in Japan. Soil Dynamics and Earthquake Engineering vol:5 no:1 January 1986.

- Jennings, P.C., 1980. Earthquake engineering and hazards reduction in China. CSCPRC Report No. 8, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1980.
- Kayen, R.E., Mitchel, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S. and Cotinho, R., 1992, Evaluation of SPT- CPT and Shear wave based method for liquefaction potential assesmentusing Loma Prieta data, Proceedings, 4th US - Japon Workshop on Earthquake Resistant design of lifeline facilities and countermeasures for Soil Liquefaction, Vol.1, pp177-204.
- Kramer, S.L. and Seed, B.H., 1988. Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(4).
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New York.
- Kuerbis, R., Negussey, D., and Vaid, V. P., 1988. Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand. *Proceedings. Hydraulic Fill Structures*, Fort Collins, USA, 330-345.
- Lade, P. V. and Yamamuro, J. A.1998. Remedial Measures Against Soil Liquefaction from Investigation and Design to Implement, Edited by Japanese Geotechnical Society A.A. Balkemal/Roterdem/Brookfeild.
- Lade, P. V. and Yamamuro, J. A.1999. Physics and Mechanics of Soil Liquefaction Pceeding of the International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction/Baltimore/Maryland/USA.
- Law, K.T. and Ling, Y.H., 1992. Liquefaction of granular soils with non-cohesive and cohesive fines. *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam, 1491-1496.
- Lyberis, N., Yurur, T., Chorowicz, J., Kasapoğlu, K.E. and Marsuson, W.F., Hynes, M.E., and Franklin, A.G., 1990. Evaluation and use of residual strength in seismic safety analysis of embankments. *Earthquake Spectra*, EERI, 6(3): 529-572.
- Marsuson, W.F., Hynes, M.E., and Franklin, A.G., 1990. Evaluation and use of residual strength in seismic safety analysis of embankments. *Earthquake Spectra*, EERI, 6(3): 529-572.
- Mc Kenzie, D.P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of Royal Astronomy Society* 30: 109-185.

- Mc Kenzie, D.P., 1978. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt : The Aegean sea and surrounding regions (tectonics of Aegean region). *Geophysical Journal of Royal Astronomy Society*, 55: 217-254.
- Obermeier, S. F. 1996, Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. *Engineering Geology*, 44, 1-76.
- Özaydın, K., 2007, Zeminlerde Sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.
- Özçep, F., Aşçı, M., Karabulut, S., Alpaslan, N. and Yas, T., 2004, Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi, *Uygulamalı Yerbilimleri*, Cilt:3, Sayı:2, Sayfa: 11-22.
- Özçep, F., 2009, Zeminlerin Geoteknik ve Jeofizik Analizi (İnşaatların Tasarımı Sürecinde), Nobel Yayın, 609 Sayfa, ISBN No: 978-605-395-177-3, Ankara.
- Özçep, F., 2010, Soil Engineering: a Microsofts Excel® Spreadsheet© Program for Geotechnical and Geophysical Analysis of Soils, *Computers & Geosciences*, Volume 36, Issue 10, October 2010, Pages 1355-1361.
- Polito, C.P., 1999. The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. Ph.D. Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 274 p.
- Poulos, S. J., 1981. The steady state of deformation, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107(GT5), p. 553-562.
- Prakash, S. and Gupta, M.K., 1967. Compaction of sand under vertical and horizontal vibrations. *Proc. First Southeast Asian Regional Conference on Soil Engineering, Bangkok*, 201-210.
- Seed H.B., Çetin K.Ö., Moss R.E.S., Kammerer A.M., WU J., Pestana J.M., Riemer M.F., Sancio R.B, Bray J.D., Kayen R.E., and Faris A., 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, California.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M., 1969. Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(9):1249-1273.
- Seed, H.B. and Peacock, W.H., 1971. Test procedure for measuring soil liquefaction characteristics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(SM8): 1099-1119.

- Seed, H.B., 1976. Some aspects of sand liquefaction under cyclic loading. Conference on Behavior of Off-Shore Structures, The Norwegian Institute of Technology, Norway.
- Seed, H.B. 1976, Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes. ASCE National Convention on Liquefaction Problems in Engineering, P.A., pp. 27-52.
- Seed, H.B. 1979. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Ground During Earthquakes, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT' February 1979, pp. 201-255.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. 1981. Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri, October 26-31, pp. 81-544.
- Seed, H. B., Idriss, I.M., 1982, Ground Motion and Soil Liquefaction during Earthquakes, Monograph Series, Earthquake Engineering Reserch Institute, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H.B., Idriss, I.M, and Arango, I., 1983, "Evaluation of liquefaction potential using filed performance data", Journal of Geotechnical&Geoenvironmental Engineering, ASCE, 109(3):458-482.
- Siyahi, B., Erdik, M., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M.B. ve Akman, H., 2003. Sıvılaşma ve şev stabilitesi hassaslığı ve potansiyeli haritaları: İstanbul örneği Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul, 10 p.
- Strahler, A.N, 1974. Physical Geography. 4<sup>th</sup> Edition. John Willey and Sons Inc., New York, London, Sydney, Toronto.
- Stokoe, K.H., Roeset, J.M., Bierschwalle, J.G. and Aouad, M., 1988, Liquefaction potential of sands from shear wave velocity, Proceedings, 9<sup>nd</sup> World Conference on Earthquake, Vol.13 pp213-218.
- Şekercioğlu, E., 1998. Yapıların Projelendirmesinde Mühendislik Jeolojisi.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in: Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation, Edited by K.T. Biddle and N. Christie-Blick, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 37: 227-264.

- Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tokida, K., Yasuda, S., Hirome, M., Imal, T., and Kon-no, M., 1980. Standard penetration tests and soil liquefaction potential evaluation. *Soils and Foundations, JSSMFE*, 20(4): 95-111.
- Teri, L. ve Tezcan, S. S.. 1996. İzmir Konak Meydanı Sıvılaşma Kriterinin Değerlendirmesi. T.C. Boğaziçi Üniversitesi Yapı Teknolojisi Uygulama ve Araştırma Merkezi.
- Terzaghi, K., 1925. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Vienna, Deuticke.
- Tezcan, S.S. and Özdemir, Z., 2004. *Liquefaction Risk Analysis*, Higher Education Research Foundation, İstanbul.
- Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y. 1983. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT-N value and fines content: *Soil Mechanics and Foundations*, 23-4, 56-74.
- Tokimatsu, K., and Uchida, A., 1990. Correlation between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity, *Soils And Foundations*, 30, 2, 33-42.
- Tokimatsu, K., Kuwayama, S. and Tamura, S., 1991, Liquefaction Potential evaluation based on Rayleigh wave investigation and its comparison with field behaviour, *Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advanced Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol.1, pp357-364.
- Tronco, J.H., and Verdugo, R., 1985. Silt content and dynamic behavior of tailing sands. *Proceedings. Twelfth International Conference on Soil Mech. And Found. Eng.*, San Francisco, USA, 1311-1314.
- Ulusay, R., 2001. *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 38, p. 385.
- Ulusay, R. 2000. *Yerin Sıvılaşması ve Türkiye'deki Sıvılaşma Olgusuyla İlgili Değerlendirmeler*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- Uyanık, O., (2002): "Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi", DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi), s.190, İzmir (yayınlanmamıştır).
- Ündül, Ö. ve Gürpınar, O., 2003. Çokal Vadisindeki (Gelibolu) alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyeli. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 16(1): 67-80.

- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K.T., 1994. *Siting in Earthquake Zones*, Balkema, Rotterdam, 115 p. 433-446.
- Wong, T., Seed, H.B. and Chan, C., 1974. Liquefaction of gravelly soils under cyclic loading conditions. University of California, Earthquake Engineering Research Center, EERC Report No. 74-11, Berkeley, CA.
- Youd, T.L. and Hoose, S.N., 1977. Liquefaction susceptibility and geologic setting, Proc. 6th World Conf. On Earthquake Engng., New Delhi, 37-42.
- Youd, T.L. and Perkins, D.M., 1978. Mapping liquefaction –induced ground failure potential. American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104(GT4): 433-446.
- Youd, T. L. 1984. Geological effects-liquefaction and associated ground failure. Geological and Hydrogeological Hazards Training Program, United States Geological Survey Open-File Report 87-76, 210-232.
- Youd, T.L., vd., 1985, “The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983-liquefaction” *Earthquake Spectra*, Vol.2 (1): 71-89.
- Youd, T.L., 1992. Liquefaction, ground failure, and consequent damage during the 22 April 1991 Costa Rica Earthquake. Proceedings of the NSF/UCR US.Costa Rica Workshop on the Costa Rica Earthquakes of 1990-1991, April 2 – 4, 1992, Effects on Soils and Structures, Oakland, California, ERI Publication, No: 93-A, 73-75.
- Youd, T.L. and Idriss, I.M., 1997, Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Proceedings of the NCEER Workshop, Technical Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, K.H., 2001. Liquefaction resistance of soils – Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(4), 297-313.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Zeval AYTAŞ  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Diyarbakır – 26.06.1985  
**Telefon** : 0544 549 73 14  
**Faks** : ---  
**e-mail** : [z.aytas\\_21@hotmail.com](mailto:z.aytas_21@hotmail.com)

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Diyarbakır Atatürk Lisesi – Bağlar/Diyarbakır	2003
Üniversite	: Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi - Niğde	2011
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü - Batman	2019
Doktora	: ---	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016-....	Acacia Maden İşletmeleri A.Ş.	Maden Jeoloğu/Saha Jeoloğu
2015-2016	Andritz Hyrdo Ltd. Şti.	İş Güvenliği Şefi
2013-2015	Güney Yıldızı Petrol Üretim Sondaj Müth. San. Ve Tic. A.Ş.	İş Güvenliği Müh.

### UZMANLIK ALANI

İş Güvenliği Uzmanı, Jeoloji Mühendisi,

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

IOSH ve OSHA 30hours, B Sınıfı İSG Uzmanı, CorelDRAW, AutoCAD, İlk Yardımcı, CBS Uzmanı, Bilgisayar Operatörlüğü, MS Office Programları, MicroMine, Datamine,

### YAYINLAR