T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAYDARPAŞA PROJE ALANININ SİSMİK SAHA TEPKİSİ VE ZEMİN SIVILAŞMA ANALİZLERİ

Fırat AYKAT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4
3. MATERYAL ve YÖNTEM 16
3.1. Materyal 16
3.1.1. Sismik veriler 17
3.1.2. Sondaj kuyuları 18
3.1.3. Laboratuvar deneyleri 19
3.2. Yöntem 21
3.2.1. Depremler 21
3.2.1.1.Sismik dalgalar 22
3.2.2. Deprem kaynaklı zemin problemleri 23
3.2.3. Sıvılaşma 24
3.2.3.1. Zeminlerde sıvılaşma olayının detayları 25
3.2.3.2. Sıvılaşma mekanizması 26
3.2.4. Sıvılaşma türleri 27
3.2.4.1. Akma türü sıvılaşma 27
3.2.4.2. Sınırlı sıvılaşma 27
3.2.4.3. Düz yüzeyli zemin sıvılaşması 28
3.2.4.4. Devirsel hareketlilik (Mobilite) 28
3.2.5. Zemin özelliklerine bağlı faktörler 28
3.2.5.1. Zeminin türü 28
3.2.5.2. Zeminin rölatif sıkılığı (Dr) 30
3.2.5.3. Kritik boşluk oranı 31
3.2.5.4. Zeminin tane şekli 32
3.2.5.5. Tane boyu dağılımı 32
3.2.5.6. Yeraltı su seviyesi 33
3.2.5.7. Drenaj şartları 34
3.2.5.8. Depremin süresi ve büyüklüğü 34
3.2.5.9. Zeminde sıvılaşan tabakanın derinliği ve konumu 34
3.2.5.10. Çevre basınçları 35
3.2.5.11. Bina yükleri 35
3.2.5.12. Sismik geçmiş 35
3.2.5.13. Jeolojik yaş ve çimentolanma 35
3.2.6. Sıvılaşmanın sebep olduğu etkiler 36
3.2.6.1. Yanal yayılmalar 36
3.2.6.2. Akma göçmesi 39
3.2.6.3. Kum kaynaması 40
3.2.6.4. Taşıma gücü kayıpları 42
3.2.6.5. Zemine gömülü olan hafif yapıların yükselmesi 45
3.2.6.6. İstinat yapısı yenilmesi 47
3.2.6.7. Zemin oturması 50
3.2.7. Zemin iyileştirme yöntemleri 53
3.2.8. Sıvılaşma analizinde kullanılan laboratuvar deneyleri 53
3.2.8.1. Dinamik üç eksenli deney 54
3.2.8.2. Dinamik burulmalı kesme deneyi 55
3.2.8.3. Devirsel basit kesme kutusu deneyi 55
3.2.8.4. Sarsma tablası deneyi 55

3.2.8.5. Geniş ölçekli basit kesme deneyi 56
3.2.9. Sıvılaşma analizinde kullanılan arazi testleri 56
3.2.9.1. SPT 57
3.2.9.2. SPT' nin yapılışı 57
3.2.9.3. SPT-N_{arazi} değerinin düzeltilmesi ve düzeltme faktörleri 58
3.2.10. SPT ile sıvılaşma analizi 60
3.2.10.1. Tekrarlı gerilme oranı (CSR) 62
3.2.10.2. Tekrarlı mukavemet oranı (CRR) 63
3.2.11. DEEPSOIL programı 65
3.2.11.1. Analizin tanımlanması 66
3.2.11.2. Zemin profilinin tanımlanması 67
3.2.11.3. Girdi hareketlerinin seçilmesi 69
3.2.11.4. Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme 70
3.2.11.5. Analiz kontrol parametreleri 71
3.2.11.6. Analiz sonuçları 73
3.2.12. NOVOLIQ zemin sıvılaşma programı 73
3.2.12.1. Zemin özelliklerinin girilmesi 74
3.2.12.2. Test çeşidinin seçilmesi ve verilerinin girilmesi 75
3.2.12.3. Deprem sismik verilerinin girilmesi 76
3.2.12.4. Analiz yönteminin seçilmesi 77
3.2.12.5. Analiz ayarlarının seçilmesi 78
3.2.12.6. Analizin başlatılması 78
3.2.12.7. Analiz sonuçlarının grafiklerinin oluşturulması 79
3.2.12.8. Analiz sonuçlarının tablo olarak gösterimi 80
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 81
4.1. İnceleme Alanında Açılan Sondaj Kuyuları 81
4.2. Standart Penetrasyon Testlerinin (SPT) Sonuçları 82
4.3. Zeminlerin Fiziksel Özellikleri 83
4.4. DEEPSOIL Programı ile Sismik Saha Analizi 84
4.4.1. Sismik saha analiz sonuçları 86
4.5. Seed ve Idriss'e (1971) Göre Sıvılaşma Analizi 87
4.5.1. SPT-N_{arazi} değerinin düzeltilmesi ve sıvılaşma analizi için gerekli parametrelerin elde edilmesi 87
4.5.2. Teorik sıvılaşma analizi sonuçları 90
4.6. NOVOLIQ Programı ile Zemin Sıvılaşma Analizi 92
4.6.1. NOVOLIQ programı analiz sonuçları 96
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 111
5.1. Sonuçlar 111
5.2. Öneriler 112
KAYNAKÇA 113
ÖZGEÇMİŞ 121
EKLER 122
EK 1 122
EK 2 128
EK 3 129
EK 4 132

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAYDARPAŞA PROJE ALANININ SİSMİK SAHA TEPKİSİ VE ZEMİN SIVILAŞMA ANALİZLERİ

Fırat AYKAT

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Arda Burak EKMEN
2.Danışman: Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN
Yıl: 2022, Sayfa: 132

Meydana gelen depremler sonucunda sıvılaşma etkisiyle oluşan hasarlar, sıvılaşma analizlerinin önemini gün geçtikçe arttırmış olup teknolojinin ilerleyişine paralel olarak bilgisayar destekli simülasyonlar popülerleşmiştir. Bu tez çalışmasında, gerçek deprem senaryoları kullanılarak bilgisayar programları aracılığı ile Haydarpaşa Limanı Proje alanı (İstanbul) için sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Haydarpaşa Limanı ve çevresinin sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için Deepsoil programı ile sismik saha analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1 ve Mw=7.6 büyüklüklerindeki deprem kayıtları (sırasıyla Bolu-Düzce-1, Çankırı-Orta, İzmir-Seferihisar, Bolu-Düzce-2 ve İzmit-Gölcük) kullanılmış olup nonlineer yöntem seçilerek her deprem için PGA değerleri elde edilmiştir. Sıvılaşma analizleri için standart penetrasyon testi bazlı sadeleştirilmiş teorik yöntem ve Novoliq bilgisayar programı kullanılmıştır. Gerçek deprem senaryolarının sıvılaşma analizlerine dahil edilmesiyle gerçek duruma yakın bir biçimde analizler yürütülmüştür. Kullanılan sıvılaşma analizi programında 9 farklı yönteme göre her bir deprem büyüklüğü için sıvılaşma analizi ayrı ayrı yapılmıştır. Sadeleştirilmiş teorik yöntemle birlikte inceleme alanı için toplamda 10 farklı yönteme göre sıvılaşma analizi tamamlanmış olup elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. İlgili alanda belirtilen büyüklüklerdeki depremler için bütün derinliklerde sıvılaşma riskinin söz konusu olduğu sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Sıvılaşma Analizi, Sismik Saha Analizi, Deprem, Sıvılaşma Potansiyeli, Haydarpaşa Limanı

ABSTRACT

MSc Thesis

SEISMIC SITE RESPONSE AND SOIL LIQUAFACTION ANALYSES OF THE HAYDARPAŞA PROJECT AREA

Fırat AYKAT

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Arda Burak EKMEN
Co-Supervisor: Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN
Year: 2022, Page: 132

The importance of liquefaction analyses has increased day by day due to the damage caused by liquefaction with the effect of earthquakes, and computer-aided analyses have become popular with the advancement of technology. In this thesis, the liquefaction potential for the Haydarpaşa Port Project (İstanbul) area was analyzed with computer software using real earthquake scenarios. Seismic field analysis was carried out with the Deepsoil software to determine the liquefaction potential of Haydarpaşa Port and its surroundings. In the analysis carried out, records of the earthquakes that have a magnitude of; Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1 and Mw=7.6 (Bolu-Düzce-1, Çankırı-Orta, İzmir-Seferihisar, Bolu-Düzce-2 and İzmit-Gölcük, respectively) were used and PGA values have been obtained for each earthquake by using a nonlinear method. Standard penetration test-based simplified theoretical method and Novoliq computer software were employed for liquefaction analyses. Analyses were carried out realistically by incorporating real earthquake scenarios into the liquefaction analyses. In the liquefaction analysis software, liquefaction analyses were carried out separately for each earthquake magnitude according to 9 different methods. Along with the simplified theoretical method, liquefaction analyses were carried out according to a total of 10 different methods in the study area, and the results obtained were compared with each other. It has been deduced that in the related area there is a liquefaction risk at all depths for the earthquakes of the stated magnitudes.

KEY WORDS: Liquefaction Analysis, Seismic Site Analysis, Earthquake, Liquefaction Potential, Haydarpasa Port

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim sürecinde desteklerini esirgemeyen ve her yönleriyle örnek aldığım kıymetli tez danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Arda Burak EKMEN (Harran Üniversitesi) ve Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN'a (Harran Üniversitesi), değerli hocam Arş. Gör. Egemen KAYA'ya (Harran Üniversitesi), beni tecrübeleriyle yönlendiren, her türlü konuda destek aldığım amcam Öğr. Gör. Şükrü AYKAT'a (Mardin Artuklu Üniversitesi), bugünlere gelmemi sağlayan, her türlü teknik bilgi ve tecrübesini aktaran Edebiyat Öğretmeni Abdurrahim ÇELİK'e (Midyat Fen Lisesi), Haydarpaşa Garı için zemin verilerine ulaşmamı sağlayan Harita Mühendisi Fatih DELEN'e (İstanbul Büyükşehir Belediyesi), bu verileri kullanmama izin ve imkân sağlayan İstanbul Zemin Sondaj Müh. İnş. San. İç ve Dış Tic. Ltd. Şti. şirketine ve son olarak okumanın en büyük erdem olduğunu, sürekli iyiliği, adaleti, liyakatı telkin eden, bugünlere gelmemde maddi manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. İnceleme alanı haritası 16
Şekil 3.2. İnceleme alanının yer aldığı ada yerleşim planı 17
Şekil 3.3. Çalışma esnasında kullanılan sismik cihazı 17
Şekil 3.4. Zemin etüdünün yapıldığı lokasyonlar 18
Şekil 3.5. Sondaj kuyularının yerleşimi 19
Şekil 3.6. Zemin sondaj korelasyon kesiti 20
Şekil 3.7. Zemin sondaj korelasyon kesiti 20
Şekil 3.8. Deprem dalgalarının zemin yüzeyindeki etkileri 22
Şekil 3.9. a: P Dalgası hareketi; b: S Dalgası hareketi; c: Rayleigh dalgası hareketi; d: Love dalgası hareketi 23
Şekil 3.10. Yanal yayılma sırasında boru hatlarında oluşan hasarlar 25
Şekil 3.11. Makaslama dalgaları arasında kalan zeminin sıkışması 26
Şekil 3.12. (a) Zemin danelerinin statik durumu; (b) Efektif gerilme ile boşluk suyu basıncı ilişkisi 27
Şekil 3.13. Rölatif sıkılığın sıvılaşma üzerindeki etkisi 31
Şekil 3.14. Tane boyuna göre sıvılaşma potansiyeli 33
Şekil 3.15. Yanal yayılma durumu 37
Şekil 3.16. 1995 Kobe depremi sonrasında yanal yayılmanın rıhtım duvarına verdiği zarar 37
Şekil 3.17. Lower Van Norman Barajı'nda yanal yayılma sonucu oluşan hasarlar 38
Şekil 3.18. 1998 Ceyhan depremi sonrası yanal yayılma durumu 38
Şekil 3.19. Yollarda yanal yayılma sonucu oluşan hasarlar 39
Şekil 3.20. Akma türü kayma oluşum şekli 39
Şekil 3.21. Akma göçmesi 40
Şekil 3.22. The Lower San Fernando Barajında (1971) oluşan akma yenilmesi 40
Şekil 3.23. Sims ve Garvin'in kum kaynaması modeli 41
Şekil 3.24. Loma Prieta depreminde oluşan kum konisi 42
Şekil 3.25. Loma Prieta depreminde oluşan kum volkanı 42
Şekil 3.26. Taşıma kayıpları sonrasında ortaya çıkan durum 43
Şekil 3.27. Niigata depreminde sıvılaşmadan dolayı yapılarda ortaya çıkan yan yatmalar 43
Şekil 3.28. 1999 İzmit Körfezi depreminde yan yatmış yapı 44
Şekil 3.29. 1999 Adapazarı depreminde taşıma gücü kaybından dolayı devrilen bina 44
Şekil 3.30. Kocaeli'de taşıma gücü kaybından hasar görmüş silolar 45
Şekil 3.31. Gömülü yapıların sıvılaşma sonrası yüzeylenmesi durumu 46
Şekil 3.32. Muayene bacasının zeminden yükselmesi durumu 46
Şekil 3.33. Niigata Chuetsu depremi (2004) sonucu muayene bacasında oluşan hasar 47
Şekil 3.34. İstinat yapısının yenilme durumu 48
Şekil 3.35. 1995 Kobe depremi sonucu istinat duvarında meydana gelen hasar 48
Şekil 3.36. 1995 Kobe depremi sonucu istinat duvarında meydana gelen hasar 49
Şekil 3.37. 2003 Tokachi-oki depreminde istinat duvarında oluşan hasar 49
Şekil 3.38. Avusturya'da meydana gelmiş bir istinat yapısının yenilmesi 50
Şekil 3.39. Sıvılaşan kumlu zeminde kamyonun gömülmesi 51
Şekil 3.40. Kocaeli depreminde (1999) Adapazarı'nda oluşan farklı oturmalar 51
Şekil 3.41. Adapazarı'nda tasıma gücü kaybından dolayı oluşan göçme durumu 52
Şekil 3.42. Van Depremi'nde (2011) meydana gelen zemin oturması 52
Şekil 3.43. Standart penetrasyon testinin yapılışı 58
Şekil 3.44. Derinlik azaltma faktörü 63
Şekil 3.45. $N_{1,60}$ değerinden CRR elde etme 64
Şekil 3.46. DEEPSOIL (2020) programı giriş ekranı 66
Şekil 3.47. Analiz tanımlanma ekranı 67
Şekil 3.48. Zemin profili tanımlama ekranı 68
Şekil 3.49. Ana kaya tipi ve özellikleri ekranı 68
Şekil 3.50. Zemin profili özet grafikler 69
Şekil 3.51. Deprem girdi hareketi seçimi 70

Şekil 3.52. Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme ekranı 70
Şekil 3.53. Analiz kontrol parametreleri 72
Şekil 3.54. Analizin başlatılması 72
Şekil 3.55. Analizin sonrasında çizilen özet profiller 73
Şekil 3.56. Zemin özelliklerinin programa girilmesi 75
Şekil 3.57. Deney çeşidi, SPT sayısı girişi ve düzeltme faktörlerinin seçilmesi 76
Şekil 3.58. Sismik özelliklerin programa girilmesi 77
Şekil 3.59. Analiz yönteminin seçilmesi 77
Şekil 3.60. Analiz ayarlarının seçilmesi 78
Şekil 3.61. Analizin başlatılması 79
Şekil 3.62. Analiz sonuçlarının grafiksel gösterimi 79
Şekil 3.63. Analiz sonuçlarının tablo olarak gösterimi 80
Şekil 4.1. Sismik serim ve sondaj kuyularının yerlerinin vaziyet planında gösterimi 82
Şekil 4.2. a) Düzce (Bolu) Depremi, Mw=5.5, b) Orta (Çankırı) Depremi, Mw=6.0, c) Ege Denizi, 17.26 km Seferihisar (İzmir) Depremi, Mw=6.6, d)Düzce (Bolu) Depremi, Mw=7.1, e)Gölcük (İzmit) Depremi, Mw=7.6 depremleri için DEEPSOIL (2020)'den elde edilen PGA grafiği 87
Şekil 4.3. Teorik analiz sonucu elde edilen $N_{1,60}$ ve derinlik azaltma faktörlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri 91
Şekil 4.4. Teorik analiz sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları 92
Şekil 4.5. NOVOLIQ (2020) programına girilen zemin özellikleri 93
Şekil 4.6. Deney çeşidi ve düzeltme faktörlerinin seçilmesi 94
Şekil 4.7. Sismik verilerinin girilmesi 95
Şekil 4.8. Analiz yönteminin seçilmesi 95
Şekil 4.9. Analiz ayarlarının seçilmesi 96
Şekil 4.10. NOVOLIQ (2020) programı ile elde edilen $N_{1,60}$ ve derinlik azaltma faktörlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri 100
Şekil 4.11. Mw=5.5 için güvenlik katsayıları 101
Şekil 4.12. Mw=6.0 için güvenlik katsayıları 103
Şekil 4.13. Mw=6.6 için güvenlik katsayıları 105
Şekil 4.14. Mw=7.1 için güvenlik katsayıları 107
Şekil 4.15. Mw=7.6 için güvenlik katsayıları 109

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Sondajlara ait koordinat-derinlik bilgileri 18
Çizelge 3.2. Kil içeren kumların sıvılaşma koşulları..... 29
Çizelge 3.3. Sondaj çap düzenleme katsayıları 59
Çizelge 3.4. Sıvılaşma ile SPT ilişkisi 61
Çizelge 4.1. Sondajlara ait koordinat ve derinlik bilgileri..... 82
Çizelge 4.2. SPT derinlikleri ve vuruş sayıları..... 83
Çizelge 4.3. Laboratuvardan elde edilen zeminin deney sonuçları 83
Çizelge 4.4. DEEPSOIL (2020) ile gerçek deprem verilerinden elde edilen PGA-Derinlik değerleri 86
Çizelge 4.5. Seed ve Idriss'e (1971) göre SPT-N_{arazi} değerinin düzeltilmesi 89
Çizelge 4.6. Seed ve Idriss'e (1971) göre teorik sıvılaşma analizi..... 90
Çizelge 4.7. NOVOLIQ (2020) programı analiz sonuçları 97
Çizelge 4.8. NOVOLIQ (2020) programı ve teorik analizde elde edilen CSR ve CRR katsayıları 98
Çizelge 4.9. NOVOLIQ (2020) programı ve teorik analizde elde edilen güvenlik katsayıları 99
Çizelge Ek 1. DEEPSOIL (2020) programında kullanılan zemin parametreleri..... 128

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a_{max}	Maksimum Yer İvmesi
BÖF	Büyüklük Ölçek Faktörü
C_B	Sondaj Çapı Düzeltme Faktörü
C_C	Tokmak Yastığı Düzeltme Faktörü
C_N	Örtü Basıncı Düzeltme Faktörü
C_R	Tij Uzunluğu Düzeltme Faktörü
C_S	Kılıf Düzeltme Faktörü
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CPT	Koni Penetrasyon Deneyi
CRR	Tekrarlı Mukavemet Oranı
CSR	Tekrarlı Gerilme Oranı
D_{10}	Zeminin Toplam %10'unun Geçebildiği Tane Çapı
D_{50}	Zeminin Toplam %50'sinin Geçebildiği Tane Çapı
Dr	Rölatif Sıkılık
e	Boşluk Oranı
e_o	Başlangıç Boşluk Oranı
e_{cr}	Kritik Boşluk Oranı
E_m	Şahmerdan Etkinliği
e_{max}	Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	Minimum Boşluk Oranı
g	Yerçekimi İvmesi
G_s	Güvenlik Katsayısı
İDO	İnce Dane Oranı
LI	Likitlik İndisi
LL	Likit Limit
M_L	Deprem Yerel Büyüklüğü
M_W	Deprem Moment Büyüklüğü
$N_{1,60}$	Düzeltilmiş SPT Sayısı
N_{60}	Teorik Olarak Düzeltilmiş SPT Sayısı
N_{arazi}	Arazide Ölçülen Vuruş Sayısı
P_a	Yaklaşık Atmosfer Basıncı
PI	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
r_d	Derinlik Azaltma Faktörü
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
SPT-N	SPT Darbe Sayısı
SPT-N_{arazi}	SPT Darbe Sayısı
u	Boşluk Suyu Basıncı
V_p	P Dalgası Hızı
V_s	S Dalgası Hızı
W_n	Doğal Su İçeriği
YAS	Yeraltı Suyu Seviyesi
σ'	Efektif Gerilme
σ	Toplam Gerilme
σ_{vo}	Toplam Düşey Gerilme
σ_{v0}'	Toplam Efektif Düşey Gerilme
τ_{eq}	Tekrarlı Kayma Gerilmesi
τ_h	Tekrarlı Kayma Gerilmesi
τ_{tek}	Deprem Kaynaklı Uniform Tekrarlı Kayma Gerilmesi
γ_d	Doygun Birim Hacim Ağırlık
γk	Kuru Birim Hacim Ağırlık
γ_n	Doğal Birim Hacim Ağırlık

1. GİRİŞ

Depremler, yaşamımızı etkileyen doğal afetlerin arasında en başta gelmektedir. Yer kabuğunun içerisinde oluşan kırılmalar (faylar) ile volkanik aktivitelerden dolayı sismik titreşimler ortaya çıkmaktadır. Aniden meydana gelen bu titreşimler sismik dalgalar şeklinde yayılarak yer yüzeyini sarsar ve depremleri meydana getirir. Sismik dalgalar zemin tabakası içerisinden geçerken zeminde düzensiz kayma gerilmelerine neden olmaktadır. Bu durum yerel zemin koşullarına göre zemin tabakalarında yumuşamaya ve zeminde dayanım kaybına sebep olabilmektedir (Ansal, 1999). Depremlerden sonra sıvılaşma, faylanma, heyelan, çığ düşmeleri vb. doğa olayları meydana gelebilmekte ve yapılarda ciddi hasarlar oluşabilmektedir. Zemin sıvılaşması konusu çeşitli depremlerde bu sorunla karşılaşıldıkça daha da önem kazanmıştır. Zemin koşullarının problemli olduğu yerlerde, uygun tasarım yapılmamış yapıların, deprem anında ağır maddi ve manevi kayıplara yol açabileceği her zaman ihtimal dahilindedir. Meydana gelen depremlerde binaların temellerinde görülen aşırı oturmaların ve dönmelerin birçok hastane, köprü, okul, gökdelen vb. yapıya ciddi hasarlar verdiği bazılarının ise yıkılmasına neden olduğu görülmüştür. Sıvılaşmaya müsait zeminlerin fiziksel özellikleri, yer altı suyu seviyesi ve depremin yer ivmesine bağlı olarak ortaya çıkan zemin davranışları, zeminlerin içindeki ve üzerindeki yapılara ve yapı elemanlarına ciddi hasarlar verebilmektedir.

Deprem esnasında açığa çıkan enerji, su ya da ses dalgalarına benzer şekilde hareket etmektedir. Bu enerji sismik dalgalar ismi verilen dalgalar aracılığıyla yayılmaktadır. Deprem sırasında zeminlerde oluşan sismik dalgalar, zeminin cinsine göre farklı hızlarda yayılabilir ve zeminlerin üzerinde farklı etkiler bırakabilir. Mw (Moment büyüklüğü) 5'ten büyük olan depremler incelendiğinde, sıvılaşma olayı genellikle gevşek ve suya doygun olan; kumlu, siltli aynı zamanda ince çakıllı zeminler üzerinde gerçekleşmektedir (Hakan, 2019).

Zemin sıvılaşması, genellikle yer altı suyunun (YAS) yüksek olduğu deniz, göl ve dere kenarının yakınlardaki zeminlerde ortaya çıkar. Sıvılaşmadan dolayı zemin

taşıyıcılığını tamamen veya kısmen kaybedebilmektedir. Sıvılaşma esnasında boşluk suyu basıncı artmakta ve bu yüzden efektif gerilme azalmaktadır. Boşluk suyu basıncı arttığı zaman zemin danelerindeki sürtünme kuvveti ortadan kalkarak viskoz bir davranış ortaya çıkmaktadır (Öztürk, 2016). Depremler sismik dalgalar şeklinde yayıldığından geçtiği zemin veya kaya ortamını etkilemektedir. Özellikle sismik dalgaların; zemin tabakalarının içinden yayılımı esnasında meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleriyle zeminlerin sertliğinde, sıkılığında ve dayanımında azalmalar olabilmektedir (Çıklaiblikçi, 2019). Sismik nedenlerle oluşan sıvılaşmanın hasarı göz önüne alınınca kritik yapıların (barajlar, pistler, metrolar, demir yoları vb.) tasarımı büyük bir titizlik istemektedir.

Sıvılaşma esnasında kum yüzeye doğru yükselir, zeminin dayanımı azalır, dayanımın azalmasından dolayı zeminler yapı yüklerini taşıyamaz; bundan dolayı yapılarda devrilme, çökme, yana yatma ve oturma gibi ciddi hasarlar oluşabilir. Yapılarda gözlenen hasarların aksine yüzeye yakın yerlerin altındaki elemanlar (boru, kanalizasyon, su depoları vb.) yüzeye doğru yükselmeye çalışır. Zemin sıvılaşması köprü, yol, bina, baraj, su şebekeleri vb. yapılar üzerinde yıkıcı bir etkiye yol açabilmektedir. Sıvılaşma riskinin tahmin edilmesi ile gerekli önlemler alınarak sıvılaşmadan dolayı oluşacak hasarların minimum düzeye çekilmesi günümüzde mümkündür. Kohezyonsuz zeminlerde genellikle SPT, CPT ve kayma dalga hızı (Vs) kullanılarak sıvılaşma potansiyeli belirlenmektedir. SPT, zeminin direncini yansıtan aynı zamanda yaygın bir şekilde kullanılan arazi deneyidir.

Sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak için zeminlerde iyileştirme işlemi yapılabilir.

Bu tez çalışmasında Mersin ve İzmir Limanlarının ardından üçüncü büyük liman olma özelliği taşıyan Haydarpaşa Limanı'nın proje alanı incelenmiştir. Haydarpaşa Limanı ve çevresinin sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için sismik saha analizi yapılmıştır. Sismik saha analizinde DEEPSOIL (2020) programıyla analiz yapılarak PGA değerleri elde edilmiştir. İlgili alanın sıvılaşma analizleri için standart

penetrasyon testi bazlı sadeleştirilmiş teorik yöntem (Seed ve Idriss, 1971) ve NOVOLIQ (2020) bilgisayar programı kullanılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Seed (1966), doygun ve gevşek olan kum katmanlarının zemin gerilme koşulları ve deprem anındaki durumları göz önünde bulundurarak sıvılaşma olayını tanımlamak maksadıyla kum numuneleri üzerinde laboratuvar ortamında üç eksenli basınç deneyini yapmıştır. Elde ettiği sonuçlardan yola çıkarak doygun olan kum zeminlerde sıvılaşma ihtimaline yol açan 3 etkene ulaşmıştır. Bunlar: Çevresel basınç, boşluk oranı (e) ve şekil değiştirme büyüklüğüdür. Boşluk oranının çok olması ve çevresel basıncın az olması ile sıvılaşmanın daha kolay bir şekilde gerçekleşeceği ilgili çalışmada belirtilmiş olup, şekil değiştirme ne kadar çok olursa sıvılaşma olayını başlatacak olan çevrimin de o kadar az olacağı sonucuna varılmıştır.

Seed ve Lee (1966), sıvılaşma olayını tanımlamak amacıyla doygun ve gevşek zemin katmanları için bir deney düzeneği geliştirmişlerdir. Bu geliştirdikleri yöntem ile tekrarlı yükleme altındaki zemin numunesinin hangi yükte sıvılaşacağı belirlenebilmektedir.

Yoshimi (1967), çalışmasında 30.5 santimetre yüksekliğindeki kum tabakasının sıvılaşmasını araştırmıştır. Bu tabaka üzerine lastik membran bırakılarak numuneye düşey gerilme uygulanmıştır. Titreşim sırasında, boşluk suyu basıncında ilk olarak yavaş bir artış onun hemen ardındansa ani bir artışla sıvılaşma fark edilmiştir. Çalışma sonucunda doygun kumun tümüyle sıvılaşmasının ardından daha sıkı ve stabil bir kum elde edildiği belirtilmiş olup Terzaghi'nin 1 boyutlu konsolidasyon teorisiyle belirtilen durumun ilişkilendirilebileceği açıklanmıştır.

Seed ve Idriss (1971), zemin katmanlarında deprem etkisi ile ortaya çıkan kayma gerilmesinin hesaplanmasının gerekli olduğunu önermişlerdir. Ayrıca zemin katmanlarının sıvılaşma potansiyeli için yapılan değerlendirmede kullanılan kayma gerilmesinin oranının, hangi oranda azaltılarak kullanılması gerektiğini açıklamışlardır. Bu önerdikleri yöntemde periyodik gerilmeler için uygulanan üç eksenli deneyler ile kesme deneylerinden yapılan gözlemlerde zemin olarak sismik

aktivitenin çok yüksek olduğu, doygun ve gevsek kumlu zeminler kullanılmıştır. Niigata ile Alaska'da meydana gelmiş olan büyük depremler, SPT-N değerlerine bağlı ampirik kurallardan oluşan sıvılaşma direncinin değerlendirilmesini sağlayan basitleştirilmiş bir yolun gelişmesini sağlamıştır.

Dowrick (1975), zeminlerde sıvılaşma potansiyeli durumunu incelemiştir. Yer ivmesinin artmasıyla sıvılaşma potansiyelinin arttığı sonucuna varmıştır.

Wang (1979), Çin'de meydana gelen (Tangshan ve Haicheng) depremlerde ortaya çıkan zemin yenilmelerinin oluşturduğu ince taneli çökellerin istifleri üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda, ince taneleri içeren zeminlerin meydana getirdiği sıvılaşma için (şartlarını içeren) Çin Ölçütü geliştirmiştir.

Ishihara (1980), tamamen aynı olan kum örnekleri ile yaptığı burulmalı kesme deneylerde gereğinden fazla uygulanan yüklemenin etkisini araştırmış, aşırı konsolidasyon oranının artışıyla sıvılaşma durumuna karşı dirençlerin arttığını belirtmiştir.

Ansal ve Öğünç (1981), yaptıkları çalışmada geçmişte meydana gelen depremlerde sıvılaşmaya maruz kalan zeminlerin, yeni depremlerden sonra tekrar sıvılaşma gösterme durumunun olup olmadığı araştırmıştır. Yapılan arazi gözlemleri ve laboratuvar çalışmalarıyla tekrardan sıvılaşma geçirme ihtimalinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Dobry ve ark. (1981), sıvılaşma olayının başlayabilmesi (kayma dalga hızını (V_s) kullanarak) için sıvılaşma potansiyelini veren eşik ivme (gerekli başlangıç ivmesi) değeri kriterini belirlemişlerdir.

Tokimatsu ve Yoshimi (1983), SPT-N darbe sayısı ile ince tane oranına bağlı sıvılaşma bağıntısını vermişlerdir. Çalışmalarında, SPT-N sayısı aynı olan içeriğinde %10'dan daha fazla ince malzeme bulunan kumun, temiz kumlara kıyasla sıvılaşmaya karşı daha fazla dirence sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca aynı SPT-N

darbe sayısına sahip olan çakıllı kumların, daha temiz kumlara göre sıvılaşmaya karşı dirençlerinin daha az olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmada yer alan araştırmacılar sıvılaşmanın meydana gelmiş olduğu suya doygun kumların üzerinde yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçları kullanarak sıvılaşmaya sebep olan sismik yer hareketinin etkilerini öne sürmüşlerdir.

Poulos ve ark. (1985), çok büyük ve ani yüklemelere maruz kalan zeminlerdeki hava ve suyun boşluklardan çıkışının zorlanma etkisiyle sıvılaşma durumunu ortaya çıkarabileceğini belirtmişlerdir. Gevşek ile kuru kumların hareketi ise akıcı kum veya akıcı zemin olarak ele alınmıştır.

Seed ve ark. (1985), birçok yöntem ve standarda göre uygulanan SPT yapılırken tijlerin ucuna aktarılan enerjinin, birçok farklı ülkede değişik ekipmanların kullanılmasından dolayı farklılıklar oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Bundan dolayı teorik serbest düşme enerji oranını %60'a göre düzelten SPT darbe sayısının standardını önermişlerdir. Çalışmalarında birçok farklı ülkede çeşitli prosedürlerle yapılan SPT'ye dair enerji oranlarını değerlendirmişler ve enerji oranını düzeltmek için düzeltme denklemi sunmuşlardır. Ayrıca, saha gözlemlerinden yola çıkarak, SPT-N değerinin kullanılmasıyla sıvılaşmanın neden olacağı muhtemel yapısal hasarların arasında bir ilişki geliştirmişlerdir. Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için ihtiyaç olan minimum CSR değerini SPT-N değerlerinden yola çıkarak grafiksel olarak sunmuşlardır.

Liao ve Whitman (1986), SPT deneyleri ile elde ettiği sonuçlardan yola çıkarak düzenlemeler yapmış ve bu düzenlemelerden yola çıkarak elde ettikleri C_N gerilme düzeltmesi ile ilgili olarak bir bağıntı önermişlerdir.

Kayen ve ark. (1992), kayma dalga hızı için (V_s) sismik penetrasyon testi kullanarak ölçümler yapmış ve düzenlemeyi efektif düşey gerilmeyi baz alarak değerlendirmişlerdir. Geliştirilen bu ilişkinin verileri Loma Prieta depreminin (Magnetüdü 7 olan) verileridir. Bu deprem esnasında değişik bölgelerde yapılan

çalışmalardan elde edilen numunelerin incelik içerikleri %15-57 arasında elde edilmiştir.

Wang ve Law (1994), yeraltı suyu derinliğinin sıvılaşmaya olan etkilerini araştırmış ve bu derinliğin 5 metreden daha az olduğu yerlerde sıvılaşma riskinin oluştuğunu belirtmişlerdir.

Andrus ve Stokoe (2000), kayma dalga hızını (V_s) kullanarak sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için yaklaşımda bulunmuştur. Bu yaklaşımda sıvılaşma potansiyelinin hesaplandığı aşamaları 10 adımda açıklamışlardır.

Bargu ve ark. (2000), Bursa-Gürsu çalışma alanında 25 lokasyonda yapılan sondaj ile 10 lokasyonda açılan muayene çukuru yardımıyla bahsi geçen alanda mevcut tabaka özellikleri için derinlikle değişen ve yanal doğrultuda oluşan değişimleri araştırmışlardır. Sismik kırılma yöntemi ile özdirenç (Rezistivite) yöntemlerini kullanmışlardır. İnceleme alanının sıvılaşma analizi için Japonya Karayolları Şartnamesi kullanılmıştır. İnceleme alanının genelinde sıvılaşma riskinin olduğuna ulaşılmıştır.

Youd ve ark. (2001), SPT-N değerine bağlı sıvılaşma analizi için devirsel direnç oranını elde etme konusunda ortak çalışmalarının sonucunda bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Ulamış (2002), çalışma alanında yapılan sondajların verileriyle Seed ve De Alba (1986) ile Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yöntemlerini kullanarak sıvılaşma analizi yapmıştır. Sismik verilerle de Andrus ve Stokoe (1997) yöntemine göre sıvılaşma potansiyelini elde etmiştir. Tüm bu verilerden yola çıkarak çalışma alanının mikro bölgelendirme haritasını çıkarmıştır.

Uyanık (2002), çalışmasında suya doygun-gevşek zeminlerin sıvılaşma için gösterdikleri direncin incelenmesi için V_s ölçümlerine dayalı bir yöntem öne sürmüştür. İlgili yöntemde, V_s ölçümleri ile depremin hakim periyodu beraber

kullanılarak sıvılaştırmayı meydana getiren devirsel gerilme oranını elde etmiştir. Bu elde edilen oran ile daha önce araştırma yapanların elde ettiği oran arasında iyi bir uyumun çıktığına ulaşmıştır.

Üçöz (2002), deprem esnasındaki sıvılaşmayı ve sıvılaşmanın hasarlarını incelemiştir. Yaptığı çalışmada Seed ve Idriss'in (1971) yönteminin daha sağlıklı sonuçlar verdiğine ulaşmıştır. Deprem esnasında meydana gelen sıvılaşma parametrelerini örneklemiş ve ivmenin ile sismik dalgası hızının (S dalga hızı) önemli parametreler olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Ateş (2003), zeminlerde meydana gelen sıvılaşma olayını etkileyen faktörleri ve sıvılaşma analiz metotlarını detaylı bir şekilde inceleyip sunmuştur.

Ündül ve Gürpınar (2003), Gelibolu-Çokal Vadisindeki alüvyon zeminleri inceleyerek sıvılaşma potansiyeli durumunu değerlendirmişlerdir. Araştırma amacıyla açılmış olan sondaj kuyularından elde ettikleri verileri kullanarak zeminin sıvılaşma potansiyelini hesaplamışlardır. Çalışmalarında sıvılaşma programı olarak LIQUEFYPRO analiz programını kullanmışlardır.

Çavuş (2004), çalışmasında dünya genelinde zemin sıvılaşmasının olduğu yerlere ait arazi SPT değerlerini kullanarak yaptığı korelasyonlar ile sıvılaşmayı etkileyen parametreleri kullanarak bulanık mantık modelleme yöntemini kullanmıştır. Elde ettiği sonuçları arazi verileri ile kıyaslamış ve modellemenin uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Çetin ve Unutmaz (2004), zeminlerin sismik davranışları ile zemin sıvılaşması konusunu hakkında çalışmışlardır. Bu çalışmalarında belirlenen zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin var olup olmadığı ve var olan yükler altında sıvılaşmanın meydana gelip gelmeyeceği hakkında değerlendirmeler yapmışlardır.

Erken ve ark. (2004), dünya genelinde meydana gelen büyük depremlerin sonucunda ortaya çıkan hasarlardan dolayı zeminlerin hareketli yükler altında

sergileyeceği davranışların bilinmesinin gerekliliğini dile getirmişlerdir. Depremler esnasında meydana gelen zemin sıvılaşması ve zemin taşıma gücü kayıpları konularını ele almışlardır. Çalışmalarında, öncelikle kum, kil ve siltli zeminlerin meydana gelen deprem yüklerinin etkisinde nasıl bir davranış sergileyeceklerini araştırmışlardır. Düşük plastisiteli silt ve kumların sıvılaşma analizinin ne şekilde yapıldığını göstermişlerdir. Hareketli yüklerin plastik silt ile kil zeminler üzerinde taşıma kapasitelerinin ne şekilde değiştiği ilgili çalışmada açıklanmıştır.

Şen (2004), çalışmasında Denizli'de incelediği zeminler üzerinde deneyler yaparak bu zeminlerin tane boyunun nasıl dağıldığını ve kıvam limitlerini belirlemiş daha sonra bu zeminleri sınıflandırmıştır. Ardından SPT test verilerinden ve CBS'den (coğrafi bilgi sistemi) yararlanarak sıvılaşma potansiyeli için indeks değerlerini hesaplamış sonrasında bu değerlerden yola çıkarak eş sıvılaşma eğrilerine ulaşmıştır.

Yavuzer (2004), çalışmasında Yalova için 204 SPT testi verisi kullanarak sıvılaşma analizi yapmıştır.

Atak ve ark. (2005), çalıştıkları bölgenin Kocaeli depreminden önceki ve sonraki haline ait hava fotoğrafları kullanılarak Sakarya ilinin şehir merkezi, İzmit Körfezinin güney kıyıları ve Sapanca Gölünün çevresinde zeminin sıvılaşması ve faylanmadan dolayı meydana gelen zemin kaymalarını (yer değişimi) saptamışlardır. Ayrıyeten değişik günlerde çekilmiş hava fotoğraflarından yararlanarak yapılmış olan denk araştırmalarda da Denizli-Babadağ ve İstanbul-Avcılar'da, zeminde meydana gelmiş olan yer değiştirmelerin büyüklüğü ile bu kaymaların yönlerini belirlemişler ve yeterince ölçüm yapılması durumunda hassas sonuçlara ulaşılabileceğini bildirmişlerdir.

Idriss ve Boulanger (2006), çalışmalarında siltlerde ortaya çıkan sıvılaşma durumu ile kumlarda gözlenen sıvılaşma durumunu karşılaştırmışlardır. Siltlerde sıvılaşma olayının kumlardaki kadar kolay gerçekleşmediğini ve siltlerde Mw'in 7'den az olduğu durumlarda sıvılaşmanın hiç ortaya çıkmayabileceğini dile getirmişlerdir.

Karanlık (2006), Standart Penetrasyon Testi (SPT) aracılığıyla çalışma alanının sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. SPT ile derinlik değerleri arasındaki bağıntıyı veren abaklarla değerlendirme yapmıştır. Çalışma alanındaki zeminin önemli bir oranda sıvılaşma riski taşıdığını ortaya çıkmıştır. Yapılan zemin etütleri ışığında, inceleme alanı ve çevresi için herhangi bir yapılaşmaya izin verilmeden önce zemin iyileştirmesi (sıkıştırma gibi) yapılması ya da yapı yüklerinin daha alt katmanlardaki (sıvılaşma riski olmayan) zeminlerin üzerine aktarılmasının gerektiğini belirtmiştir.

Koçkar (2006), Ankara'da sismik tehlikenin değerlendirmesi üzerine çalışmıştır. Çalışma alanındaki zeminlerin tipik özelliklerini bularak sınıflandırmış ve sıvılaşma analizini gerçekleştirmiştir. SPT-N ve V_s hızlarıyla ilgili bağıntı elde etmiştir.

Mollamahmutoğlu ve Babuçcu (2006), sıvılaşma olayının tanımını ve sıvılaşmanın tarihsel gelişimini araştırmış olup sıvılaşma çeşitlerini, sıvılaşma sonucu ortaya çıkan hasarları ve sıvılaşmanın zararlarından korunmak için yapılması gerekenleri ele almışlardır. Depremlerden dolayı oluşan sıvılaşma kavramını önceki araştırmacıların yöntemlerini tek tek açıklayarak değerlendirmişlerdir.

Şaylan (2006), çalışmasında Erzincan ve çevresi için Vs verileri yardımıyla zemin sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. Çalışmasında Erzincan ve çevresi için Vs verilerinin haritalarını hazırlanmış, bu inceleme alanının tabaka kalınlıklarını hesaplamış, poisson oranı haritasını çizmiş ve sıvılaşma potansiyelini tespit etmek için araştırmalar yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar doğrultusunda çalışma yapılan alanda yüksek oranda sıvılaşma riskinin olduğunu açıklamıştır.

Şişman (2006), 1. derece deprem bölgesinde bulunan Fethiye için deprem senaryosu kullanarak zeminin sıvılaşma potansiyelini incelemiştir. Söz konusu yerde daha önceden yapılmış olan sondajlardan hazırlanan raporların verilerini kaynak alıp SPT-N sayılarını dikkate alarak Seed ve Idriss'in (1971) yöntemini kullanmıştır. Ayrıca kayma dalga hızı (V_s) verileri ile Andrus ve Stokoe'un (1997,2000) yöntemini kullanılarak sıvılaşma potansiyeli için risk analizleri gerçekleştirmiştir. Meydana gelebilecek herhangi bir deprem için sıvılaşma potansiyeli haritalarını çıkarmıştır.

Çalışma alanındaki alüvyonda yüzeye yakın yerlerde sıvılaşma riski olduğu sonucuna ulaşmış ve bu riskin ortadan kalkması için öneriler sunmuştur.

Tonaroğlu (2006), çalışmasında zeminlerde sıvılaşmaya neden olan etkenler ile bu etkenlerin mekanizmalarını açıklamak maksadıyla sayısal analizler yapmıştır. Çalışmasında LASS III programını kullanarak araştırmalar yapmıştır. Sıvılaşma olayına etkisi olduğu bilinen faktörlerden olan değişken değerleri ve arazi davranışının analizlerini araştırmıştır.

Koç (2007), çalışma alanı olan Gölcük ile çevresinin sıvılaşma analizini yapmıştır. Seed ve Idriss'in (1971) geliştirdiği standart sıvılaşma yöntemini kullanıp çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Sıvılaşma analizi için, standart sıvılaşma analizi esaslarına göre çalışan LIQUEFYPRO bilgisayar programı kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizlerinin sonucunda veriler ArcGIS ortamına aktarılıp, Gölcük ve çevresi için sıvılaşma potansiyeli haritası düzenlenmiştir.

Özener (2007), uniform ve katmanlı kumlarda sıvılaşmanın temel mekanizmasını açıklamak maksadıyla laboratuvarda geliştirdiği deney düzeneği sayesinde sarsma tablasıyla model deneyini yapmıştır. Deneyler çeşitli sarsıntı şiddetlerinde gerçekleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı değerinin, deprem büyüklüğü ve zeminin rölatif sıkılık değerinden büyük derecede etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Taylan ve ark. (2007), Adapazarı 1999 depremi sonrasında çevredeki yapıların birçoğunda gözlenen aşırı miktarda oturma, göçme vb. yapı hasarlarına yol açan depremin vaka analizini gerçekleştirmişlerdir. Adapazarı depreminin odak noktasına uzaklığı yaklaşık olarak 35 kilometredir. Bu mesafedeki konutların var olan koşullarda deprem yükü etkisi altında hareketli durumları araştırılmıştır. İnceleme alanında daha önce yapılan sondaj ve testlerden zemin özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak, depremden sonra hesaplanan değerler ile karşılaştırılarak zemine ait taşıma gücü ile sıvılaşma potansiyeli problemleri sunulmuştur.

Olgun ve Martin (2008), zemin iyileştirilmesi yapılan bir inceleme alanının Kocaeli depreminin öncesinde ve sonrasındaki durumlarını ele alarak bir vaka analizini yapmışlardır. Deprem sonrası yapılan araştırmada jet grout uygulamasının yapıldığı kısımların tahribat ve çökmelerde aktif bir mukavemet gösterdiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda jet grout kolonlarının, zeminde oluşan deprem kaynaklı kesme gerilmelerini azalttığını ve zeminlerin oturma direncini arttırdığını belirlemişlerdir.

Yalçın ve ark. (2008), çalışma alanı olan Aksaray şehir merkezinde Standart Penetrasyon Testi verileri ile Aksaray'ın sıvılaşma potansiyeli için analiz yapmış ve ilaveten sıvılaşma şiddeti haritalarını çıkarmışlardır.

Özçep ve Zarif (2009), çalışmalarında Yalova için yapılan toplam 216 adet sondaj verisi üzerinden elden edilen SPT verilerini kullanarak Seed ve Idriss'in (1971) yöntemine göre toplamda üç adet deprem için (6.5, 7.0 ve 7.5 büyüklüğünde) farklı yatay yer ivmesi değerlerini kullanarak sıvılaşma analizi yapmışlardır.

Orhan ve Ateş (2011), Manisa için yaptıkları çalışmada alüvyonlu zeminlerin sıvılaşma durumunda ortaya çıkan zemin taşıma gücü kayıplarını araştırmışlardır. Yakınlardan geçen bir fayın inceleme alanını etkileyebileceğini varsayarak işlem yapmışlar ve sıvılaşma risk haritasını hazırlamışlardır.

Tosun ve ark. (2011), Eskişehir şehir merkezi için SPT değerlerinden hareketle sıvılaşma potansiyelini tespit etmiştir. Eskişehir için elde ettikleri verilerden yola çıkarak sıvılaşma potansiyeli haritası hazırlamışlardır.

Dixit ve ark. (2012), SPT testine bağlı basitleştirilmiş bir yöntemi tercih ederek, Mumbai'nin sıvılaşma parametrelerini tespit etmiştir. Parametrelerden sonra sıvılaşma grafikleri hazırlamıştır. Gerçekleştirilen analizler nihayetinde orta çıkan grafik incelendiğinde inceleme alanının içerisinde çoğu yerde sıvılaşmanın olduğu gözlenmiştir.

Duman (2013), Erzincan ve çevresi için SPT-N verilerini kullanarak sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. Çalışma alanında yerin sismik özelliklerinden dolayı sıvılaşma potansiyelinin yükseleceği sonucuna ulaşmıştır. Toplamda 3 farklı sıvılaşma potansiyeli analizi yaparak değerlendirme yapmıştır. Sıvılaşma potansiyeli analizi için MATLAB programı kullanılmıştır. Farklı deprem büyüklüklerinin meydana gelmesi durumunda oluşabilecek sıvılaşma potansiyeli haritalarını çizmiştir.

Nas (2013), Trabzon'da bir çalışma alanında zemin etüdü verileri ile önceki çalışmalarda kullanılan verilerden faydalanarak dolgu olan zeminler için sıvılaşma potansiyellerini elde edilmiştir. Çalışma alanındaki zeminlerin mühendislik özelliklerine göre analizler yaparak, bu zeminlerin sıvılaşma durumları irdelenmiştir. SPT verileri ile çalışma alanındaki sismik parametrelerden yola çıkarak çeşitli metotlar ile gerçekleştirilen analizler sonucunda söz konusu dolguların sıvılaşma potansiyeli elde edilmiştir. Çalışma alanında sıvılaşma meydana gelebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Ayad ve ark. (2014), Sıvılaşma üzerinde etkili olan parametreleri SPT-N, $N_{1,60}$, a_{maks} (zemin yüzeyindeki pik ivme) ile M_w (deprem büyüklüğü) olarak ifade etmişlerdir.

Castellaro ve ark. (2015), çalışmalarında, korelasyon teknikleri yardımıyla yüzey dalgalarını kullanarak, zeminin sıvılaşma olasılığını elde etmeyi amaçlamışlardır. Mw=6 ile Mw=6.1 büyüklüğüne sahip depremlerin bin iki yüz kilometrekare sahada sıvılaşma durumunu ele almak için Koni Penetrasyon Deneyi ve Vs'yi kullanarak araştırmalar yapmışlardır. Vs yetersiz kaldığından dolayı Vs'ye göre analiz yapılamamış ancak CPT'ye göre yapılan analiz başarıyla tamamlanmıştır.

Doğan (2015), çalışmasında üç sınır ile çevrili bir inceleme alanın içerisinde kalan bölgelerdeki ilişkilerden faydalanarak pik ivme değerlerinin tahmin edilmesiyle sıvılaşma potansiyelini analiz etmiştir. Sıvılaşmanın meydana gelme biçimi, mekanizması, meydana gelmesine sebep olan faktörler ve sıvılaşma sonrasında ortaya çıkan deformasyon türleri üzerine detaylı incelemeler yapmıştır. İnceleme alanında

sıvılaşma riski olan katmanlar ile meydana gelebilecek deformasyonlar sayısal olarak sunulmuştur.

Huang ve ark. (2015), zemin sıvılaşması olayının önüne geçebilmek için taş kolon yöntemi ile zemin üzerinde sıvılaşma etkilerini araştırmışlardır. Zeminde oluşabilecek deformasyonlarını azaltmak için taş kolon uygulamasının kullanılabilirliğini bir takım deneyler yapılarak sunmuşlardır. Deneylerinde sismik bir etki kullanarak model deneyler yapılmıştır. Zemin iyileştirilmesi sayesinde boşluk suyu basıncının azaltıldığının, katman sertliğinin arttırıldığının böylece zeminlerdeki oturmaların engellediğinin sonucuna varmışlardır.

Monkul ve ark. (2015), çalışmalarında zeminin sismik yüklemeler altındaki durumuna göre sıvılaşma mekanizmasını tespit etmeyi amaçlamışlardır. Doygun ile kuru numuneler üzerinde tekrarlı basit kesme tepkileri için incelemeler yapmışlardır. Araştırmacılar, sıvılaşmanın sadece doygun zeminlerde olmadığını ortaya çıkarmış olup siltli ve temiz kumların sıvılaşma etkilerinin kuru numuneler aracılığıyla da bulunabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Muduli ve Das (2015), yapay zekâ tekniği ile SPT verilerinden yola çıkarak yerin devirsel direnç oranını elde etmek için ampirik bir model geliştirmişlerdir.

Fei-hong (2016), Çin‘de yer alan Tianjin şehri liman bölgesinde yaptığı çalışmada zeminin taneli yapısını ve sıkıştırılmasını dikkate alarak detaylı analizler yapmıştır. Çalışma alanındaki 26 araştırma çukurundan ve 105 eleme testinden yararlanarak SPT yöntemine göre analiz yapmış ve SPSS yazılımı yardımıyla derinlik ile sıvılaşma indeksi arasındaki ilişkiyi bulmaya çalışmıştır.

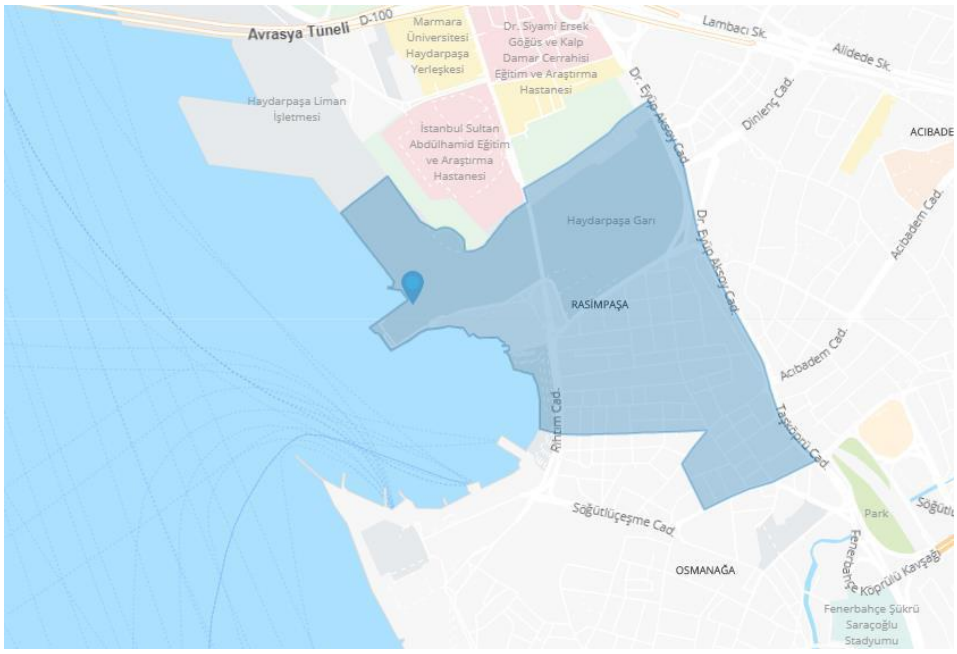
Özenç (2019), çalışmasında sıvılaşma etkisiyle yapılarda oluşan oturma ve dönme davranışının değişik zeminlerdeki etkisini malzeme parametreleri açısından incelemiştir. Analizleri PLAXIS 2D programı yardımıyla yapmıştır.

Arslan (2020), yerleşim yerlerinin ihtiyaçları karşılamamasından dolayı sağlam zemin özellikleri göstermeyen zeminlerin üzerinde yapı inşa edilmesinin bazı durumlarda mecburi hal aldığını belirtmiştir. Çalışmasında mevcut yerel zemin koşullarında yapılması zorunlu 2 katı bodrum olmak üzere toplamda 6 katlı bir yapıyı ele almıştır. Planlanan yapının zemininde sıvılaşma potansiyeli olmasından dolayı jet grout kolonları kullanılarak zeminde iyileştirme yapıldığı belirtilmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir program kullanılarak sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal modelde yapı temelinin altına uygulanmış olan jet grout kolonlarıyla zemin iyileştirmesi yapılmış böylece kazı sırasında oluşan kabarma ve deprem esnasında olması beklenilen oturmalarda %20 civarında azalmanın olduğu görülmüştür.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılan zemin parametreleri Haydarpaşa Tren Garı'nın bir bölümü için yapılan sondaj çalışmasından alınmıştır. Sondajın ağız kotundan itibaren 2.80 metre ile 3.40 metre arasındaki seviyede yapay dolgu, 13.80 metre ile 16.50 metre seviyelerine kadar alüvyon, devamında kuyu sonuna kadar da Trakya Formasyonu'na ait grovak-şeyl bulunmaktadır. İnceleme alanında 6 adet zemin sondajı çalışması yapılmıştır. Sondaj verileri güvenli tarafta kalacak biçimde Çizelge 4.2.'de sunulan şekliyle dikkate alınmıştır. Sondajlardan elde edilen numunelerin üzerinde sahanın fiziksel-mekanik özelliklerini belirlemek için zemin-kaya numunelerine dayanım testleri yapılmıştır. İstanbul ili, Kadıköy ilçesi, Rasim Paşa Mahallesi'nde bulunan Pafta=54 Ada=240 Parsel=16'da yer alan temelin tabanının oturum alanı toplamda 1.643,057 m^2'dir. Şekil 3.1. ve 3.2.'de inceleme alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İnceleme alanı haritası (Zemin Etüt Raporu, 2019)



Şekil 3.2. İnceleme alanının yer aldığı ada yerleşim planı (Zemin Etüt Raporu, 2019)

3.1.1. Sismik veriler

Çalışma alanında 4 profilde Sismik Kırılma / MASW yönteminde 12 kanallı cihaz kullanılarak test yapılmıştır. Şekil 3.3.'te test cihazı gösterilmiştir. Sismik Kırılma / MASW ölçümleri çalışma alanındaki arazide uygun hatlar boyunca planlanan lokasyonlar üzerinde yapılmıştır. Şekil 3.4.'te lokasyonlar görülmektedir.



Şekil 3.3. Çalışma esnasında kullanılan sismik cihazı (Zemin Etüt Raporu, 2019)



Şekil 3.4. Zemin etüdünün yapıldığı lokasyonlar (Zemin Etüt Raporu, 2019)

3.1.2. Sondaj kuyuları

İnceleme alanında zemin profilinin takibi için 1 adet 17 metre ve 5 adet 20 metre derinliklerinde toplamda 6 adet zemin etüt sondaj kuyusu açılmıştır.

Çizelge 3.1. Sondajlara ait koordinat-derinlik bilgileri (Zemin Etüt Raporu, 2019)

Sondaj Numarası	Koordinat (ITRF)	Derinlik (m)
Sk1	X: 669865 Y: 4540396	17.00
Sk2	X: 669859 Y: 4540381	20.00
Sk3	X: 669834 Y: 4540378	20.00
Sk4	X: 669829 Y: 4540361	20.00
Sk5	X: 669813 Y: 4540362	20.00
Sk6	X: 669803 Y: 4540344	20.00

Sondajlar portatif sondaj makinasını kullanarak yapılmıştır. Sirkülasyon sıvısı için su kullanılmıştır. Yapılan zemin etüt sondajlarının derinlikleri ve koordinatları

Çizelge 3.1.'de sunulmuştur. Yapılan sondajlarda uygun seviyelerden zemin numuneleri alınarak, bu numuneler üzerinde laboratuvar ortamında gerekli testler yapılmıştır. İnceleme alanında yeraltı suyu ölçümü yapılmış ve yer altı suyu seviyesinin 4,20 metrede olduğu tespit edilmiştir. Sondaj çalışmalarında yapıyı düzenli takip etmek amacıyla uygun derinliklerdeki kaya ortamlarından karotlar alınmıştır. Sondaja ait tüm veriler EK 1' de sondaj logları bölümünde sunulmuştur. Sondaj lokasyon noktaların hepsi (Şekil 3.5.) saha içerisinde korelasyonun en iyi şekilde yapılacağı noktadan seçilmiştir.



Şekil 3.5. Sondaj kuyularının yerleşimi (Zemin Etüt Raporu, 2019)

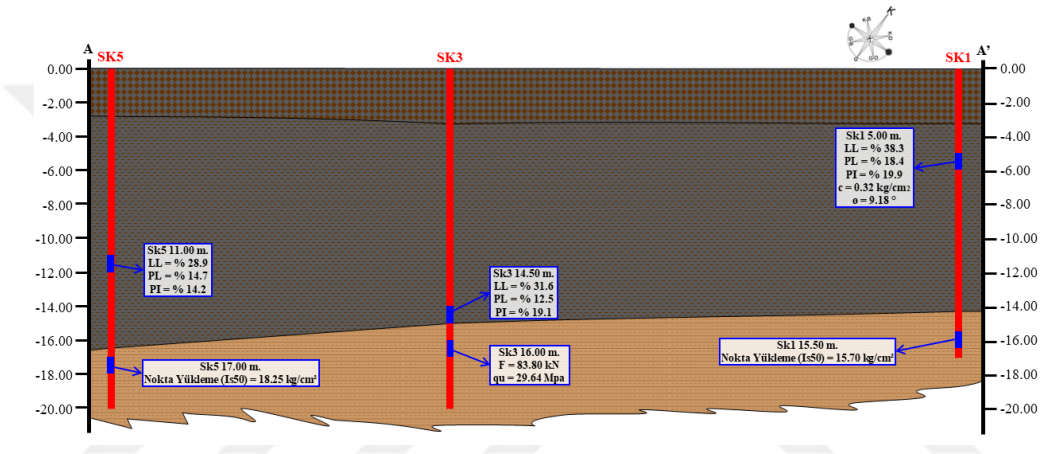
3.1.3. Laboratuvar deneyleri

İnceleme alanında yapılan zemin etüt sondajlarından alınan numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini tespit etmek için dayanım deneyleri yapılmıştır. Sahada yapılan zemin etüt sondajlarından TS EN ISO 22475-1'e uygun şekilde numuneler alınmıştır. İnceleme alanında sondajların sonuçlarından yola çıkılarak yukardan aşağıya doğru dolgu, alüvyon ve Trakya formasyonu olmak üzere 3 farklı tabaka görülmüştür. Sondaj kuyularının zemin sondaj korelasyon kesiti Şekil 3.6. ve 3.7.'de yer almaktadır.

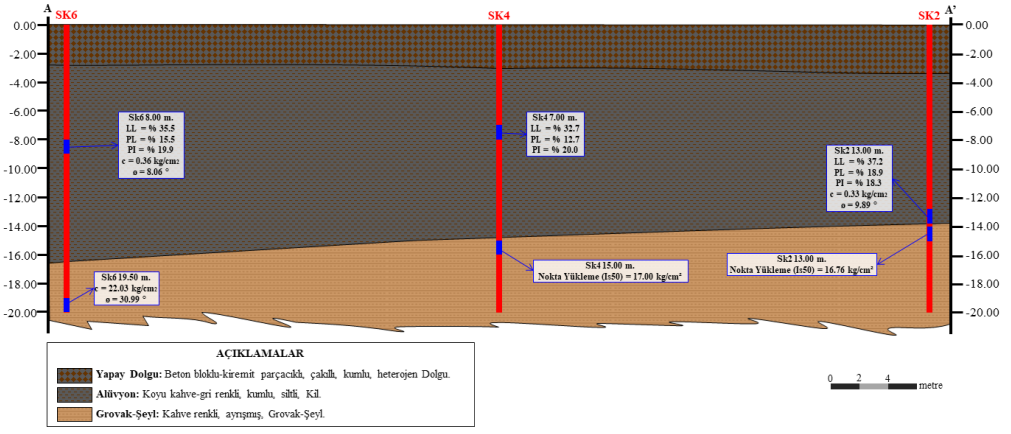
Dolgu: İnceleme alanın genelinde 2.80 – 3.40 m. kalınlığa sahip dolgu birimi gözlenmiştir. Heterojen özellikte olup temel olma özelliği yoktur.

Alüvyon: Dolgu biriminin altından başlayıp 13.80 – 16.50 m. derinliğe kadar Alüvyon birimi gözlenmiştir. Alüvyon biriminin taşıyıcı özelliği bulunmamaktadır.

Trakya Formasyonu: Yapılan sondaj çalışmalarında dolgu + alüvyon biriminin altında başlayıp kuyu sonuna (17.00 – 20.00 m.) kadar kahve renkli, ayrışmış grovak–şeyl birimi gözlenmiştir.



Şekil 3.6. Zemin sondaj korelasyon kesiti (Zemin Etüt Raporu, 2019)



Şekil 3.7. Zemin sondaj korelasyon kesiti (Zemin Etüt Raporu, 2019)

3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında sismik saha analizinde Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1, Mw=7.6 büyüklüğündeki depremler için gerçek deprem senaryoları DEEPSOIL (2020) programı ile ilgili alana uygulanmıştır. Analizler sonucunda bu deprem büyüklüklerinin her biri için PGA değerleri elde edilmiştir. Sıvılaşma analizleri hesabı için SPT'ye yönelik yöntemler kullanılmıştır. İlk aşamada Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen sadeleştirilmiş yönteme göre teorik analiz yapılmıştır. İlk adım olarak SPT-N değerlerinde düzenleme işlemi yapılmıştır. İkinci adımda efektif ve toplam gerilme hesapları için sondaj kuyularının derinlikleri, SPT-N sayısı, yer altı suyu seviyesi vb. parametreler zemin etüt raporundan alınmıştır. Ardından SPT deneyinin yapıldığı her bir derinlik için CSR ve CRR katsayılarına ulaşılmıştır. Son adımda ise CSR ve CRR katsayıları elde edildikten sonra her bir deprem büyüklüğü için güvenlik katsayıları elde edilip, sıvılaşma durumları analiz edilmiştir. Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen sadeleştirilmiş yönteme göre yapılan teorik analizin sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla dünya çapında bilinen sıvılaşma analizi yöntemlerini kapsayacak şekilde tasarlanmış olan NOVOLIQ (2020) programıyla da sıvılaşma analizi yapılmıştır. NOVOLIQ (2020) programında sıvılaşma analizini yapmak için önemli araştırmacıların çeşitli yöntemleri (9 farklı yöntem) kullanılmıştır. NOVOLIQ (2020) analiz sonuçları ile teorik hesap sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu bağlamda ilgili çalışma alanı için söz edilen yöntemler kullanılarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşmaya neden olan faktörler, sıvılaşma etkileri, mevcut sıvılaşma analiz yöntemleri, sıvılaşmaya karşı alınabilecek önlemler ve bu yüksek lisans çalışması kapsamında kullanılan analiz metotlarının her bir aşaması aşağıda detaylı bir şekilde alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.2.1. Depremler

Yer kabuğunda plakalar hareket ettikçe hareketten dolayı üzerlerinde bir kuvvet birikir ve buda kabuğun kırılmasına baskı yapar. Kabukta kırılma görüldüğünde yığılmış olan gerilmeler dışarıya enerji şeklinde çıkacaktır. Zeminde açığa çıkan bu

enerji yerkürede dalgalar şeklinde yayılır (Canbey ve ark., 2008). Kayalar tektonik gerilmeye maruz kaldığı zaman ilk önce fay boyunca bükülür ardından ise gerilme kırık zonu üzerindeki sürtünme dirençlerini aştıklarında hemen başka bir şekil alır (Rahn, 2006).

3.2.1.1.Sismik dalgalar

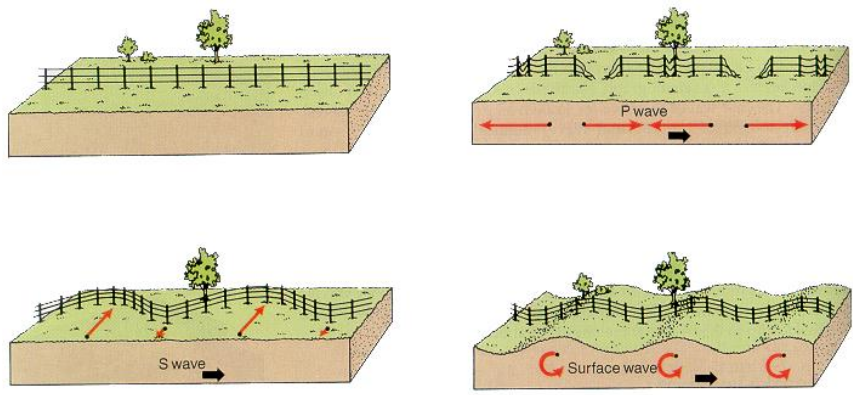
Bir kırık hattı boyunca biriken enerjinin yeryüzüne çıkması esnasında çevreye deprem dalgaları yayılmaktadır. Cisim dalgaları ile yüzey dalgaları şeklinde iki çeşittir:

a) Cisim Dalgaları

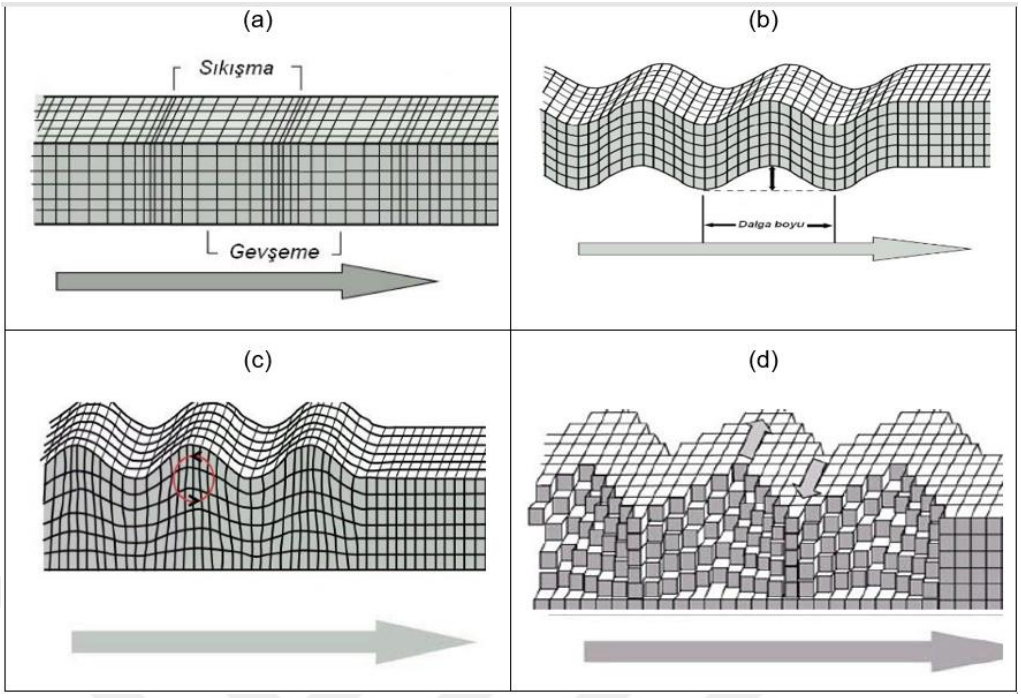
Deprem meydana geldiği anda yer kabuğu üzerinde iki çeşit hareket dalgası yaymaktadır. Bu dalgalar P dalgası (Vp, boyuna dalgalar) ve S dalgasıdır (Vs, enine dalgalar). Dalga hareketleri Şekil 3.8., Şekil 3.9. (a) ve Şekil 3.9. (b)'da gösterilmiştir.

b) Yüzey Dalgaları

Sismik kaynaktan çıkan, yerkürenin yüzeyi boyunca yayılan ve cisim dalgalarına göre daha yavaş hareket eden farklı dalgalar da mevcuttur. Büyük genlik ve düşük frekanslarından dolayı yüzey dalgaları, meydana gelen birçok depremde yapılara en fazla zararı veren dalga çeşididir. Başlıca iki çeşit yüzey dalgası vardır. Bunlar Rayleigh Dalgası ve Love Dalgasıdır. Dalga hareketleri Şekil 3.9. (c) ve Şekil 3.9. (d)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Deprem dalgalarının zemin yüzeyindeki etkileri (Ovalı, 2010)



Şekil 3.9. a: P Dalgası hareketi; b: S Dalgası hareketi; c: Rayleigh dalgası hareketi; d: Love dalgası hareketi (Ovalı, 2010)

3.2.2. Deprem kaynaklı zemin problemleri

Deprem esnasında oluşan tekrarlı sismik hareketlerden dolayı zeminler daha sıkı bir hal almaya çalışır. Bu sırada meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncının artışından dolayı zemin mukavemet kaybedebilmektedir. Dolayısıyla zeminlerde; sıvılaşma, taşıma gücü kaybı, oturmalar, şev kaymaları, depremin neden olduğu zemin büyütülmesi, istinat yapılarındaki yanal yüklerin büyümesi vb. birçok tehlikeli durum ortaya çıkabilmektedir (Öztürk, 2016).

- **Oturmalar**

Titreşim etkisi altında kalan iri taneli zeminler daha sıkı bir hal alma eğilimindedirler. Bu özellikten dolayı deprem sırasında depremin büyüklüğü, süresi ve frekansına bağlı olarak birkaç zemin problemi meydana gelebilmektedir. Depremden dolayı oluşan titreşimli yüklerin etkisiyle, söz konusu zeminler daha sıkı bir hal alma eğilimindedir. Aşırı veya farklı oturmaların oluşması, yapılarda ciddi hasarların oluşmasına neden olabilmektedir (Tonaroğlu, 2006).

- **Taşıma gücü kayıpları**

Depremden dolayı oluşabilecek tekrarlı yüklerin u'yu artırmasıyla ortaya çıkan mukavemet kaybından dolayı özellikle yüzeysel temellerle taşınan yapılarda hasarlar meydana gelebilmektedir. Sıvılaşmadan sonra ise zeminin taşıma gücü tamamen yok olmakta ve zeminde bulunan yapılar stabilitesini kaybederek devrilebilmekte, yan yatmakta veya zemine gömülebilmektedir (Tonaroğlu, 2006).

- **Zemin büyütmesi**

Odak noktasından başlayan deprem hareketi yayılırken içinden geçtiği zeminlerin özelliklerine göre yer değiştirmeleri, ivmeli hareketleri büyüyebilmektedir. Özellikle zemin yüzeyine yakın olan katmanlarda, zemin üstünde depremin hissedilebilme derecesini yükseltmekte, bundan dolayı da yapılara gelecek olan yük tahmin edilen yükten fazla olabilmektedir (Tonaroğlu, 2006).

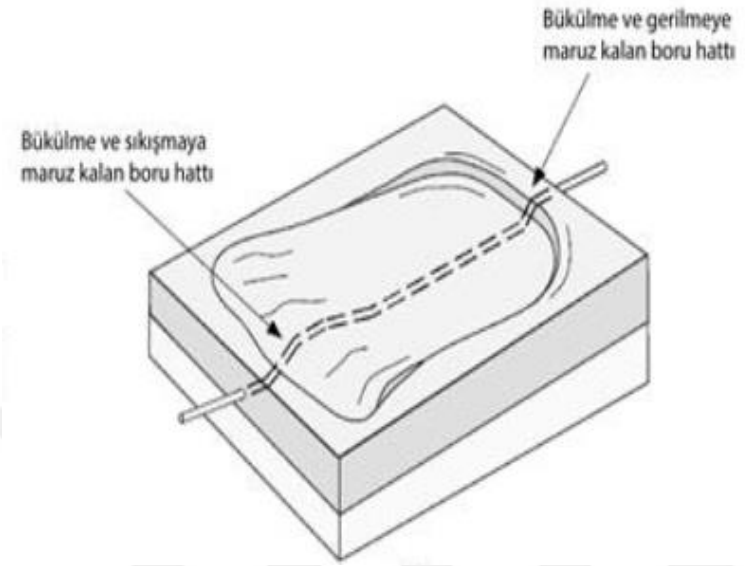
- **Şev kaymaları**

Deprem hareketlerinden sonra meydana gelen boşluk suyu basıncının artmasıyla şevlerin dengeli durumu bozulabilmekte ve dengesiz durumun oluşmasından sonra şev kaymaları oluşabilmektedir. Şevin zemini içinde kalan kumun veya siltin ya da her ikisinin olması ve bu zemin tabakalarının sıvılaşmayla karşı karşıya kalması şevlerin kaymalarında kritik bir durumdur (Özaydın,1982).

3.2.3. Sıvılaşma

Sıvılaşma, deprem anında bazen de daha sonra etkileri görülebilen, son derece büyük hasarlar verebilen bir zemin problemidir. Zeminlerde artan u'dan dolayı zeminin σ''sini yitirmesi ve zeminin sıvılar gibi hareket etmesinden dolayı konstrüksiyonlar için son derece tehlikeli durum gözlemlenir. Sıvılaşma, zeminde başka problemlerin de (zemin içindeki tesisat vb. yapıların hasar görmesi vs.) meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Şekil 3.10.'da sıvılaşma sonucu boru hatlarındaki hasarların oluşum şekli yer almaktadır. Türkiye'de 1999 yılında Gölcük depreminde ortaya çıkan sıvılaşmadan dolayı birçok hayat kaybedilmiştir. Adapazarı yerleşim

biriminde geniş çaplı sıvılaşma nedeniyle yaklaşık 55.000 yapıda çeşitli hasarlar meydana gelmiştir (Tonaroğlu, 2006).

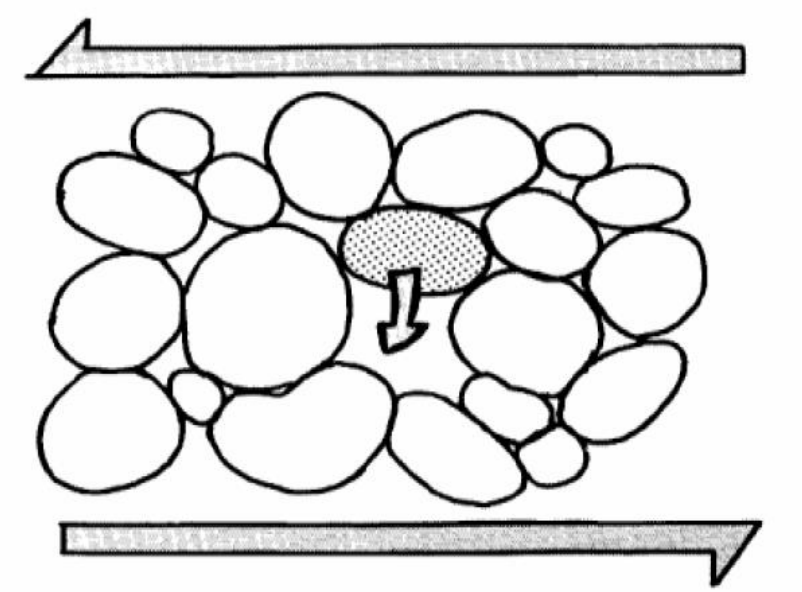


Şekil 3.10. Yanal yayılma sırasında boru hatlarında oluşan hasarlar (Karalı, 2019)

3.2.3.1. Zeminlerde sıvılaşma olayının detayları

Zeminde oluşan sıvılaşmadan dolayı ortaya çıkan ani dayanım kaybı, Hazen (1920) tarafından (ilk kez) sıvılaşabilir hareket şeklinde tanımlamıştır. Bilimsel literatürde ise ilk kez sıvılaşma (Liquefaction) terimini Terzaghi'nin (1925) kullandığı görülmektedir.

Zeminlerde sıvılaşma olayı, zemine uygulanan dinamik bir yükün etkisinde ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basıncı yüzünden zeminin kayma mukavemetinin ani düşmesidir (Castro ve ark., 1982). Sıvılaşmadan sonra kayma dayanımı tamamen yok olabilir veya olması gereken değerlerin çok altına inebilir. Bu yüzden sıvılaşma olayı yapı yapılması planlanan yerlerde muhakkak değerlendirilmesi gereken çok önemli bir durumdur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Şekil 3.11.'de makaslama dalgalarının etkisinde zemin hareketi görülmektedir.



Şekil 3.11. Makaslama dalgaları arasında kalan zeminin sıkışması (Atak ve ark., 2003)

3.2.3.2. Sıvılaşma mekanizması

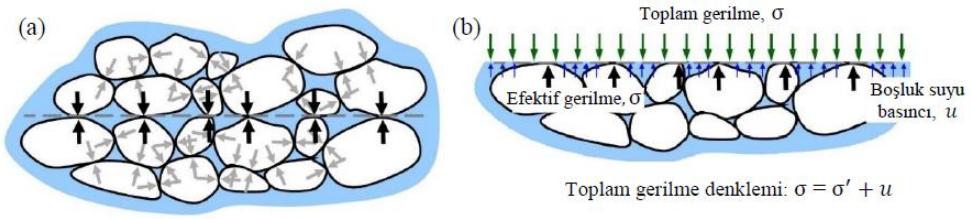
Sıvılaşma olayı özellikle gevşek ve suya doygun olan kum, siltli-kum ya da çakıl zeminlerde görülmektedir. Depremden dolayı, kayma dalgalarının zemin yüzeyine hareketinden dolayı oluşan tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kalan zeminde aşırı boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Deprem kaynaklı titreşimlere maruz kalan özellikle kohezyonsuz zeminler, hacimce küçülme ve sıkışma eğilimi göstermektedirler, bu durum Şekil 3.12.'de şematik olarak gösterilmiştir.

Zeminde yer alan suyun drenajı mümkün değilse, zeminde oluşan hacim azalmasından dolayı boşluk suyu basıncı üzerinde bir artış ortaya çıkar. Boşluk suyu basıncı, düşey gerilmeye (σ'ya) çok yakın veya daha fazla olursa, efektif gerilme bu artıştan dolayı sıfırlanır ve zemin kayma mukavemetinin hepsini kaybeder, böylece sıvılaşma olayı ortaya çıkmış olur (Çavuş, 2004).

$$\sigma' = \sigma - u \qquad (3.1)$$

Denklem 3.1'de, σ', efektif gerilme, σ, toplam gerilme, u, boşluk suyu basıncını ifade etmektedir.

Boşluk suyu basıncı toplam gerilmeye eşit olursa σ =u olacağından Denklem 3.1'den $\sigma' = 0$ olur. Böylece zemin sıvılaşmış olacaktır.



Şekil 3.12. (a) Zemin danelerinin statik durumu; (b) Efektif gerilme ile boşluk suyu basıncı ilişkisi (Özenç, 2019)

3.2.4. Sıvılaşma türleri

Sıvılaşmanın verdiği hasar tiplerinden yola çıkarak; akma türü sıvılaşma, sınırlı sıvılaşma, düz yüzeyli zemin sıvılaşma ve devirsel hareketlilik sıvılaşması çeşitleri ele alınmıştır.

3.2.4.1. Akma türü sıvılaşma

Suya doygun olan gevşek zeminlerde sıvılaşmanın etkisinden dolayı ortaya çıkan yumuşama nedeniyle kayma mukavemeti kayıpları yaşanır ve bunun sonucunda akma sıvılaşması ortaya çıkar. Akma sıvılaşması, sıvılaşmış zeminin kayma direncinin, statik koşullar altındaki durumun dengesi için şart olan kayma dayanımından küçük olması durumunda çabucak gelişir. Bu yüzden bu durumun zeminde büyük yer değiştirmelere neden olduğu görülebilir. Depremden sonra da etkileri devam eden akma sıvılaşmasının sonucunda mevcut yapıların devrilmesi ya da batması, şevlerde ve toprak barajlarda stabilite kayıplarının yaşanması, hafif gömülü yapıların (boru, kanalizasyonlar vb.) yüzeye çıkması gibi olumsuz durumlar görülebilmektedir (Kramer, 1996).

3.2.4.2. Sınırlı sıvılaşma

Sınırlı sıvılaşmada, gevşek ile orta sıkılıktaki zeminler başlangıçta aynı sıkışma eğilimini (davranışı) gösterirken, aynı zeminler daha sonrasında birbirinden farklı genişleme eğilimini göstermektedir (Kramer ve Elgamal, 2001).

3.2.4.3. Düz yüzeyli zemin sıvılaşması

Böyle bir sıvılaşma anında kayma gerilmeleri (statik yatay) sıfırdır. Depremin yol açtığı aşırı boşluk suyu basıncı, zeminin sönümlemesi esnasında suyun yukarıya akışı düz yüzeyli zemin yenilmelere yol açar. Meydana gelen oturmalar ile kum kaynaması hasarları bu sıvılaşma türünde yer almaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.2.4.4. Devirsel hareketlilik (Mobilite)

Akma sıvılaşmasına ilaveten zemin tanecikleri arasında var olan temas kuvvetleri azalmakta ancak bu temas kuvvetleri tamamen ortadan kaybolmamaktadır. Devirsel hareketlilik ile meydana çıkan statik kayma gerilmeleri ve devirsel gerilmeler, büyük şekil değiştirmelerin ortaya çıkmasına sebep olur (Kramer, 1996). Bu durum arazi koşullarında yanal yayılım şeklinde görülür.

3.2.5. Zemin özelliklerine bağlı faktörler

3.2.5.1. Zeminin türü

Çakıllı zeminlerin siltli ve ince taneli kumlu zeminlere göre geçirimliliği daha fazladır. Bu yüzden sismik yükler altında meydana gelen boşluk suyu basıncındaki artışı çakıllı zeminler daha iyi sönümlerler. Düşük plastisiteli siltli kumlar, hem boşluk suyu basıncında oluşabilecek bir düşüşü engelleyecek seviyede geçirimliliklerinin az olmalarından hem de sıvılaşabilir olmaları nedeniyle en tehlikeli zemin türleri arasındadır. Temiz kumlar sıvılaşma olayının temelinde rol alırlar. Genelde iyi drene olan çakılların ve killi zeminlerin sıvılaşma eğiliminde olmaları beklenmemektedir. Deprem esnasında dayanım kaybına uğramalarından dolayı sıvılaşan kumların yüzeye doğru hareket ettikleri birçok sıvılaşma olayında görülmüştür. Ayrıca daha az geçirimliliği olan zemin tabakalarının arasında çakıl tabakasının sıkışması, ince taneli malzemeler ile çakıl danelerinin arasının dolması ve çakıl tabakasının drenaj yolunun uzun olmasından dolayı sıvılaşma olayı meydana gelebilmektedir (Öztürk, 2016).

- **Wang (1979) Kriterleri (Çin Kriteri)**

Wang'ın (1979) geliştirdiği ve yaygın olarak kullanılan Çin kriteri yöntemi zemin türüne göre sıvılaşma riskini değerlendirmektedir. Bu kriterin verilerine göre;
-0,005 mm'den daha ince danelerin yüzdesi < %15
- Likit limit, LL < %35
- Doğal su içeriği, Wn ≥ 0,90 Likit limit
belirtilen üç şartı sağlayan killi kum zeminlerde sıvılaşma riskinden söz edilebilir (Öztürk, 2016).

- **Andrews ve Martin (2000) Kriterleri**

Modifiye Çin Kriteri olarak da bilinmektedir. Çizelge 3.2.'de sıvılaşma durumu ele alınmıştır.

Çizelge 3.2. Kil içeren kumların sıvılaşma koşulları (Andrews ve Martin, 2000)

Likit Limit / Kil içeriği	Likit Limit < 32	Likit Limit ≥ 32
Kil İçeriği < %10	Sıvılaşabilir.	Detaylı bir çalışma gerekir.
Kil İçeriği ≥ %10	Detaylı bir çalışma gerekir.	Sıvılaşmaz.

- **Seed ve Idriss (1982) Kriterleri**

Wang'ın (1979) Çin Kriterine ilave olarak sınır değerleri aşağıdaki şekliyle modifiye edilmiştir:
-0,005 mm'den daha ince danelerin yüzdesi ≤ %15
- Likit limit, LL ≤ %35
- Doğal su içeriği, Wn ≥ 0,90 Likit limit

Bu koşullarının her üçü sağlanırsa ince taneli zeminler için sıvılaşmaya yatkınlığın olduğu söylenebilir (Nas, 2013).

- **Önalp ve Arel (2002)**

1999 Kocaeli depremine göre araştırmalar yapan daha sonrasında Adapazarı'ndaki siltlerin incelendiği araştırmalardan yola çıkarak, Çin kriterinin üzerinde aşağıdaki gibi birtakım düzenlemeler yapılmıştır;

-Likit limit, LL <%30

-Kil oranının <%10

- Doğal su içeriği, Wn >Likit limit, LL

- Likitlik İndisi, LI < %1'e göre yapılabileceğini belirtmiştir (Nas, 2013).

- **Önalp ve ark., (2006)**

- Likit limit, LL < %33

-Kil oranının < %10

-Likitlik İndisi, LI <%0,90

-D50 = 0,02 milimetre

Yukarıdaki şartlara göre işlem yapılmasını önermişlerdir (Nas, 2013).

Bu konuda birçok kriterin önerilmesinin ana sebebi zeminlerin koşullarına göre daima doğru bir neticeye ulaşılamamaktadır. 1999 Kocaeli depremi üzerinde araştırmalar yapıldıktan sonra Adapazarı'nda Çin Kriteri kullanarak sıvılaşmayacağı düşünülen zeminlerin de sıvılaşabileceği ortaya çıkmıştır (Nas, 2013).

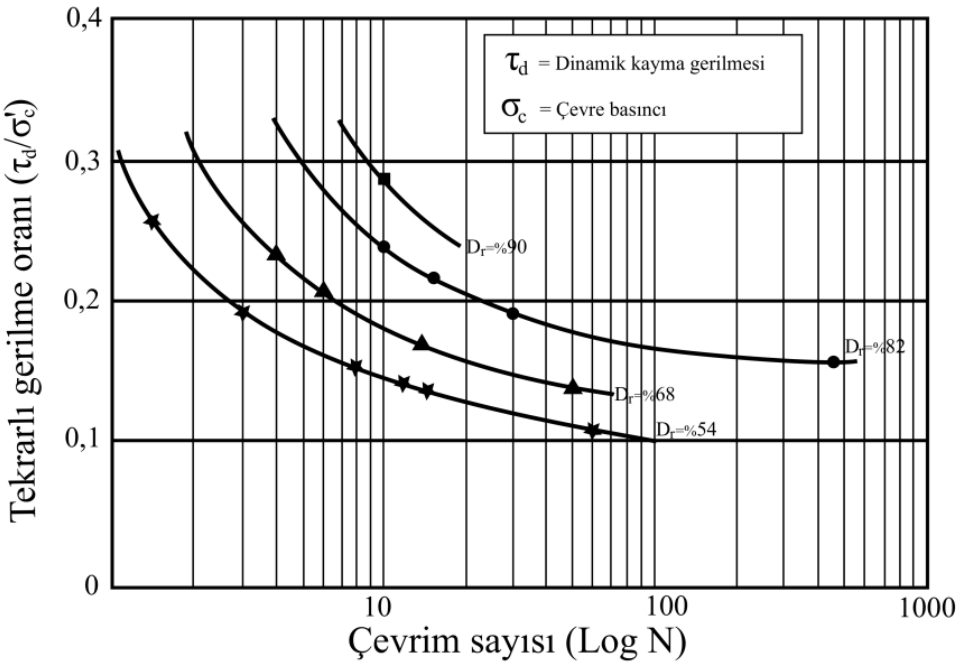
3.2.5.2. Zeminin rölatif sıkılığı (Dr)

Kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma potansiyeli belirlerken en önemli unsurlardan biri de sıkılık durumunu gösteren rölatif sıkılık değeridir. Seed ve Idriss'in (1971) yaptığı araştırma sonrasında zemin sınıflaması ile rölatif sıkılık değeri arasında bir korelasyonun olduğunu görülmüştür. Bu sınıflandırmaya göre zeminlerde sıvılaşmanın olup olmayacağı hakkında bir bilgiye ulaşmak için rölatif sıkılık değerine göre yola çıkılmıştır. Dr=%65'ten fazla olan zeminlerde sıvılaşmanın meydana gelmeyeceği belirtilmiştir. Şekil 3.13.'te gösterildiği gibi rölatif sıkılık değerini kullanarak CSR değeri elde edilebilmektedir. 1964 yılında Niigata depreminde Dr=%50 değerine sahip kumlu zeminler sıvılaşırken Dr=%70 civarında olan

zeminlerde sıvılaşmanın meydana gelmemesi bu duruma örnek olarak gösterilebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2006). Boşluk oranı kullanılarak rölatif sıkılık değeri genellikle Denklem 3.2 yardımıyla elde edilir.

$$Dr = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de, e_o, başlangıç boşluk oranı, e_{min}, minimum boşluk oranı, e_{max}, maksimum boşluk oranını ifade etmektedir.



Şekil 3.13. Rölatif sıkılığın sıvılaşma üzerindeki etkisi (Seed, 1976)

3.2.5.3. Kritik boşluk oranı

Drenajlı kayma durumuna bakıldığı zaman gevşek kumların hacimlerindeki değişim azalma olarak görülürken sıkı kumlarda tam tersi artış (genişleme) olarak görülmektedir. Bu iki durumda belirli bir boşluk oranı (e) vardır ve kayma sırasında hacimde herhangi bir değişiklik olmaz. Söz konusu boşluk oranı için kritik boşluk oranı ifadesi kullanılmaktadır. Konsolidasyonlu drenajlı bir durum söz konusu ise ve eğer $e_0 < e_{cr}$ durumu varsa negatif boşluk oranı söz konusu olur. Diğer durumda tam tersi $e_0 > e_{cr}$ durumu oluşursa pozitif boşluk oranı ortaya çıkar. Araştırmacılar bu kavramdan yola çıkarak kumlarda kritik boşluk oranını (e_{cr}) dikkate alıp sıvılaşmanın

olup olmayacağını değerlendirmiştir. Genel bir yargı olarak eğer kumlarda $e_0<e_{cr}$ ise sıvılaşma ihtimalinin olmadığı ve $e_0>e_{cr}$ ise sıvılaşmaya uygun bir zemin tipinde sıvılaşma olabileceği belirtilmiştir. Kritik boşluk oranı Denklem 3.3. ile elde edilebilir (Güngör, 2007).

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

Denklem 3.3'te, e, boşluk oranını, e_{min}, minimum boşluk oranı, e_{max}, maksimum boşluk oranı, a_{max}, maksimum yer ivmesini ve g, yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

3.2.5.4. Zeminin tane şekli

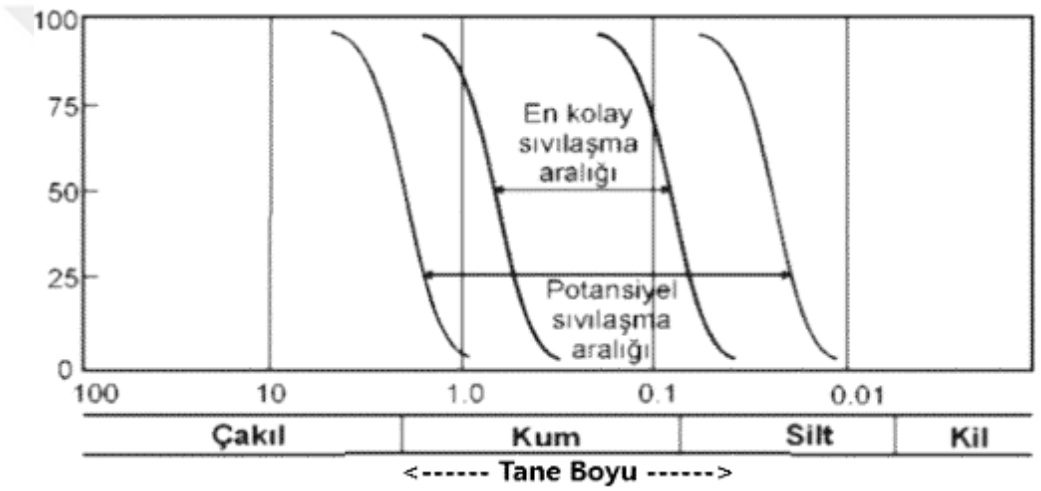
Zemin tanelerine bakıldığı zaman yarı yuvarlak ya da yuvarlak tanelerin, köşeli tanelere kıyasla sıvılaşma riskleri daha fazladır (Nas, 2013). Yuvarlak taneli zeminlerde tanelerin arasındaki temas azlığından dolayı tekrardan dizilimi çok kolaydır. Taneleri köşeli olan zeminlerde ise tam tersi bir durum görülmektedir. Yükleme altında kalan tanelerin birbirlerine kısmen değmesinden kaynaklı olarak taneler arasındaki gerilme ve temas kuvvetlerinin ortadan kalkması oldukça zordur (Terzaghi ve ark., 1996). İnce siltlerde, levha veya yassı durumdakilere bakıldığında sıvılaşmayı engelleyecek ölçüde bir kohezyonun olduğu görülmektedir (Kramer, 1996). Tane boyutu ne kadar küçülürse kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma riski o kadar yükselmektedir. Bundan hareketle ince kumlara bakıldığında kaba kumlara göre sıvılaşma risklerinin daha fazla olduğu söylenebilir (Tonaroğlu, 2006).

3.2.5.5. Tane boyu dağılımı

Üniform derecelenmiş, plastik olmayan zeminlere bakıldığında tane dizilimleri farklı olmaya yatkındır. Bu zeminlerin sıvılaşmaya karşı riskleri iyi derecelenmiş zemin çeşidine göre daha fazladır. İyi derecelenmiş olan zeminlerde büyük tanelerin arasındaki boşluklar küçük taneler ile doludur. Böyle zeminlerde deprem anında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı diğer zeminlere göre daha az artacaktır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Çeşitli depremlerde incelemeler yaparak gözlenen sıvılaşmalar ile bu depremlerin meydana geldiği zeminler incelendiğinde

sıvılaşabilir zeminler için tane çapları ve dağılım özelliklerine ulaşılmıştır. Üniformluk katsayısı 2-10 milimetre aralığında, ortalama tane çapı 0.02-0.40 milimetre aralığında ve 0.01-0.25 milimetre çaplı olan zeminler sıvılaşabilir (Tezcan ve Özdemir, 2004). Şekil 3.14.'te tane boyuna göre sıvılaşma potansiyeli aralığı görülmektedir.

Kıyı-liman yapılarında dolgu malzemelerinin tercihinde sıvılaşmaya karşı hassas olmayan malzemelerin tercih edilmesi çok önemlidir. Bu yapılarda kullanılacak olan dolgu malzemesi için önerilen taneli malzemelerin tane çapı aralıkları D10> 1mm ile D50 >10 mm şeklindedir (Nas, 2013).



Şekil 3.14. Tane boyuna göre sıvılaşma potansiyeli (Ulusay, 2010)

3.2.5.6. Yeraltı su seviyesi

Yeraltı su seviyesi (YAS) zemin yüzeyine yakın olduğu zaman sıvılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli şartlardan biri oluşmuş kabul edilebilir. Sıvılaşma analizleri yapıldığı zaman YAS'ın daha önceki seviyelerine bakılarak tespit edilmiş olan en yüksek YAS'a göre analizlerin yapılması kritik durumun seçimi için önem arz etmektedir. Sıvılaşma olayının YAS'ın altında kalan zeminlerde oluştuğu söylenebilir (Ertuş, 2017).

3.2.5.7. Drenaj şartları

Depremlerden sonra aşırı boşluk suyu basıncının çok hızlı bir şekilde azaltılabilmesi zeminlerdeki sıvılaşma riskini azaltabilir. Bu yüzden zeminlerde drenaj büyük önem arz etmektedir. Yüksek oranda geçirimliliği olan çakıllı vb. zeminlerin sıvılaşma potansiyeli daha azdır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.2.5.8. Depremin süresi ve büyüklüğü

Sıvılaşmanın oluşabilmesi için en önemli kriterlerden biri de depremlerden dolayı ortaya çıkan yer hareketleridir. Zeminlerin türüne bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli depremin sarsıntı süresi ve deprem büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için bazı eşik değerlerin mevcut olduğu dile getirilmiştir. Bu değerler tahmini olarak a_{max} için 0.10 g ve M_L içinse yaklaşık olarak 5'tir (Ishihara, 1985). Bu tahminlerden yola çıkarak a_{max} = 0.10 g'den düşük olan a_{max} değerleri için ve M_L = 5'ten küçük değerler için sıvılaşmanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceğine bakmaya gerek duyulmaz (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Depremin süresinin artmasıyla zemin üzerindeki tekrarlı gerilmelerin uygulanma süresi arttıracağından sıvılaşma riski büyük ölçüde artar (Dere, 2009).

3.2.5.9. Zeminde sıvılaşan tabakanın derinliği ve konumu

Sıvılaşma olayı zemin yüzeyinden itibaren çeşitli derinliklerde ortaya çıkabilmektedir. Potansiyel olarak sıvılaşmanın ortaya çıkabileceği tabaka derinliği 15 metre (çeşitli araştırmacılara göre bu derinlik değişebilmektedir, bazıları 20 metre olarak açıklamıştır.) olarak belirtilmektedir. 15 metreden daha derin zemin tabakalarında efektif gerilmeler ve büyük düşey gerilmeleri artacağından dolayı, bu derinlikten daha derinde bulunan zeminlerde sıvılaşmanın ortaya çıkmayacağı kabul edilmektedir. Yapılan bu değerlendirmeye göre hareket edilip sıvılaşma analizlerinin 15 metreden daha derin yerlerde yapılmasının gereksiz olduğu sonucu çıkarılmamalıdır (Nas, 2013). Bütün zemin profilini içine alacak şekilde belirlenen

derinliklerin hepsinde analiz yapmak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

3.2.5.10. Çevre basınçları

Çevre basıncının artması ile sıvılaşma potansiyeli azalmaktadır. Belirli bir yoğunluk değeri için tekrarlı yüklerde sıvılaşma olayını başlatan gerilme, zemin çevre basıncının artmasından dolayı artacaktır. 1964 Niigata depreminde bu etki 2,7 metre dolgu tabakasının hemen altındaki zeminde görülmüştür (Seed ve Idriss, 1971).

3.2.5.11. Bina yükleri

Bir yapının temelinin altındaki zemin ile temelin deprem esnasında hareket etmesiyle kayma gerilmeleri ortaya çıkar. Bu kayma gerilmeleri zeminde sıvılaşma potansiyelini azaltabilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Gevşek zemin üzerinde yapı inşasından dolayı zemin biraz daha sıkı bir hal alabilir ve böylece sıvılaşma riski de azalabilir.

3.2.5.12. Sismik geçmiş

Zeminler daha önce herhangi bir depremde maruz kaldıkları deformasyonlardan etkilenmektedirler. Aynı yoğunluklu iki zemin karşılaştırıldığı zaman daha önceden depreme maruz kalmış olan yaşlı zemin tabakası ve genç zemin tabakası örneğinde; yaşlı zemin tabakasının genç zemin tabakasına göre daha yüksek sıvılaşma dayanımı gösterdiği bilinmektedir. Geçmişte oluşmuş olan deformasyonlar kum zeminlerde sıkılığı çok etkilememekte ancak sıvılaşmaya neden olan gerilmeyi yaklaşık olarak 1,5 katına çıkarmaktadır (Güngör, 2007).

3.2.5.13. Jeolojik yaş ve çimentolanma

Bir zemin katmanının jeolojik yaşı sıvılaşma potansiyeli ile ilgili bilgiler verir. Uzunca bir zaman jeolojik yükün alıntında kalmış olan zemin tabakalarına

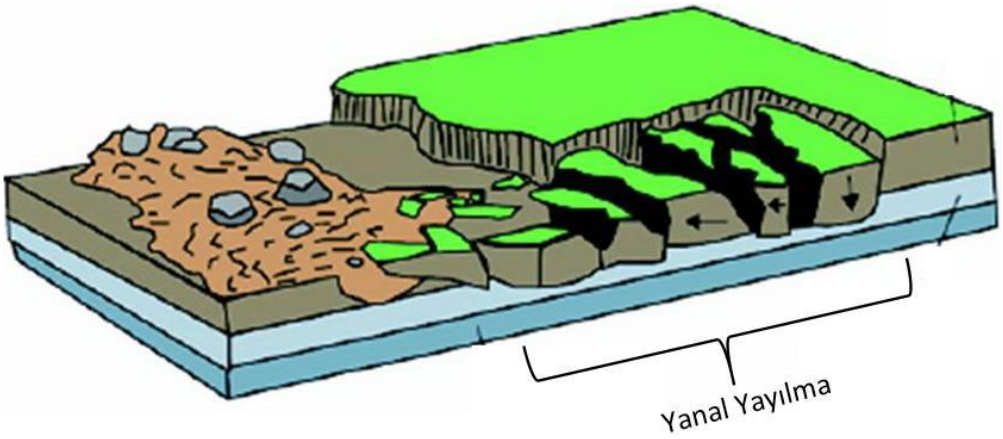
bakıldığında, daneler daha sağlam bir dizilim ile sıkışacağından partiküller arasında bir kaynaşma ortaya çıkar ve böylece çimentolanma meydana gelir. Bu olay jeolojik yaşı çok olan zeminlerin sıvılaşma olayına karşı direnç göstermede etken olarak karşımıza çıkmaktadır (Seed, 1976).

3.2.6. Sıvılaşmanın sebep olduğu etkiler

Sıvılaşmadan sonra ortaya çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Binalarda, köprülerde, gömülü boru hatlarında, barajlarda, nükleer santrallerde ve daha birçok yapıda çeşitli hasarlar oluşabilir. Bu hasarların en önemlileri kum kayması, akma sıvılaşması, şevlerin kayması, yapıların oturması, yanal yayılma, hafif gömülü yapıların yükselmesi ve istinat duvarlarının göçmesi şeklindedir (Kramer, 1996).

3.2.6.1. Yanal yayılmalar

Yanal yayılmalar göl, gölet vb. su birikintilerine yakın olan eğimi 3 dereceden az düzlük alanlarda ya da genellikle eğimi az olan yamaçlarda ortaya çıkmaktadır. Yanal yayılımların birçoğu birkaç metreyle sınırlı olmasına rağmen yine de zemin hareketinden kaynaklı olarak zeminlerde kırıklar, yükselmeler, çatlaklar ve çöküntüler oluşabilmektedir. Bunların sonucunda ise köprüler, liman tesisleri, yüzeysel temeller ve boru hatları gibi yapılar zarar görmektedir (Ertuş, 2017). Şekil 3.15.'te yanal yayılmanın şematik gösterimi, Şekil 3.16., Şekil 3.17., Şekil 3.18. ve Şekil 3.19.'da ise yanal yayılma sonrasında ortaya çıkan hasarlar görülmektedir.



Şekil 3.15. Yanal yayılma durumu (Emiroğlu, 2018)



Şekil 3.16. 1995 Kobe depremi sonrasında yanal yayılmanın rıhtım duvarına verdiği zarar (Karalı, 2019)



Şekil 3.17. Lower Van Norman Barajı'nda yanal yayılma sonucu oluşan hasarlar (Doğan, 2015)



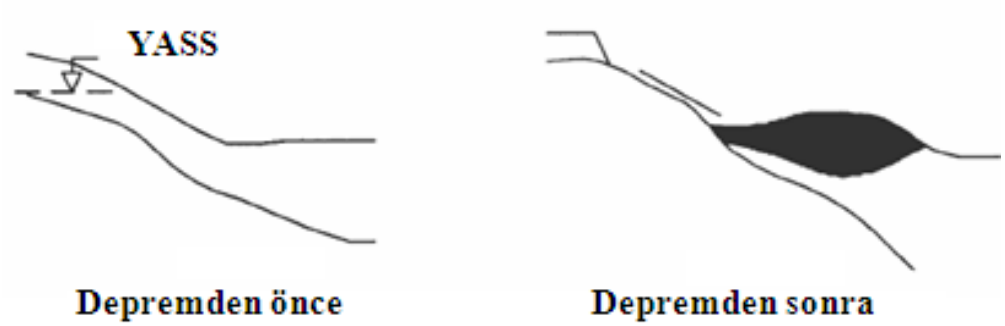
Şekil 3.18. 1998 Ceyhan depremi sonrası yanal yayılma durumu (Uyar, 2006)



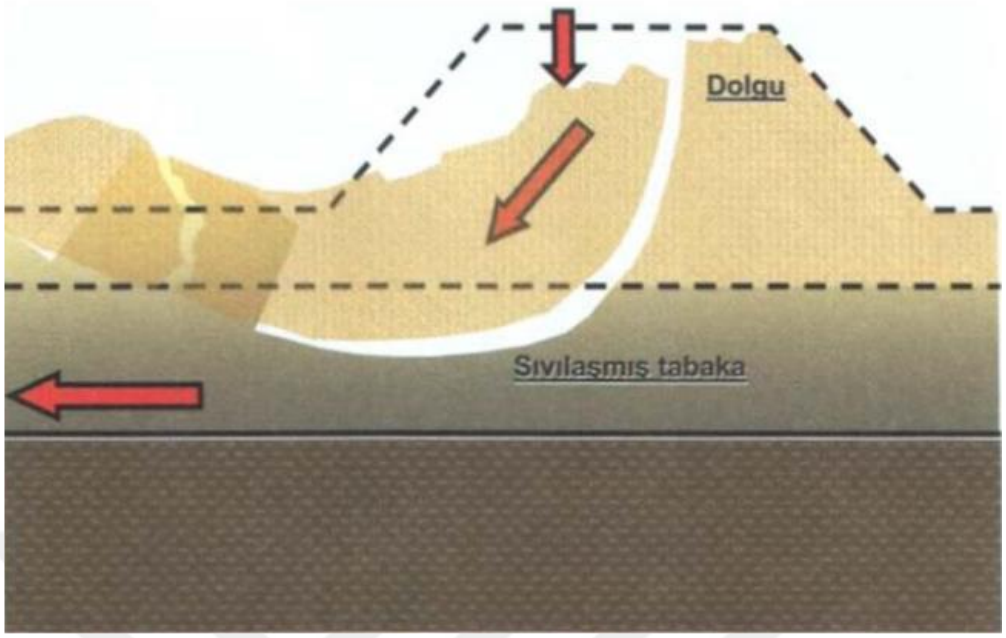
Şekil 3.19. Yollarda yanal yayılma sonucu oluşan hasarlar (Yollarda Yanal Yayılma, 2021)

3.2.6.2. Akma göçmesi

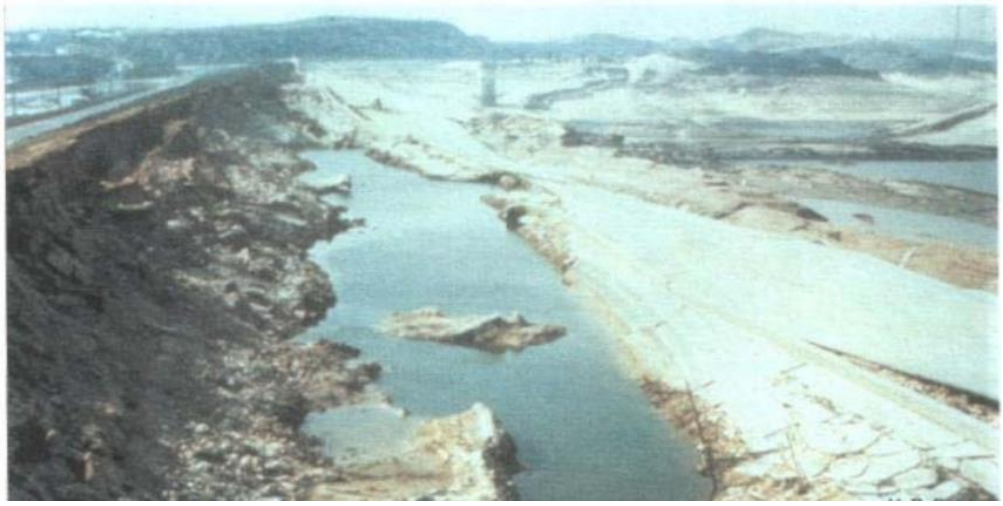
Akma göçmeleri eğimi üç dereceden daha çok olan zeminlerde ortaya çıkabilmektedir. Şekil 3.20. ve 3.21.'de akma türü kaymanın oluşum şekli gösterilmiştir. Akma göçmeleri meydana geldiğinde toprak dolgu barajları, istinat duvarları ve şevlerde stabilitelerin bozulmasına neden olur. Aniden ortaya çıkması ve çok hızlı bir şekilde etki etmesinden dolayı akma göçmeleri en kötü göçmelerdir (Duman, 2013). Şekil 3.22.'de akma yenilmesi hasarı görülmektedir.



Şekil 3.20. Akma türü kayma oluşum şekli (Uyanık, 2002)



Şekil 3.21. Akma göçmesi (Öztürk, 2016)

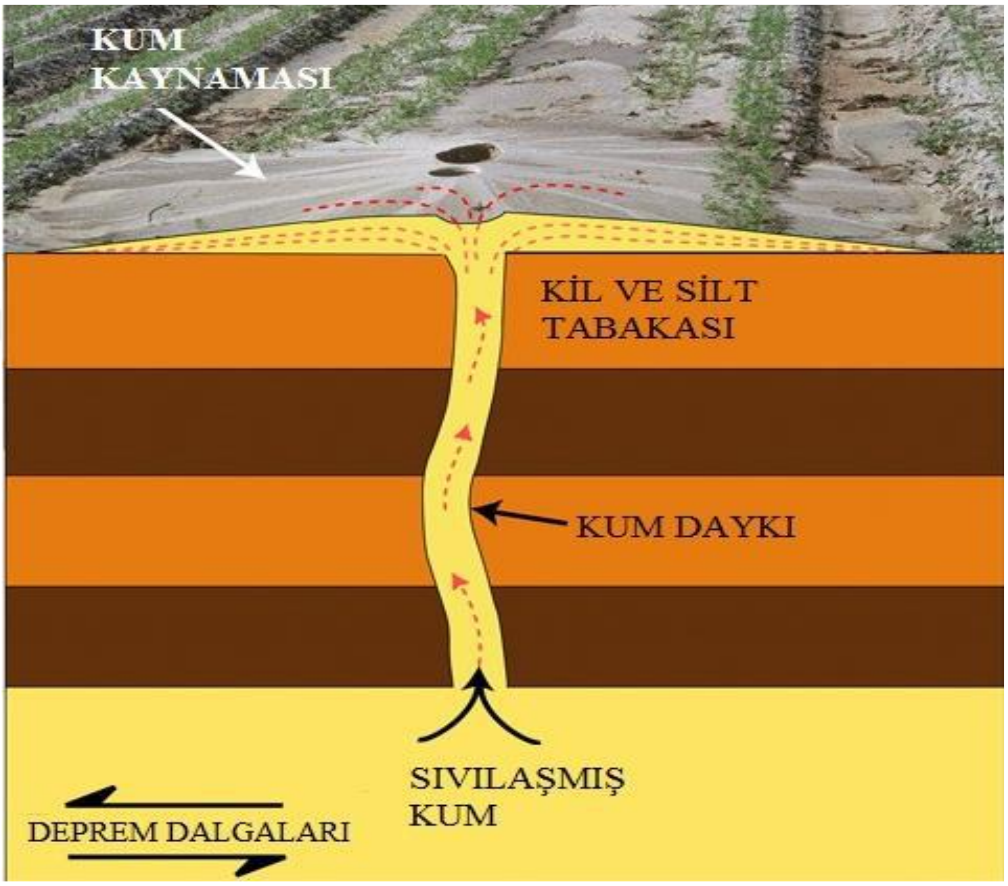


Şekil 3.22. The Lower San Fernando Barajında (1971) oluşan akma yenilmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

3.2.6.3. Kum kaynaması

Depremlerde sıvılaşma meydana geldiği zaman çok sık bir şekilde kum kaymaları görülebilmektedir. Sismik hareketlerden dolayı boşluk suyu basıncında oluşan yükselme ile hidrolik eğim değeri kritik bir değere ulaşabilmektedir. Böyle bir durumda efektif gerilme (σ') ya sıfırlanır ya da boşluk suyu basıncı (u) toplam gerilme (σ)'yi geçerek negatif bir değer alır ($\sigma' = \sigma$ – u). Bu durumda su borulanarak zemin

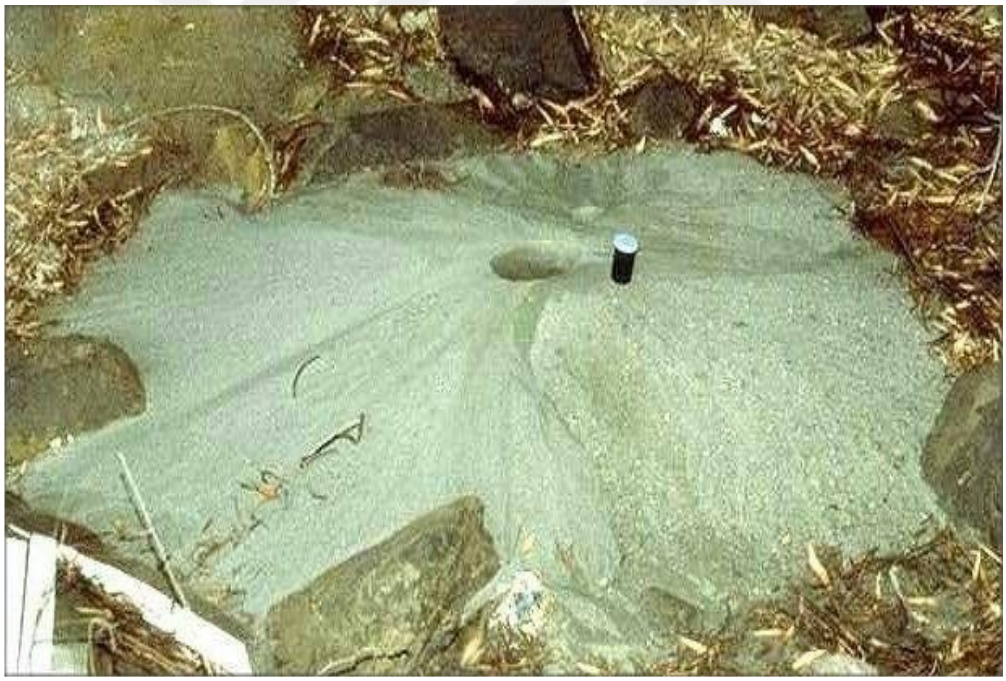
taneciklerinin yüzeye çıkmasına sebep olur. Kum kaynamaları olaylarına bakıldığında genel olarak bir yarık veya çatlak boyunca oluşur ve genellikle çökme türü hasarlar ortaya çıkar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Şekil 3.23.'te kum kaynaması, Şekil 3.24.'te kum konisi ve Şekil 3.25.'de kum volkanı olayı gösterilmişti.



Şekil 3.23. Sims ve Garvin'in kum kaynaması modeli (Sims ve Garvin, 2021)



Şekil 3.24. Loma Prieta depreminde oluşan kum konisi (Loma Prieta, 2021)

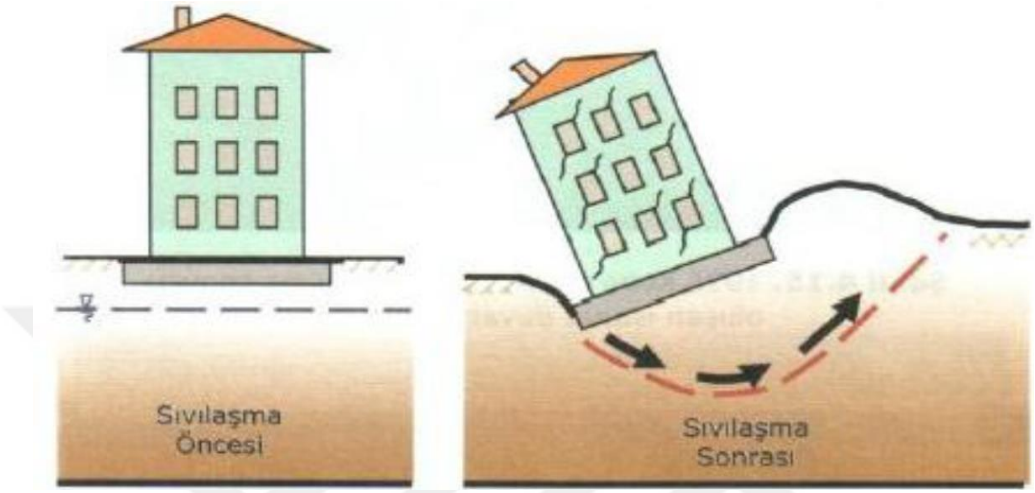


Şekil 3.25. Loma Prieta depreminde oluşan kum volkanı (Loma Prieta, 2021)

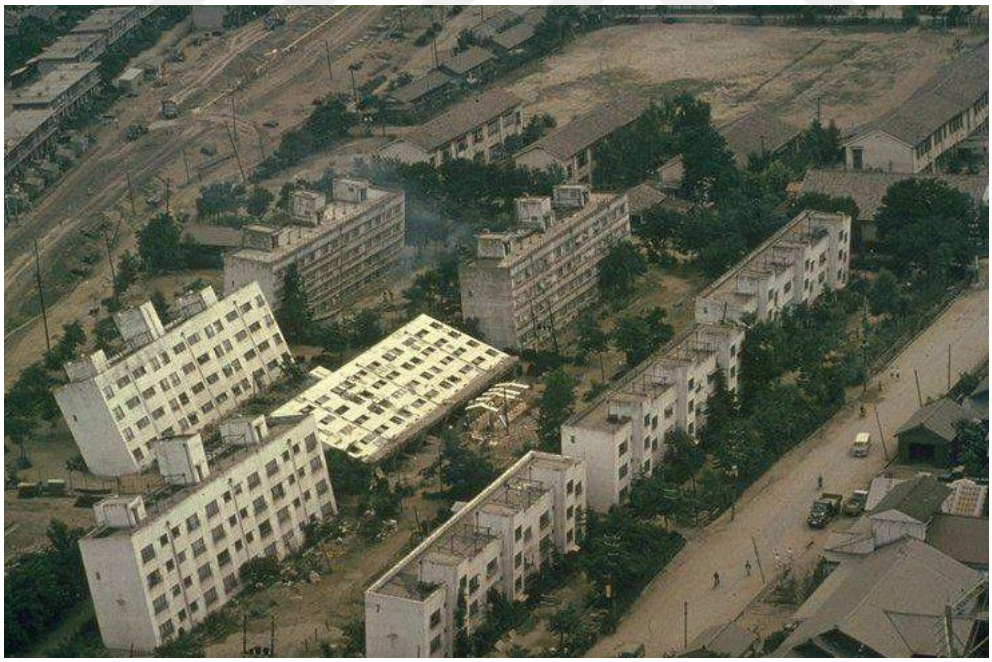
3.2.6.4. Taşıma gücü kayıpları

Sıvılaşma olduğunda, yapıların temelinden gelen yükler sağlam zemine aktarılamadığından yapılarda çeşitli hasarlar ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.26.'da hasar oluşumu gösterilmiştir. Zeminler taşıma gücünü kaybettiği zaman üzerindeki yapıların

yüklerini taşıyamaz, bundan dolayı da zemin taşıma gücü yok olur. Dolayısıyla bu yapılarda öne, arkaya veya yana yatma gibi hasarlar görülebilmektedir (Öztürk, 2016). Şekil 3.27., Şekil 3.28., Şekil 3.29. ve Şekil 3.30.'da taşıma gücü kayıplarından dolayı oluşan hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Taşıma kayıpları sonrasında ortaya çıkan durum (Doğan, 2015)



Şekil 3.27. Niigata depreminde sıvılaşmadan dolayı yapılarda ortaya çıkan yan yatmalar (Koç, 2007)



Şekil 3.28. 1999 İzmit Körfezi depreminde yan yatmış yapı (Demirtaş ve Erkmen, 2001)



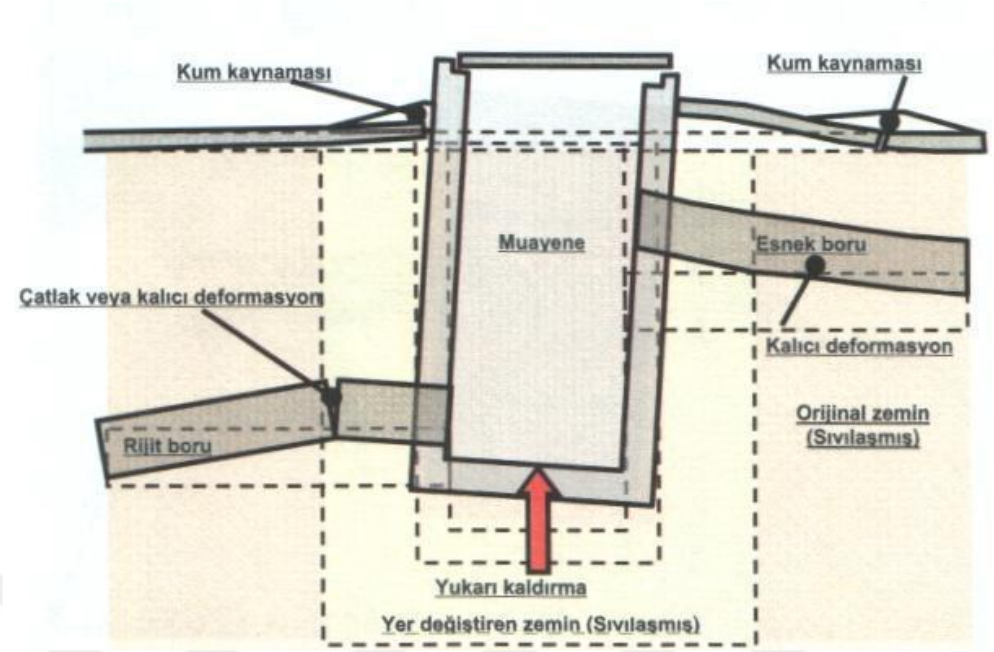
Şekil 3.29. 1999 Adapazarı depreminde taşıma gücü kaybından dolayı devrilen bina (Yasuda, 2004)



Şekil 3.30. Kocaeli'de taşıma gücü kaybından hasar görmüş silolar (Doğan, 2015)

3.2.6.5. Zemine gömülü olan hafif yapıların yükselmesi

Depremlerde sismik dalgaların etkisiyle boşluk suyu basıncının artması sonucu zemin içinde yüzeye yakın olan gömülü hafif yapılar, su şebekeleri, tank, kanalizasyon bacaları, boru vb. hafif gömülü yapılar yüzeye doğru yükselir. Şekil 3.31.'de ayrıntılı olarak bu durum gösterilmiştir. Şekil 3.32. ve Şekil 3.33.'te muayene bacalarının hasarları gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Gömülü yapıların sıvılaşma sonrası yüzeylenmesi durumu (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



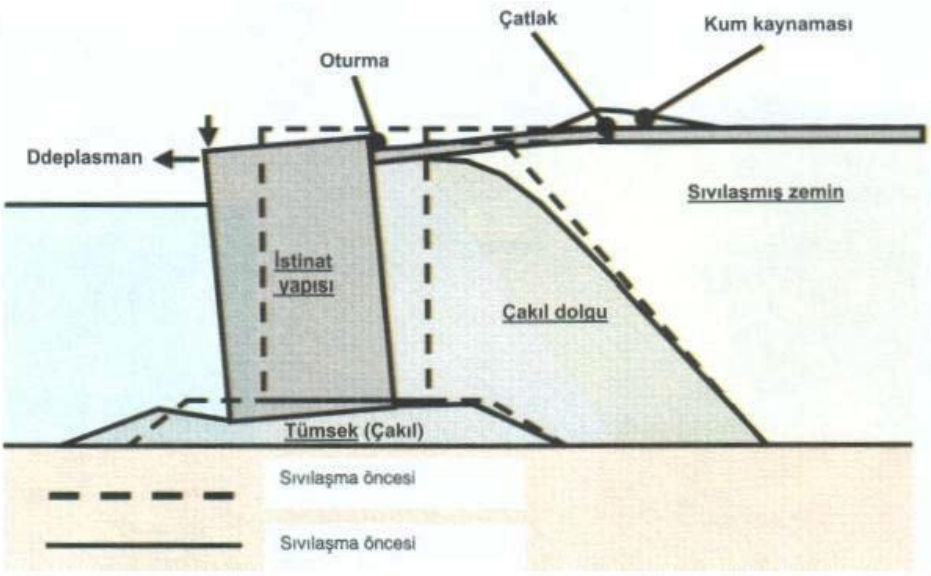
Şekil 3.32. Muayene bacasının zeminden yükselmesi durumu (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



Şekil 3.33. Niigata Chuetsu depremi (2004) sonucu muayene bacasında oluşan hasar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

3.2.6.6. İstinat yapısı yenilmesi

İstinat yapılarının arkasındaki zeminin sıvılaşması veya istinat yapısının oturduğu zeminde sıvılaşma meydana gelmesi durumunda artan yanal yükler istinat yapılarının yenilmelerine neden olur. Bu durumda istinat yapılarında çeşitli deplasmanlar görülür ve bu deplasmanlardan dolayı hasarlar ortaya çıkar (Tonaroğlu, 2006). Şekil 3.34.'te istinat yapısının yenilmesinin şematik gösterimi, Şekil 3.35., Şekil 3.36., Şekil 3.37. ve Şekil 3.38.'de istinat yapısının yenilmesinin sonrasında ortaya çıkan hasarlar görülmektedir.



Şekil 3.34. İstinat yapısının yenilme durumu (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



Şekil 3.35. 1995 Kobe depremi sonucu istinat duvarında meydana gelen hasar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



Şekil 3.36. 1995 Kobe depremi sonucu istinat duvarında meydana gelen hasar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



Şekil 3.37. 2003 Tokachi-oki depreminde istinat duvarında oluşan hasar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



Şekil 3.38. Avusturya'da meydana gelmiş bir istinat yapısının yenilmesi (Emiroğlu, 2018)

3.2.6.7. Zemin oturması

Deprem dalgaları yayılırken kum zeminlerde sıkıştırma işlemi yapmaktadır. Zeminin oturma şekli yüzeydeki zeminin sıkılığı ile ilgilidir. Kuru kumlarda oturma olayı deprem bitene kadar devam eder ayrıca çok hızlı bir şekilde sıkışma işlemi gerçekleşir. Kuru kumlardaki sıkılık değeri çevrim sayısına, genliğe ve yoğunluğuna bağlıdır (Silver ve Seed, 1971). Kuru kumlar ile suya doygun olan kumlu zeminler karşılaştırıldığında oturma işlemi için kuru kumlara daha az zaman gerektiği görülür (Güngör, 2007). Şekil 3.39., Şekil 3.40., Şekil 3.41. ve Şekil 3.42.'de zemin oturmasından dolayı ortaya çıkan hasarlar görülmektedir.



Şekil 3.39. Sıvılaşan kumlu zeminde kamyonun gömülmesi (Güngör, 2007)



Şekil 3.40. Kocaeli depreminde (1999) Adapazarı'nda oluşan farklı oturmalar (Ural, 2008)



Şekil 3.41. Adapazarı'nda tasıma gücü kaybından dolayı oluşan göçme durumu (Güngör, 2007)



Şekil 3.42. Van Depremi'nde (2011) meydana gelen zemin oturması (Van Depremi, 2021)

3.2.7. Zemin iyileştirme yöntemleri

Sıvılaşma sonucunda oluşabilecek can ve mal kayıplarını önlemek için zeminlerde iyileştirme işlemine gidilir. Zemin iyileştirilmesi yapılırken amaç zemindeki boşlukların azaltılması, kötü zeminin güçlendirilmesi ya da yeraltı su seviyesinin düşürülmesidir. Sorunlu zeminin kalınlığı, derinliği ve yayılımı ölçüldükten sonra çözüm için bir ya da birden fazla zemin iyileştirme yöntemi seçilebilir. Tasarım aşamasında zemin iyileştirme yönteminin zemin üzerindeki etkileri ve diğer zeminlere uygun olup olmadığının belirlenmesi önem taşımaktadır. YAS durumu, iyileştirilecek zeminin alanı ve derinliği, üzerine gelecek olan yapı, maliyet, mevcut yapılarla etkileşimi gibi faktörler zemin iyileştirme yöntemini seçmede etkilidir. Sıkıştırma (vibro sondalar, kum sıkıştırma kazıkları, dinamik kompaksiyon vb.), zemin güçlendirme (taş kolonlar, derin karıştırma, kompaksiyon enjeksiyonu, jet enjeksiyonu vb.) gibi çok sayıda zemin iyileştirme yöntemi mevcuttur (Öz, 2015). İnceleme alanında mevcut temel yer almaktadır bundan dolayı jet grout kolon metodu zemin iyileştirme yönteminin temel altına yapılması uygundur. Sıvılaşma olayında yapıların temelleri ile zemin arasındaki etkileşim önemli olduğu için direkt yapının temeli ve zemin ile olan bağlantısı önem arz etmektedir.

3.2.8. Sıvılaşma analizinde kullanılan laboratuvar deneyleri

Bir alanın sıvılaşma ihtimalinin değerlendirilmesi için birtakım deneyler mevcuttur. Dinamik üç eksenli, geniş ölçekli basit kesme, devirsel basit kesme kutusu, sarsma tablası ve burulmalı dinamik deneyi başlıca örnekler arasında gösterilebilir. Deneylerde çoğunlukla bir zemin tabakası için onu temsil eden küçük sonsuz bir eleman alınıp değerlendirme yapılır. Bu sebeple gerçek duruma kıyasla bire bir sonuçlar elde edilemese de yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Belirli yüklemelere maruz kalan zeminlerin nasıl tepki verecekleri genel olarak laboratuvar deneyleriyle elde edilebilir ancak alternatif olarak zeminlerin tepkisi arazi deneyleriyle de bulunabilmektedir. Sıvılaşma analizi için yapılan laboratuvar deneylerinde önemli kohezyonsuz zeminler için numune alma işlemi sırasında numuneyi örselememek oldukça önemlidir. Numune almanın zorlukları dışında numunelerde oluşabilecek

herhangi bir örselenme, sıvılaşma durum değerlendirmesini oldukça etkilemektedir. Laboratuvar deneylerinde birtakım sorunlar oluşabilir; numunenin örselenmesi, gerilme durumunun değişmesi, zeminden sonsuz küçük bir parçanın alınmasıyla ölçeğin söz konusu olması gibi durumlar örnek olarak gösterilebilir. (Yatman, 2006).

3.2.8.1. Dinamik üç eksenli deney

Üç eksenli deneyde, zeminden alınan numune üzerinde depremden önceki zemin koşullarında ortaya çıkan konsolidasyona müsaade edilir. Numune üzerine tekrarlı deviatorik gerilme uygulanarak dinamik kaymanın ortaya çıkması sağlanır. Sıvılaşma olayı, sıvılaşma dayanımının oluşan tekrarlı kayma gerilmesinin (τ_{eq}) altında kalmasıyla ortaya çıkar. Yapılan çalışmalar sonucunda τ_{eq} değerine Denklem 3.4 ile ulaşılmıştır (Seed ve Peacock, 1977).

$$\tau_{eq} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_0 \, r_d \qquad (3.4)$$

Denklem 3.4'te, $\tau_{eq,}$ tekrarlı kayma gerilmesini, σ_o, toplam gerilmeyi, g, yerçekimi ivmesini, $a_{max,}$ maksimum deprem ivmesini, r_d, gerilme azaltma katsayısını ifade etmektedir.

Genel olarak modifiye edilmiş bir yöntem kullanılmaktadır. Denklem 3.5 ile deprem esnasında zemin tabakasında ortaya çıkabilecek tekrarlı gerilme oranı elde edilebilmektedir (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR = \frac{\tau_{eq}}{\sigma_0'} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} r_d \qquad (3.5)$$

Denklem 3.5'de, τ_{eq}, tekrarlı kayma gerilmesini, σ_{vo}, toplam düşey gerilmeyi, σ_{v0}', toplam efektif düşey gerilmeyi, g, yerçekimi ivmesini, a_{max}, maksimum deprem ivmesini, r_d, gerilme azaltma katsayısını ifade etmektedir.

Liao ve Whitman (1986), gerilme azaltma katsayısının (r_d) derinlikle bağlantılı olarak değiştiğini Denklem 3.6 ve 3.7'de açıklamışlardır.

$r_d = 1 - 0.00765 * z$ ($z \leq 9{,}15$ metre) (3.6)

$r_d = 1.174 - 0.0267 * z$ ($9{,}15$ metre $\leq z \leq 23$ metre) (3.7)

Denklem 3.6 ve 3.7'de, z, zemin yüzeyinden itibaren derinliği (metre) ifade etmektedir (Erken ve ark, 2004).

3.2.8.2. Dinamik burulmalı kesme deneyi

Silindirik zemin numuneleri üzerine burulma yükleri yüklenerek, dinamik basit kesme deneyi ve dinamik üç eksenli deneyde karşılaşılan zorlukların birçoğunun önüne geçilebilmektedir. İzotropik ve anizotropik başlangıç şartlarının yerine getirilmesi ve yatay düzlemler boyunca tekrarlı kayma gerilmelerinin uygulanması, dinamik burulmalı kesme deneyleri ile yapılabilmektedir. Dinamik burulmalı kesme deneyleri sönüm ile rijitlik özelliklerinin bulunmasında, geniş bir aralıkta olan deformasyon seviyelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kramer, 1996). Yatay düzlemlerde ortaya çıkan tekrarlı kayma gerilmeleri zeminlere tekrarlı burulma uygulanmasıyla azaltılır (Ertek, 2015).

3.2.8.3. Devirsel basit kesme kutusu deneyi

Bu deneyde zeminde ortaya çıkan sismik yüklere oldukça yakın değerler elde edilmektedir. Doygun olan kum numunesi üzerinde yapılan deneyde düşey yönlü efektif gerilmenin uygulanmasının ardından devirsel kayma gerilmesi numuneye uygulanır. Sıvılaşma olayına yol açan kuvvet; geçerli τ kuvveti, devir sayısı ile başlangıçtaki σ' büyüklüğü ile ilişkilidir (Duman, 2013).

3.2.8.4. Sarsma tablası deneyi

Sarsma tablaların birçoğu tek yönlü hareket için yapılırken son zamanlarda çok yönlü hareket için sarsma tablaları geliştirilmiştir. Sarsma tablalarında sistem genelde servo-hidroliklerle yapılmaktadır. Sarsma tablası deneyinde hidrolik pompalar

yardımıyla dinamik yükleme kapasiteleri kontrol edilir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar kullanılarak sıvılaşma analizleri yapılabilmektedir (Yatman, 2006).

3.2.8.5. Geniş ölçekli basit kesme deneyi

Bir sarsma tablasının üzerine kum numuneler bırakılarak deney yapılır. Deneyde drenajı engellemek amacıyla kum üstüne kauçuk malzemesinden yapılmış olan membran konulur. Ayrıca W' ye ihtiyaç olduğundan düzeneğe bir kütle de yerleştirilir.

Sarsma tablasının yaptığı hareketler ile kumlarda tekrarlı gerilme durumları meydana gelmektedir. Tekrarlı kayma gerilmesi Denklem 3.8 ile bulunmaktadır.

$$\tau_h = \frac{W}{g\ x\ am} \qquad (3.8)$$

Denklem 3.8'de, W, eylemsizlik kütlesi ile numunenin kütlesinin tabana yaptığı toplam basıncı, am, üniform olan tekrarlı hareketin pik ivmesini ve g, yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

Geniş ölçekli basit kesme deneyi sonuçlarına göre aşağıdaki çıkarımlarda bulunulabilir.

-Başlangıç durumu için D_r < %45 olursa bu durumda sıvılaşma oluşacaktır.

- Başlangıç durumu için D_r > %45 olursa zeminde çevrimsel hareketlilik durumu (sınırlı uzama potansiyeli) ortaya çıkar (Alparslan, 2006).

3.2.9. Sıvılaşma analizinde kullanılan arazi testleri

Sıvılaşma potansiyelinin hesaplanmasında (genellikle zeminin doğal haldeki durumunu değerlendirmek için) arazi testleri tercih edilen yöntemler arasındadır. Arazi testlerinden en sık kullanılanları SPT ve CPT'dir. Sıvılaşma potansiyeli bulunurken bu testler sayesinde zeminin tabaka değişiminin görülme imkânı mevcuttur. Bu yöntemlerin avantajlarından dolayı pek çok korelasyon ortaya çıkmıştır. SPT, ve CPT'nin yapılamadığı yerlerde, kayma dalga hızı (Vs) ile sıvılaşma

potansiyeli değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Ayrıca Becker Penetrasyon Testi kullanılarak da sıvılaşma analizleri yapılabilmektedir (Öztürk, 2016).

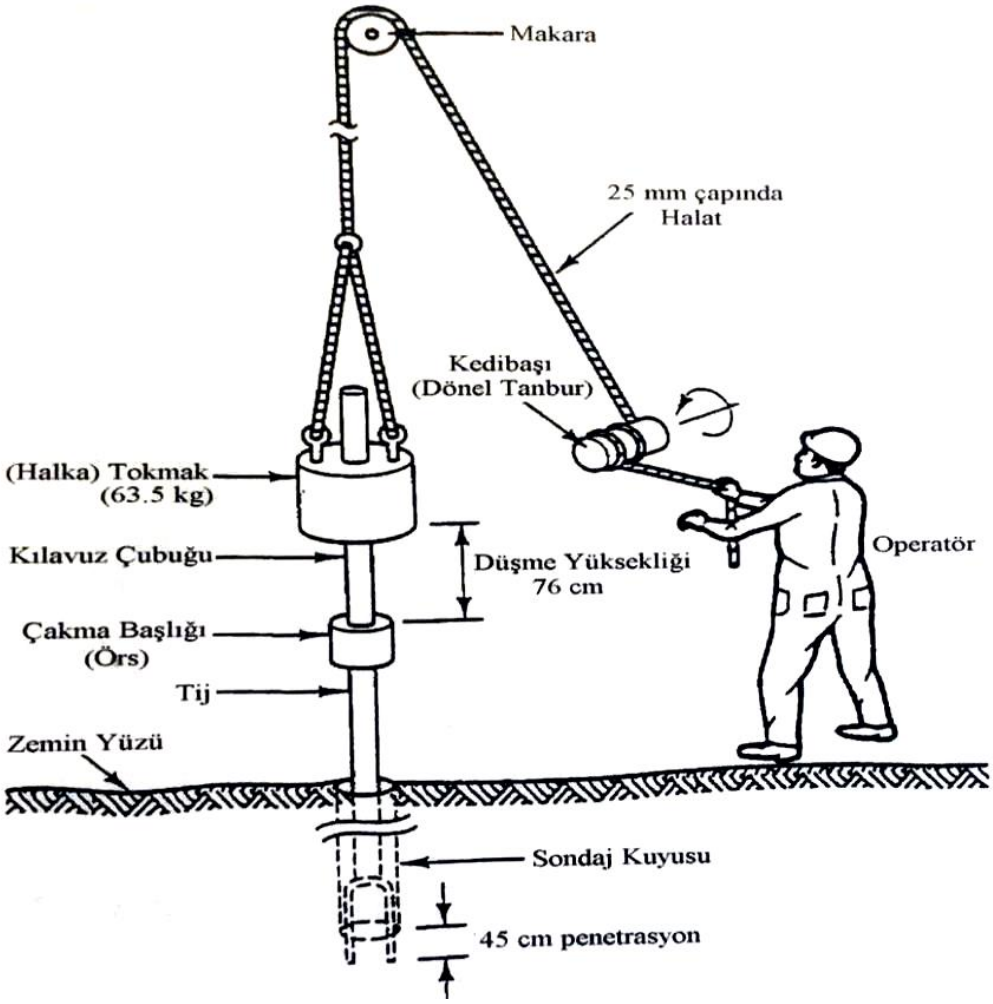
3.2.9.1. SPT

Geoteknik mühendisliğinde standart penetrasyon testi çok sık bir şekilde kullanılır. SPT diğer arazi testlerine göre bazı üstünlüklere sahiptir. Testte kullanılan numune alıcı, tokmak, tij vs. mekanik ekipmanları daha dayanıklı ve basittir. SPT kuyu içine kolayca uygulanabildiğinden maliyeti diğer testlere göre daha azdır ve zeminden numune alma imkânı da sağlamaktadır. Bütün yeraltı suyu seviyelerinde ve zemin gruplarında yapılabilmektedir. SPT-N ile sıvılaşma riski, temel tasarımı ve zemin özellikleri arasında birçok korelasyon bulunmaktadır. SPT çok ince çakıllı, temiz ince orta kumlarda ve az siltli kumlar üzerinde yapıldığında uygun sonuçlar verirken kaba dane oranı arttıkça ortaya çıkan sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir (Sivrikaya ve Toğrol, 2019).

3.2.9.2. SPT' nin yapılışı

SPT 63.5 kilogramlık bir ağırlığa sahip tokmağın 76.2 santimetre yükseklikten bırakılmasıyla, ucun 30.5 santimetre derinliğe gömülmesi için yapılan vuruşların sayılması ile yapılır, Şekil 3.43.'de şematik gösterimi verilmiştir. SPT doğru bir şekilde yapılmazsa birçok hata ile karşılaşılabilir. Örneğin yapılan vuruşlarda düşüş için gerekli enerjinin aktarılmaması, operatörün etkisi testi etkileyebilmektedir. Sondaj çubuklarının ağrılığının artmasından dolayı uygulama derinliği olarak 30 metre, daha hassas sonuçlar için ise 20 metreyi geçmemelidir. SPT'de ortalama çap 2 santimetreyi geçtiği zaman (taş veya büyük çakıllı zeminler) hatalı sonuç doğurabilecek bir durum ortaya çıkmaktadır. Tamamen yanıltıcı değerler veren bu zeminlerde deney yapılacak ise bu durumun önüne geçilmesi için çakıllı zeminlerde önerilen uçların kullanılması gereklidir. Güvenli tokmağın veya halkanın kaldırılıp tekrar bırakılması için genel olarak halat ve kedi başı yöntemi kullanılmaktadır. Halat kedibaşına sarılır tokmak bu sayede kaldırılıp bırakılır. Bu hareketle numune alıcı zemine gömülür. Numune alıcı toplamda 45 santimetre gömülür, her 15 santimetrede yapılan vuruşlar kaydedilir, ilk

15 santimetrede yapılan vuruşlar sayılmaz diğer vuruşlar toplanarak SPT-N değeri elde edilmiş olur. Çakma işlemi tamamlandıktan sonra numune alıcının içindeki numuneler alınır bu sayede laboratuvarda istenilen deneyler yapılabilir (Sivrikaya ve Toğrol, 2019).



Şekil 3.43. Standart penetrasyon testinin yapılışı (Coduto, 1994)

3.2.9.3. SPT-N_{arazi} değerinin düzeltilmesi ve düzeltme faktörleri

SPT-N (ölçülen darbe sayısı) N_{60} ya da $N_{1,60}$ olarak düzenlenir, sıvılaşma analizi buna göre yapılır. En genel şekilde düzeltmeler Denklem 3.9 ve 3.10'daki gibidir (Skempton, 1986).

$$N_{60} = 1{,}67\ E_m\ C_b\ C_r\ N \quad (3.9)$$

$$N_{1,60} = N_{60}\ C_N \quad (3.10)$$

Denklem 3.9 ve 3.10'da, N_{60}, tokmak serbest düşme enerjisinin %60'ına göre (teorik olarak) düzeltilmiş vuruş sayısı, $N_{1,60}$, tokmak serbest düşme enerjisinin %60'ına ile efektif basınca göre düzeltilmiş vuruş sayısı, N, arazide ölçülen SPT vuruş sayısını, E_m, şahmerdan etkinliğini, C_b, sondaj çapı düzeltme katsayısını, C_r, tij uzunluğu düzeltme katsayısını ve C_N örtü basıncı düzeltme katsayısını ifade eder.

- **E_m, Şahmerdan etkinliği**

A.B.D. ekipmanı için güvenli şahmerdanlarda E_m=0.6 iken halka çeşidi şahmerdanlarda E_m=0.45 olarak kullanılmaktadır.

- **C_b, Sondaj çapı düzeltme faktörü**

11.4 santimetreden daha büyük çaplı sondajlar için ölçülmüş olan SPT-N sayılarında düzeltmeler yapılmalıdır. Sondaj kuyularındaki çap 11.4 santimetreden büyük olması durumunda ortaya gerilme boşalması çıkmaktadır. Bundan dolayı SPT-N değeri çıkması gereken değerden daha küçük çıkacaktır. Bu durumu düzeltmek için değeri büyüten katsayılar ile düzenleme yapılır. Çizelge 3.3.'de bu katsayılar görülmektedir (Mollamahmutoğlu ve Kayabalı, 2004).

Çizelge 3.3. Sondaj çap düzenleme katsayıları (Skempton, 1986)

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

- **C_r, Tij uzunluğu düzeltme faktörü**

SPT kaşığına (numune alıcı) aktarılan enerji belli bir orana kadar tijin uzunluğuna göre değişebilmektedir. Tij uzunluğu düzeltilme işlemi için 0-4 metre arasında 0,75; 4 metre-6 metre arasında 0,85; 6 metre-10 metre arasında 0,95; 10 metre ve sonrası için 1,00 olarak alınır.

- **C_N, Örtü basıncı düzeltme faktörü**

Kum gibi ayrık taneli zeminlerin çevre basınçları fazlasıyla penetrasyon direncini etkilemektedir. Aynı kum zeminde değişik derinliklerde yapılan SPT uygulamasında derinlik arttıkça vuruş sayısında bir artış görülecektir. Çevre basıncı etkileri için C_N değeri ile N_{60} değerleri çarpılır. Düşey efektif gerilmenin durumuna göre 2 durum söz konusudur, bunlar;

-Hesaplanan düşey efektif gerilmenin 200'den küçük olması halinde Liao ve Whitman (1986) tarafından önerilen C_N Denklem 3.11 gibi hesaplanır;

$$C_N = \sqrt{\frac{Pa}{\sigma' vo}} \leq 1{,}70 \qquad (3.11)$$

-Hesaplanan düşey efektif gerilmenin 200'den büyük olması halinde Kayen ve ark. (1992) tarafından önerilen C_N Denklem 3.12 gibi hesaplanır;

$$C_N = 2.2/(1.2+\frac{\sigma' vo}{Pa}) \qquad (3.12)$$

Denklem 3.11 ve 3.12'de, Pa, yaklaşık 100 kPa, $\sigma' vo$, düşey efektif gerilmeyi (Pa ile birimi aynı) ifade etmektedir.

3.2.10. SPT ile sıvılaşma analizi

Suya doygun olan gevşek zeminlerde (düşük rölatif sıkılığı olan) deprem anında sıvılaşma gerçekleşebilir. Sıvılaşma riskini belirlemek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların başında "Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranı Kriterleri" yöntemi gelir. Bu kriterde sıvılaşma olayına karşı güvenlik katsayısı (G_s) Denklem 3.13'te gösterildiği şekilde elde edilir:

$$G_s = \frac{CRR}{CSR} \qquad (3.13)$$

Denklem 3.13'te, CRR, tekrarlı mukavemet oranını, CSR, tekrarlı gerilme oranını ifade etmektedir.

Bu yöntemde güvenlik katsayısı, $G_s \geq 1.2$ olması halinde sıvılaşmanın meydana gelmeyeceği, $1 \leq Gs < 1.2$ olması halinde sıvılaşma riskinin mevcut olduğu, $G_s < 1$ olması

halinde ise sıvılaşmanın kaçınılmaz bir durum olduğu ifade edilir. Sıvılaşma potansiyelini belirlemek için en yaygın olarak kullanılan uygulamalardan biri SPT yöntemidir. Seed ve Idriss'in (1971) önermiş olduğu yöntem sadeleştirilmiş yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntemde işlemler aşağıdaki sıra ile yapılmaktadır.

- ✓ **Uygun zemin tipi:** İlk adım olarak zeminin tipinin sıvılaşmaya elverişli olup olmadığına bakılır.
- ✓ **Yeraltı su seviyesi:** Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için zeminin YAS altında kalması gerekmektedir. Bir diğer durum ise ileride herhangi bir zamanda YAS'ın yükselmesi ile zeminin YAS altında kalma ihtimaline karşı sıvılaşma analizinin yapılabileceğidir.
- ✓ **Deprem kaynaklı CSR:** Söz konusu zeminin yukarıdaki iki şartı sağlaması durumunda basit yöntem kullanılabilmektedir. Sadeleştirilmiş olan yöntemde ilk aşama olarak CSR (Tekrarlı gerilme oranı) hesaplanır.
- ✓ **SPT'den CRR elde edilmesi:** SPT deneyi kullanılarak zeminin CRR değeri belirlenebilir. Deprem kaynaklı CSR'nin SPT'den elde edilen CRR'den yüksek olması durumunda depremde sıvılaşmanın gerçekleşmesi beklenmektedir.
- ✓ **Gs, Güvenlik katsayısı:** En son adım olarak ise Gs değeri Denklem 3.13'e göre hesaplanır sıvılaşmanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği belirlenir.

Seed ve ark. (1985) SPT deneyinden hareketle arazi performans verilerine göre potansiyel hasar durumu için 3 durum belirlemişlerdir. Çizelge 3.4.'te sıvılaşma ile SPT ilişkisi verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sıvılaşma ile SPT ilişkisi (Seed ve ark., 1985)

$N_{1,60}$	Potansiyel Hasar
>30	Önemsiz
20-30	Orta
0-20	Yüksek

$N_{1,60}$ > 30 olması durumunda zemin kum ya çok katı ya da sıkı bir şekildedir. $N_{1,60}$ < 20 olması durumunda ise zemin sıkı ve orta kumların arasında kritik bir durumdadır.

3.2.10.1. Tekrarlı gerilme oranı (CSR)

Deprem oluştuğu zaman, zemin sıvılaşmaya yatkın ve yeraltı suyu da zemin seviyesi üstünde ise CSR hesabı Denklem 3.14'teki gibi yapılabilir (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR = \frac{\tau_{tek}}{\sigma_0'} = 0.65\ r_d\ (\frac{a_{max}}{g})(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'}) \quad (3.14)$$

Denklem 3.14'te, $a_{max,}$ maksimum yer ivmesini (m/s^2), τ_{tek}, deprem kaynaklı uniform olan tekrarlı kayma gerilmesini, σ_{V0}' , düşey efektif gerilmeyi (kPa), σ_{V0} , toplam düşey gerilmeyi (kPa), g, yerçekimi ivmesini (m/s^2), r_d, derinlik azaltma faktörünü (gerilme azaltma katsayısı) (boyutsuz) ifade eder.

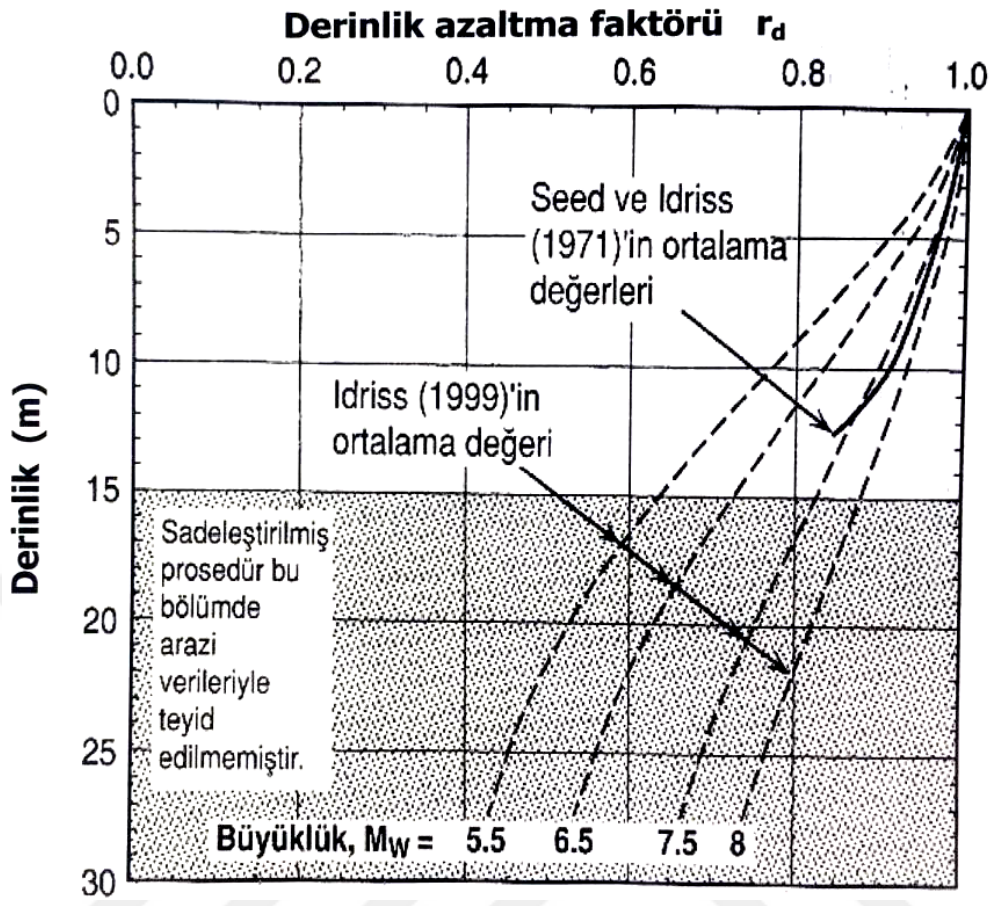
- **Derinlik azaltma faktörü, r_d**

Derinlik azaltma faktörü, diğer ismiyle gerilme azaltma katsayısı r_d pratik olarak Şekil 3.44.'ten Seed ve Idriss'in (1971) eğrilerinden ortalama değer olarak elde edilebilir (Sivrikaya ve Toğrol, 2019).

Derinlik azaltma faktörü için bir diğer pratik yol ise Denklem 3.15'te verilmiştir (Kayen ve ark, 1992).

$$r_d = 1\text{-}0{,}012\ z \quad (3.15)$$

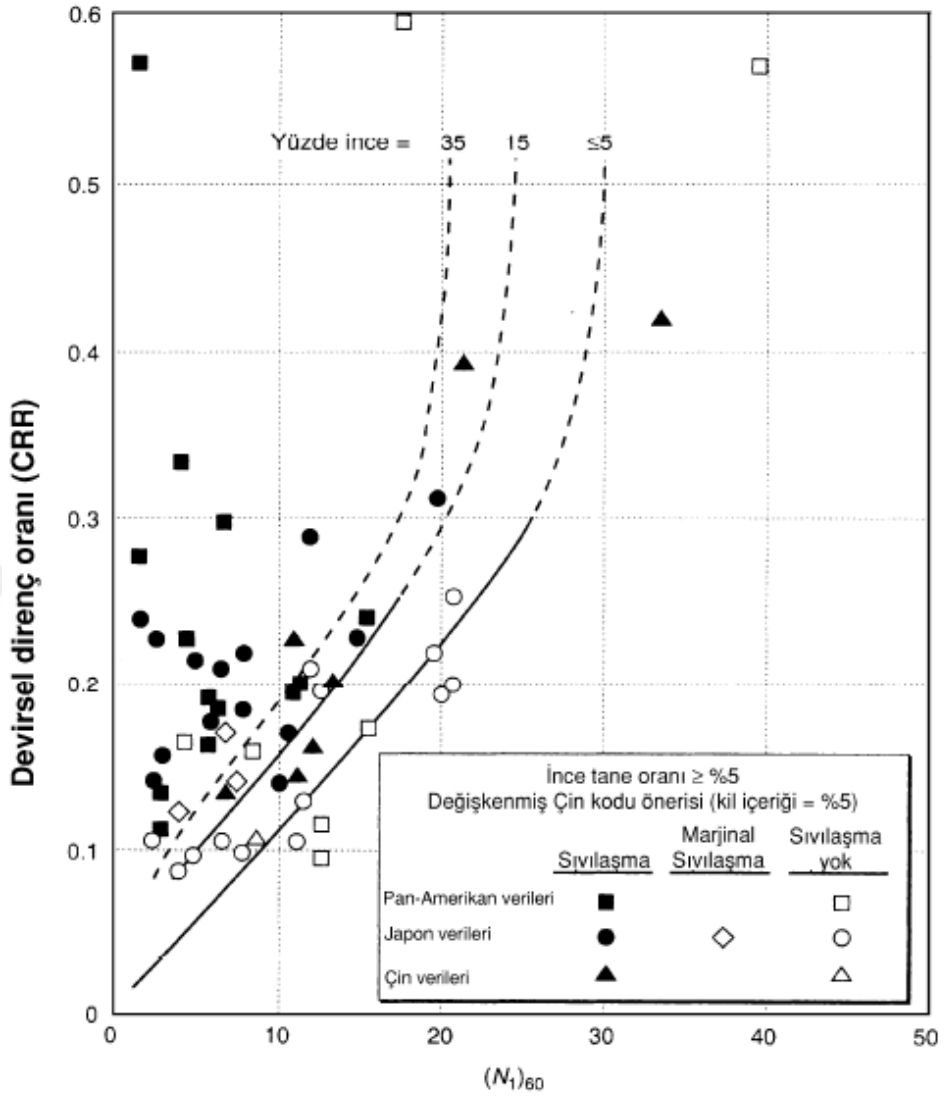
Denklem 3.15'te z, derinliği (metre) ifade etmektedir.



Şekil 3.44. Derinlik azaltma faktörü (Andrus ve Stokoe, 2000)

3.2.10.2. Tekrarlı mukavemet oranı (CRR)

Arazide ölçülen tekrarlı mukavemet oranı zeminin sıvılaşmaya karşı direncini ifade eder. CRR değeri standart penetrasyon deneyinde SPT-N sayısı ile belirlenir.



Şekil 3.45. $N_{1,60}$ değerinden CRR elde etme (Seed ve ark., 1985)

Şekil 3.45.'te CRR'nin elde edilmesini sağlayan bir grafik yer almaktadır. Bu grafik depremde sıvılaşmamış ya da sıvılaşmış pek çok yerde yapılan çalışmalara dayanarak geliştirilmiştir. Grafikte kullanılan verilerin birçoğunda deprem büyüklüğü 7.5 civarındadır. %5-15-35 ince dane sınırları grafikte sunulmuştur. Grafikte yer alan çizgiler yaklaşık sınırları temsil etmektedir. Çizginin solunda yer alan zeminler genelde sıvılaşan zemin, sağında yer alan zeminler ise genelde sıvılaşmayan zeminler olarak kabul edilmektedir. CRR bulunurken aşağıdaki adımlar uygulanır:

- **SPT-$N_{1,60}$ değeri:** Şekil 3.45.'te düşey eksen CRR değerini yatay eksen ise $N_{1,60}$ değerini göstermektedir. Sıvılaşma analizi yapılması için SPT-N değerinden $N_{1,60}$ değeri elde edilir.
- **İnce dane yüzdesi:** Zeminin ince dane yüzdesi elde edilir. Yapılan çalışmalarda $N_{1,60}$ değeri aynı olduğu halde ince dane yüzdesinin farklı olmasından dolayı farklı CRR değerlerine ulaşılmıştır.
- **7.5 Büyüklüğündeki muhtemel bir deprem için CRR değeri:** Elde edilen $N_{1,60}$ değeri ile ince dane yüzdesini kullanarak Şekil 3.45.'teki grafik yardımıyla 7.5 büyüklüğünde muhtemel bir deprem için CRR değeri elde edilir.
- **Diğer büyüklükteki depremler için:** Şekil 3.45.'teki grafik 7.5 büyüklüğündeki deprem için hazırlanmıştır. Sıvılaşma analizinde son etken olarak deprem büyüklüğü kullanılmaktadır. Yer sarsıntılarının süresi deprem büyüklüğüne göre artmaktadır. Deprem büyüklüğü 7.5 'den farklı bir deprem büyüklüğü için CRR değeri Denklem 3.16'da yer alan büyüklük ölçek faktörü (BÖF) ile çarpılır.

7.5 büyüklüğündeki deprem için $N_{1,60}$ değerinin 30'dan fazla olması halinde temiz kumda sıvılaşmanın gerçekleşmeyeceği kabul edilir. Farklı bir deprem söz konusu ise büyüklük ölçek faktörleri Denklem 3.16'daki gibi kullanılacaktır (Youd ve ark., 2001).

$$\text{BÖF} = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \qquad (3.16)$$

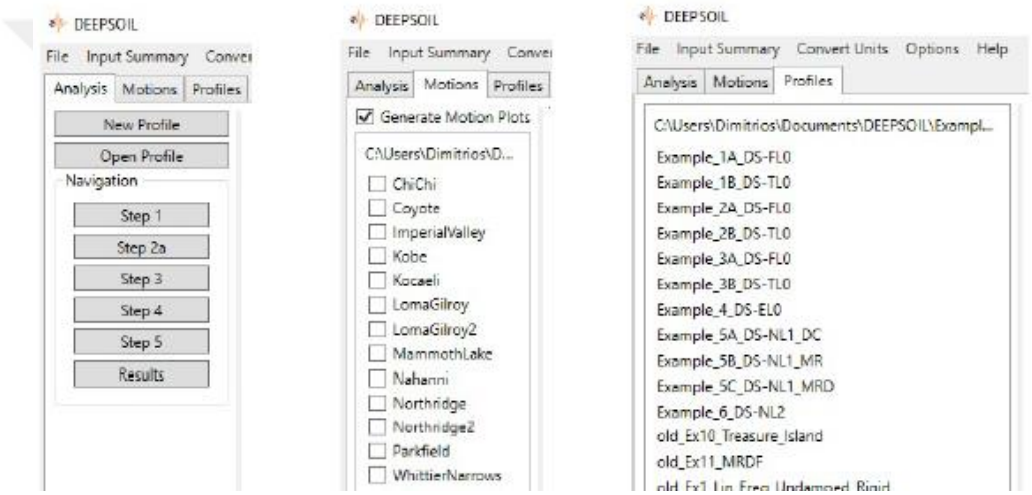
Denklem 3.16'da Mw, deprem moment büyüklüğünü ifade etmektedir.

3.2.11. DEEPSOIL programı

Bu tez çalışmasında sismik saha tepkilerini elde etmek için DEEPSOIL (2020) programı kullanılmıştır. DEEPSOIL (2020), çok aşamalı olan bir boyutlu sismik saha tepki analizi yapabilen gelişmiş seviyede bir programdır. DEEPSOIL (2020) programıyla gerçek deprem ivmeleri kullanılarak PGA değerleri elde edilebilmektedir.

DEEPSOIL (2020) programının açılış kısmında Şekil 3.46.'daki gibi bir ekran görüntülenir. Bu ekranda "Analysis" bölümünde "New Profile" kısmından yeni bir

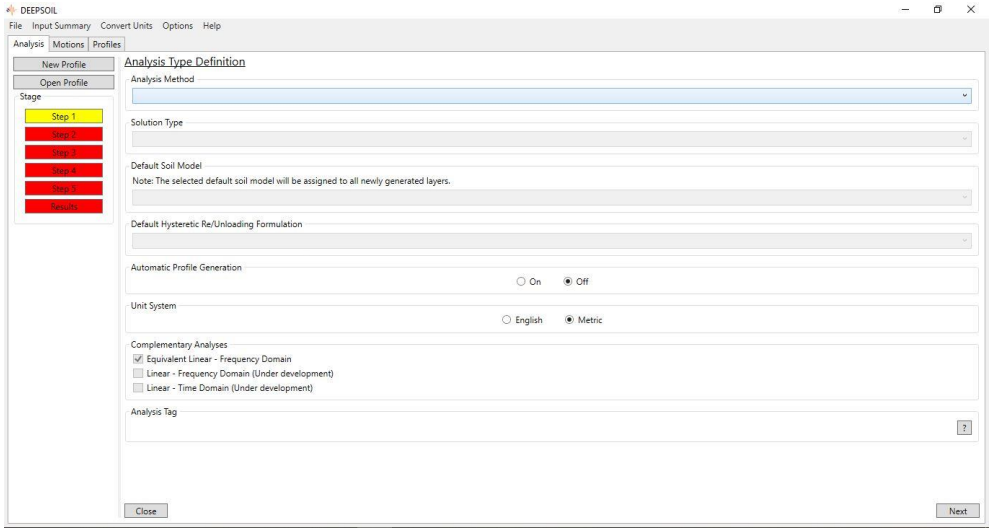
analiz için başlangıç yapılabilir. “Open Profile” kısmından mevcut bir analiz çalışmasına ulaşma imkânı sunulmaktadır. “Navigation” bölümüyle de analizin adım adım takip edilebileceği bir sekme yer almaktadır. Ortada yer alan “Motions” sekmesinde deprem verilerine göre ana kayanın girdi hareketleri gösterilir. Bir ana kayanın hareketi aktifken “View” kısmından, seçilen herhangi bir hareket için programın çizdiği ivme, hız, yer değiştirme, Fourier genlik spektrumu ve tepki spektrumu grafiksel olarak görülebilir. “Profiles” kısmında daha önce kaydedilmiş analiz çalışmaları yer almaktadır. DEEPSOIL (2020) programında toplamda 5 adımda çözüme gidilebilmektedir (Hashash ve ark., 2020).



Şekil 3.46. DEEPSOIL (2020) programı giriş ekranı (Hashash ve ark., 2020)

3.2.11.1. Analizin tanımlanması

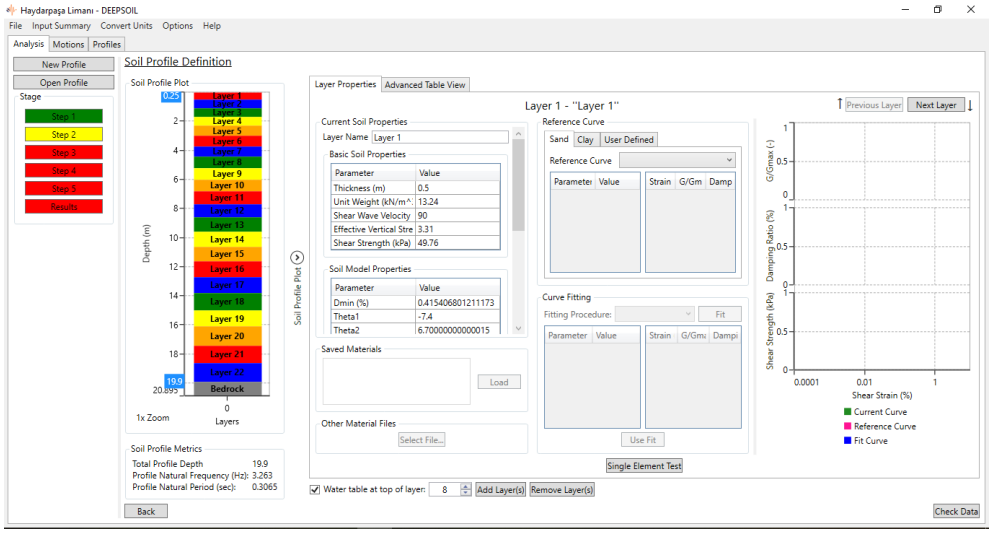
DEEPSOIL (2020) programında ilk adım olarak kullanılacak analiz yönteminin programa tanımlanması gereklidir. Analizler yapılırken frekans ve zaman tanım seçenekleri mevcuttur. Frekans tanım bölümünde doğrusal analiz ve eş doğrusal analiz imkânı mevcutken, zaman tanım alanında ise doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analizlerin yapılma imkânı vardır (Hashash ve ark., 2020). Şekil 3.47.’de analiz tanımlama ekranı görülmektedir.



Şekil 3.47. Analiz tanımlanma ekranı

3.2.11.2. Zemin profilinin tanımlanması

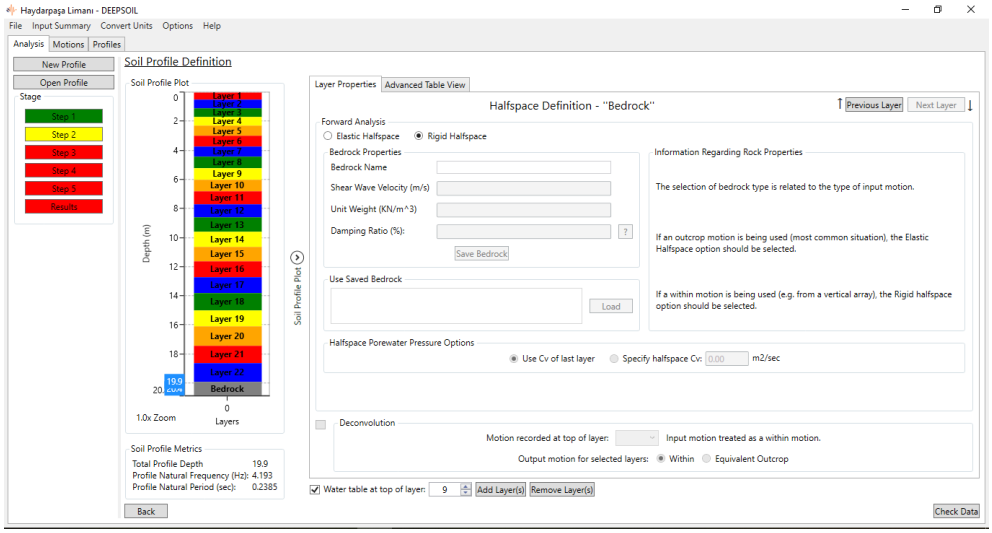
Bu aşamada zemin profili oluşturulmakta ve tabakaların özellikleri programa tanımlanmaktadır. Pencerenin sol kısmında girilen katmanlardan sonra zemin profilinin bir görüntüsü ortaya çıkmaktadır. Pencerenin sağ kısmında ise zemin profilinin parametrelerinin düzenlendiği kısım yer almaktadır. İlk adımda seçilen analiz türüne göre bütün tabakaların zemin özelliklerin girilmesi gerekmektedir. "Reference Curve" alanından zemin tabakalarının sönümleme, kayma mukavemeti ve modül azalım eğrilerinin çizilmesi için G/G_{max} ile sönüm değerlerinin programa tanımlanması gerekmektedir. "User Defined" sekmesinden kullanıcının kendisi G/G_{max} ile sönüm değerlerini manuel olarak girebilmektedir. Model seçildikten sonra "Curve Fitting" bölümünden azaltma faktörü seçilip zemin eğrileri oluşturulmaktadır. Pencerenin aşağısında ise katman sayısı ve yeraltı suyu seviyesinin düzenlendiği bölüm yer almaktadır. Burada "Add Layer(s)" kısmından yeni bir katman eklenebilir, tam tersi durum için ise "Remove Layer" seçeneği kullanılabilir. Yeraltı su seviyesinin hangi katmandan itibaren başladığı "Top of Layer" bölümünden katman sayısı girilerek programa tanımlanmaktadır (Hashash ve ark., 2020). Şekil 3.48.'de zemin profili tanımlama ekranı sunulmuştur.



Şekil 3.48. Zemin profili tanımlama ekranı

- **Ana kaya tipi ve özellikleri**

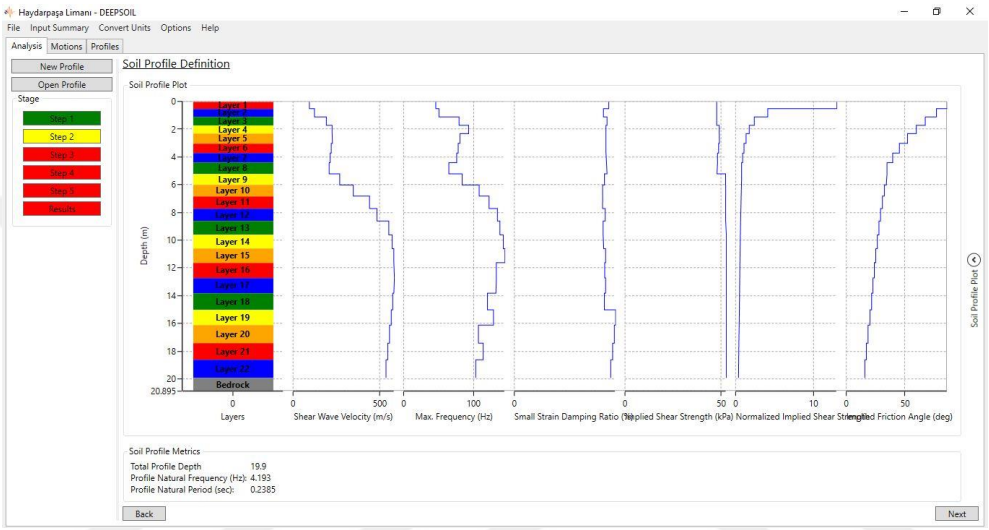
Zemin profili tanımlandıktan sonra ana kayanın özelliklerinin tanımlandığı aşamaya geçilir. Şekil 3.49.'de ana kaya özelliklerinin tanımlandığı bölüm yer almaktadır. Rijit ve elastik olmak üzere toplamda iki tip ana kaya modeli mevcuttur. Ana kaya özellikleri girildikten sonra "Bedrock Name" kısmına bir isim verilip ardından "Save Bedrock" butonuna tıklanarak veriler kaydedilebilmektedir.



Şekil 3.49. Ana kaya tipi ve özellikleri ekranı

- **Zemin profil özeti**

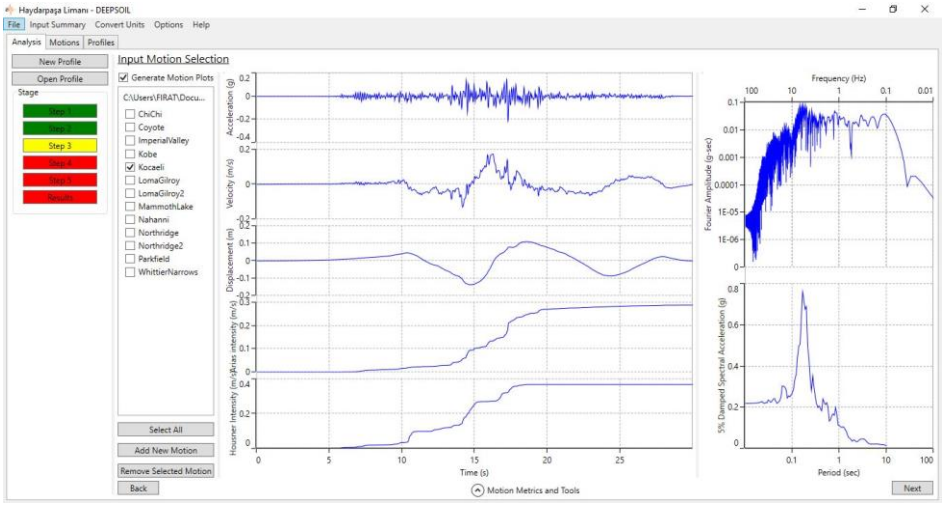
Zemine ait parametrelerin programa tanımlanmasından sonra "Check Data" kısmına tıklanıp zemin parametrelerine göre ortaya çıkan maksimum frekans, kayma dalga hızı, yaklaşık kayma dayanımı özelliklerinin derinlik ile değişimi Şekil 3.50.'de gösterildiği gibi görüntülenebilir. Programda hatalı veya eksik veri girişi olması halinde grafikler çizilmez.



Şekil 3.50. Zemin profili özet grafikler

3.2.11.3. Girdi hareketlerinin seçilmesi

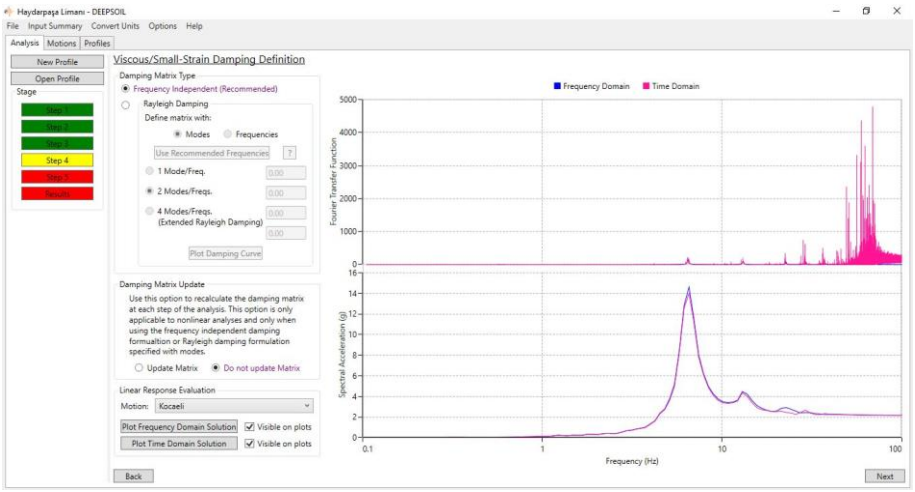
Analizde kullanılacak olan girdi hareketi bu aşamada seçilir. Çıktı hareketine ihtiyaç duyulan depremin işareti aktif hale getirilerek o depremin özelliklerine göre zeminde saha analizleri yapılabilmektedir. "Select All" kısmı tıklanarak da programda kayıtlı olan bütün depremler seçilebilmekte ya da bu seçim kaldırılabilmektedir. İvme, yer değiştirme, hız vb. değerlerin grafikleri pencerenin ortasında yer alır. Belirlenen sönüm oranıyla tanımlanmış olan spektral ivmenin periyoduna bağlı olarak Fourier genliğinin frekans ile değişimini gösteren grafikler sağ kısımda yer alır (Hashash ve ark., 2020). Şekil 3.51.'de seçilen deprem için çizilen grafikler yer almaktadır.



Şekil 3.51. Deprem girdi hareketi seçimi

3.2.11.4. Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme

Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme tanımlama adımı sadece zaman alanı analizlerinde görüntülenebilir. Viskoz sönümleme formülasyonun seçilmesine ve analizde optimum modların ya da frekansların belirlenmesine olanak sağlar. Frekansa bağlı olan viskoz sönümleme formülasyonu sayısal sönümleme uygulanmasının kontrol edilmesini sağlar. “Plot Frequency Domain Solution” ve “Plot Time Domain Solution” alanlarına tıklanarak frekans ve zaman alanı için sağ tarafta grafik çizimi oluşturulabilir (Hashash ve ark., 2020). Şekil 3.52.’de Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme ekranı görülmektedir.



Şekil 3.52. Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme ekranı

3.2.11.5. Analiz kontrol parametreleri

Bu adımda frekans-zaman alanı analizinde kullanılabilen seçenekler belirlenebilir aynı zamanda çıktı ayarları da seçilebilir. Şekil 3.53.'de ilgili ekran görülmektedir.

- **Frekans alanı analizindeki seçenekler;**

Eşdeğer bir doğrusal analiz gerçekleştirirken yineleme sayısı belirlenir. Etkili kesme gerilimi için eşdeğer bir doğrusal analiz gerçekleştirirken, etkili gerilmenin tanımlanması gerekir. Maksimum gerilimin yüzdesi olarak hesaplanan etkili kesme gerilimi, kesme modülü ile sönümleme oranının yeni tahminlerini elde etmek için kullanılır. Karmaşık kayma modülü için; DEEPSOIL (2020), frekans alanı analizinde üç çeşit karmaşık kayma modülü formülü arasından seçim yapılmasına müsaade eder. Bunlar: frekans ile bağımsız, frekans ile bağımlı ve basitleştirilmiş olmak üzere üç çeşittir (Hashash ve ark., 2020).

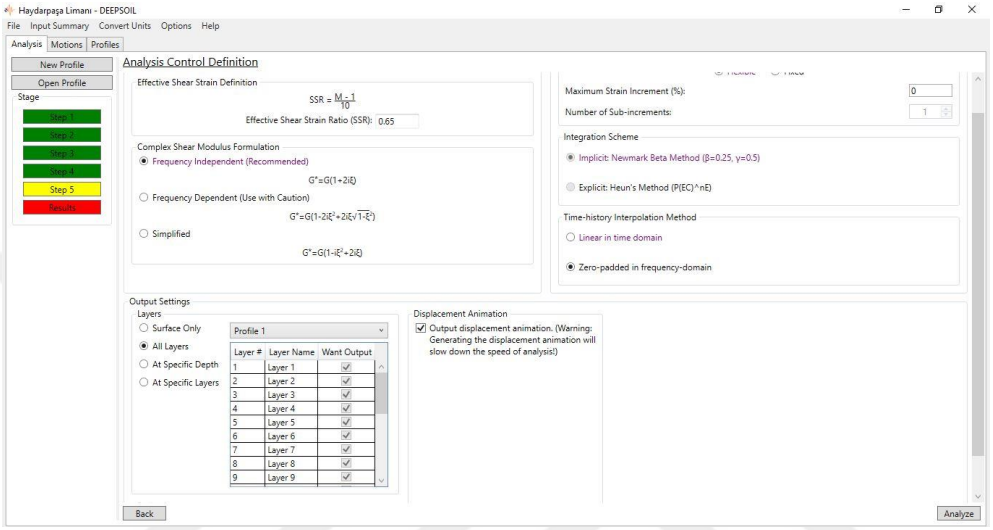
- **Zaman alanı analizindeki seçenekler;**

Adım kontrolü Flexible (esnek,değişebilir) ve Fixed (sabit) olmak üzere ikiye ayrılır. Flexible (değişebilir) adımda; zaman artışıyla yalnızca zemindeki gerilmeler belirtilen maksimum gerilme artışını geçerse alt bölümlere ayrılır. Fixed (sabit) adımda; zaman adımları, zaman serileri boyunca N eşit alt artışlara bölünür. Bu seçeneği seçmek için sabit etiketli seçenek düğmesine tıklanır, ardından maksimum gerinim artışı etiketli metin kutusu devre dışı bırakılır ve alt artışların sayısı etkinleştirilerek istenilen değer kutucuğa girilir. "Time-History Interpolation Method" bölümü için; bu seçenek yalnızca Flexible adımı seçildiğinde kullanılabilir (Hashash ve ark., 2020).

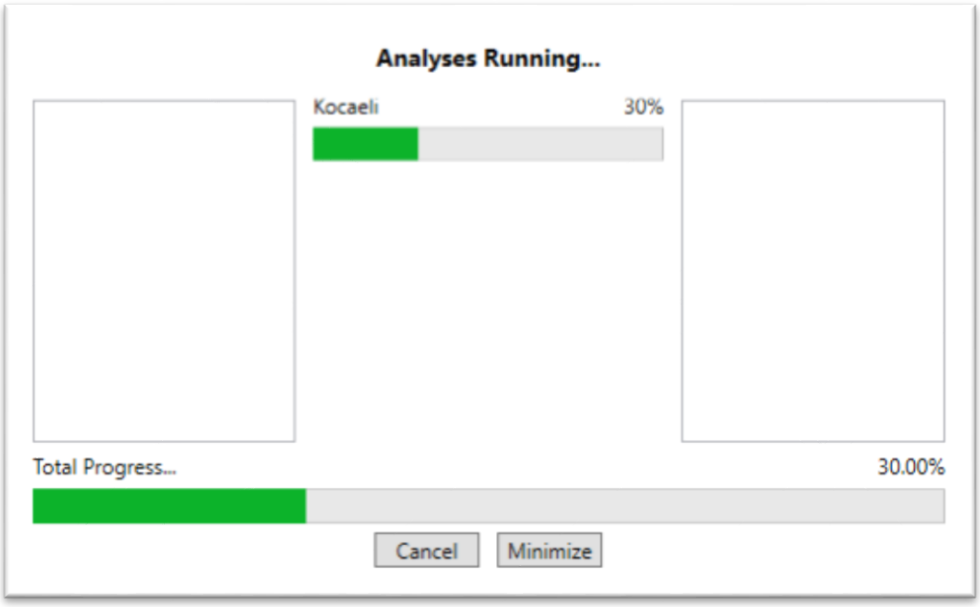
- **Çıktı ayarları;**

Kullanıcılar, sonuçların sunulduğu katmanı/katmanları seçebilir. Katman penceresinde ilgili katman için kutucuk işaretlenmesi gereklidir. Tüm katmanlar seçilmek istenirse "All Layers" düğmesi kullanılarak seçim yapılabilir. Katman sayısı arttıkça analiz süresinin de artacağı dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı gerekli olan

katmanlar tek işaretlenmelidir. Deplasman animasyonu isteniyorsa ilgili kutucuk işaretlenir böylece analiz sonucunda animasyon izlenme imkânı sağlanır. Bütün analiz parametreleri programa tanımlandıktan sonra kullanıcı sağ alt bölümde yer alan analiz düğmesine tıklayarak analizi başlatır. İlerlemeyi gösteren bir analiz çalışma penceresi Şekil 3.54.'teki gibi görünecektir (Hashash ve ark., 2020).



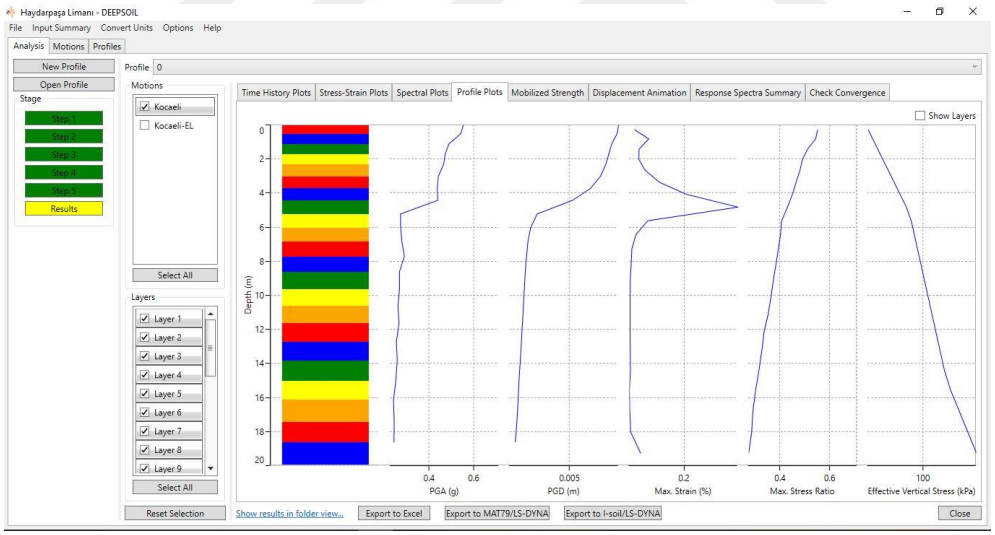
Şekil 3.53. Analiz kontrol parametreleri



Şekil 3.54. Analizin başlatılması

3.2.11.6. Analiz sonuçları

Analizin tamamlanmasından sonra Şekil 3.55.'deki gibi bir pencere ekrana gelir. Bu penceredeki sütunda seçilen her bir zemin katmanı ve uygulanan deprem için çıktı hareketlerine ait zaman tanımlı grafikler, spektral çizimler ve gerilme-birim deformasyon grafikleri seçilen katman ve depremler için görüntülenecektir. "Show results in folder view" butonuna tıklanarak daha önce çalışma klasörüne kaydedilmiş olan çalışmaların sonuçlarına ulaşılabilmektedir, "Export Output to Excel" kısmından ise analiz sonuçları program dışına excel dosyası olarak aktarılabilmektedir. Özet profiller için "Profile Plots" kısmı tıklanarak analizin sonucunda her katman için ayrı ayrı elde edilen PGA değerleri, maksimum birim deformasyon değerleri, maksimum kayma gerilme oranı ve efektif düşey gerilme değerlerinin derinlikle değişimini veren grafikler yer almaktadır. PGA değerleri katmanların üst kotunda hesaplanırken diğer tüm değerler katmanların orta noktası için hesaplanır (Hashash ve ark., 2020).



Şekil 3.55. Analizin sonrasında çizilen özet profiller

3.2.12. NOVOLIQ zemin sıvılaşma programı

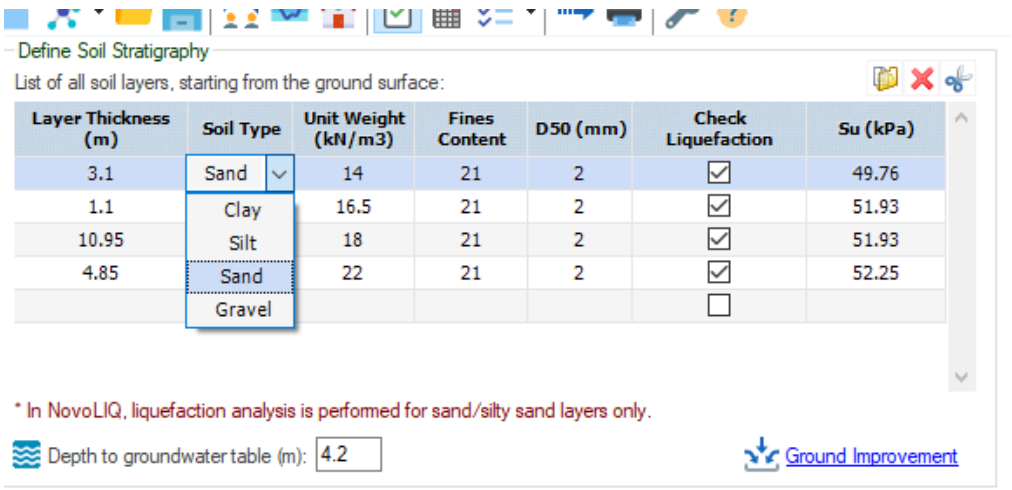
Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesi, yapılan deney ve analizlere ilaveten tecrübe gerektiren bir mühendislik konusudur. Zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için günümüzde birçok deney aleti geliştirilmiştir ancak yine de belirsizlikler söz konusu olabilmektedir. NOVOLIQ (2020) programında sıvılaşma

analizini yapmak için önemli araştırmacıların çeşitli yöntemleri kullanılmıştır. NOVOLIQ (2020) programı dünya çapında bilinen sıvılaşma analizi yöntemlerini kapsayacak şekilde tasarlanmıştır ve kullanıcılarına analiz yöntemini seçme şansı sağlamaktadır (Novo Tech Software, 2020).

3.2.12.1. Zemin özelliklerinin girilmesi

Zemin özellikleri manuel olarak girilebilir veya metin dosyasından içe aktarılabilir. Şekil 3.56.'da zemin özelliklerinin programa girildiği bölüm gösterilmiştir.

Katman kalınlığı: Zemin katmanın kalınlığı bu kısımdan girilmektedir.
Zemin tipi: Kil, silt, kum veya çakıl zemin tipi bu kısımdan seçilebilmektedir.
Birim ağırlık: Katmandaki zeminin birim ağırlığının girildiği alandır.
İnce tane oranı (%): İnce taneli parçacıkların yüzdesel olarak girildiği kısımdır.
D50 (mm) : Elek analizi eğrisinde yüzde 50 geçişe karşılık gelen tane çapıdır. D50 yalnızca Japon Köprü Kodu yöntemi için kullanılır.
Yeraltı su seviyesi: Yapılan zemin etüt raporunda tespit edilen YAS seviyesinin girildiği bölümdür.
Sıvılaşma kontrolü: Sıvılaşma ihtimali olmayan katman varsa o katmanın analizinin yapılmaması için işaretinin kaldırılması bu bölümden yapılmaktadır. İşaret kaldırılırsa analiz yapılmayacağı için sonuç grafiklerinde bu kısımlar boşluk olarak görülecektir.
Zemin iyileştirme: NOVOLIQ (2020) bir alanda zemin iyileştirmesi (taş kolon veya benzeri) yapıldığında, bu belirli derinlik aralığında zemin sıvılaşmasının meydana gelme olasılığının düşük olduğunu varsaymaktadır. İnceleme alanı için zemin iyileştirme yapılmışsa bu zemin iyileştirme derinliği programa girilebilmektedir. Bu durumda zemin iyileştirme alanı içinde tüm oturma-yanal yer değiştirmeler göz ardı edilir ve zemin sıvılaşması bu derinlik aralığında değerlendirilmez. Ayrıca tablolarda ve grafiklerde iyileştirme yapılmış derinliklerde analiz yapılmadığından ilgili yerlerde boşluklar görülür (Novo Tech Software, 2020).



Şekil 3.56. Zemin özelliklerinin programa girilmesi

3.2.12.2. Test çeşidinin seçilmesi ve verilerinin girilmesi

NOVOLIQ (2020), zemin sıvılaşma analizini aşağıdaki 3 test verisi ile yapabilmektedir.

1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)
2. Becker Yoğunluk Deneyi (BDT)
3. Kayma Dalga Hızı (Vs)

Bu tez çalışmasında SPT deney verileri kullanıldığından programın SPT ile ilgili analiz kısmı anlatılmıştır. Şekil 3.57.'de deney çeşitleri ve düzeltme faktörleri yer almaktadır. SPT verileri manuel olarak girebilir veya metin dosyalarından içe aktarılabilir. Her iki durumda da test verileri sayfanın sol tarafında bulunan tabloya aktarılır. Düzeltme ayarları ekranın sol alt kısmında görüntülenir. SPT deneyinden N_{60} ve $N_{1,60}$ değerlerini elde etmek için SPT darbelerine (N) aşağıdaki düzeltmeler programa girilen veriler yardımı ile uygulanır.

Enerji seviyesi (Ce): SPT ekipman enerjisini temsil eder.
Kuyu çapı (Cb): Kuyu çapının genişliği SPT darbe sayılarını etkiler.
Kılıf düzeltme (Cs): Numune alıcısının bir astarı olup olmadığını belirtir.
Tij uzunluğu (Cr): Testin derinliğine yaklaşık olarak eşit olan SPT çubuklarının uzunluğuna bağlıdır.

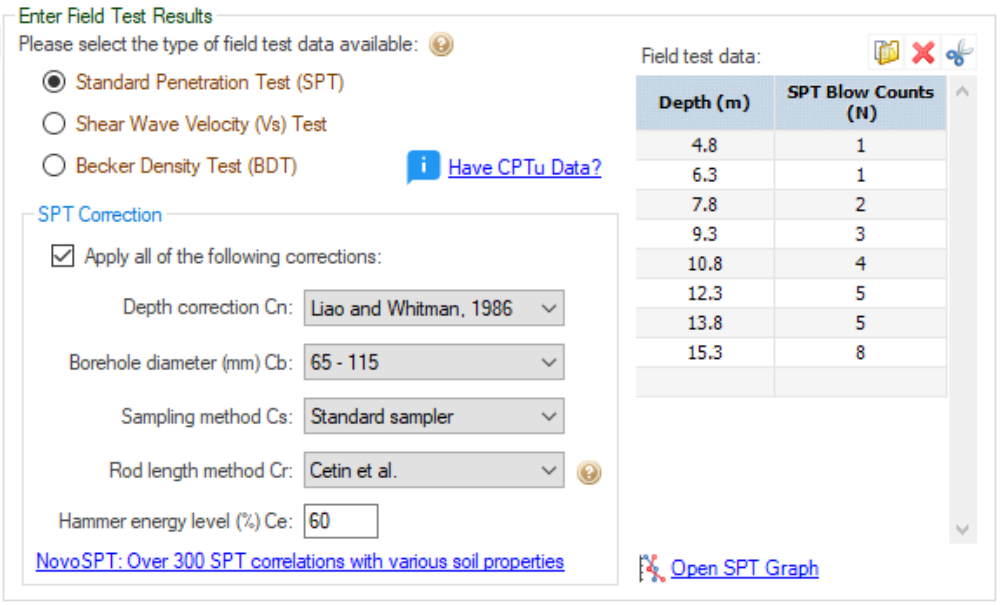
Örtü basıncı (C_N): Zeminin test derinliğinin üzerindeki ağırlığı nedeniyle oluşan örtü basıncına bağlıdır.

Her düzeltme faktörü için istenilen yöntem seçilebilmektedir. Her derinlikte düzeltme faktörünü hesaplamak için program tarafından Denklem 3.17, Denklem 3.18 ve Denklem 3.19 kullanılır (Novo Tech Software, 2020):

$$C=Ce.Cb.Cs.Cr \quad (3.17)$$

$$N_{60}=C.N \quad (3.18)$$

$$N_{1,60}=C_N.N_{60} \quad (3.19)$$



Şekil 3.57. Deney çeşidi, SPT sayısı girişi ve düzeltme faktörlerinin seçilmesi

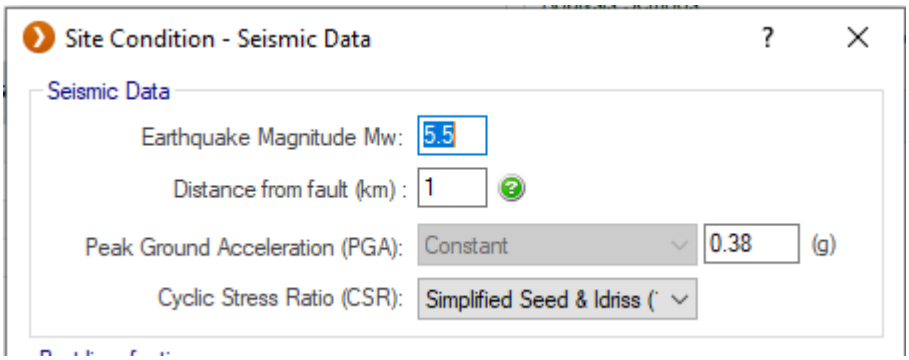
3.2.12.3. Deprem sismik verilerinin girilmesi

Maksimum deprem ivmesi: Depremin neden olduğu maksimum yer ivmesidir (PGA değeri).

Deprem büyüklüğü (Mw): Depremin büyüklüğüdür ve büyüklük ölçek faktörünü etkiler.

Döngüsel direnç oranı (CRR1) yöntemi: NOVOLIQ (2020), CRR1'i hesaplamak için 10 yöntemi destekler (Mw=7.5 olan bir deprem büyüklüğü için). Büyüklük ölçek faktörü kullanılarak 7.5 dışındaki depremler için hesaplar yapılır.

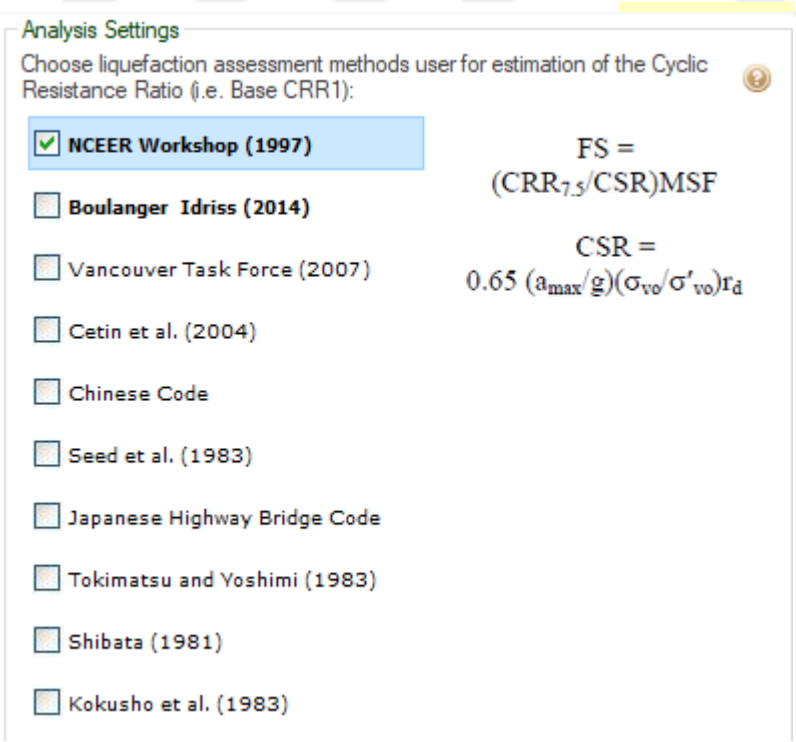
Şekil 3.58.'de programa sismik özelliklerin girişi gösterilmiştir.



Şekil 3.58. Sismik özelliklerin programa girilmesi

3.2.12.4. Analiz yönteminin seçilmesi

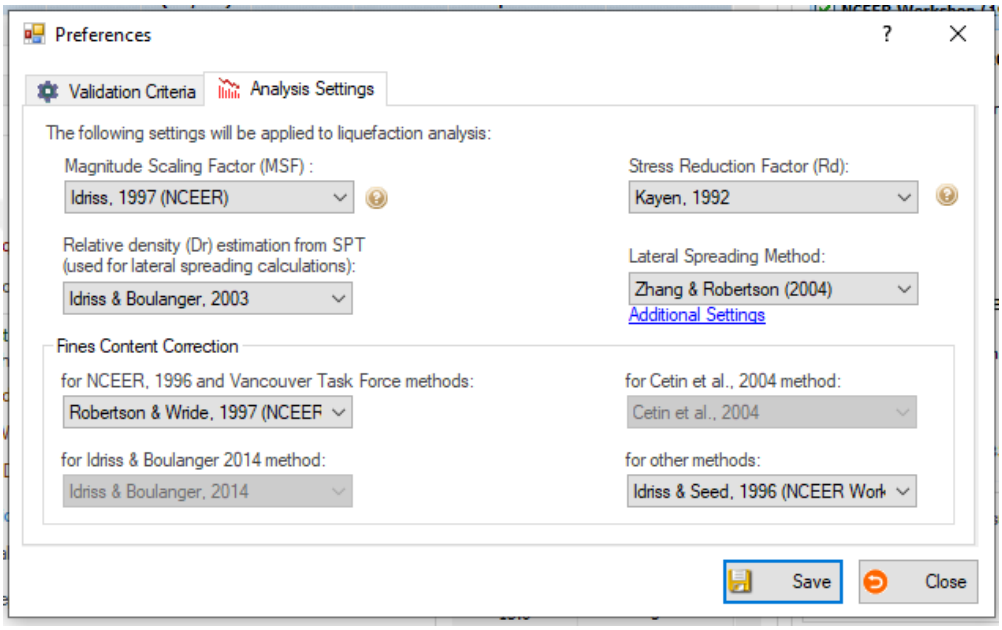
Program ekranının sağ kısmında sıvılaşma analizi için çeşitli yöntemler seçilebilir. Kullanıcı birden fazla analiz yöntemi seçebilir ve NOVOLIQ (2020), çıktılarda seçilen tüm yöntemlerin karşılaştırmasını sağlar. Bir yöntemin hesaplanması için yöntemin seçilmesi yeterlidir. Şekil 3.59.'da analiz yöntemleri görülmektedir.



Şekil 3.59. Analiz yönteminin seçilmesi

3.2.12.5. Analiz ayarlarının seçilmesi

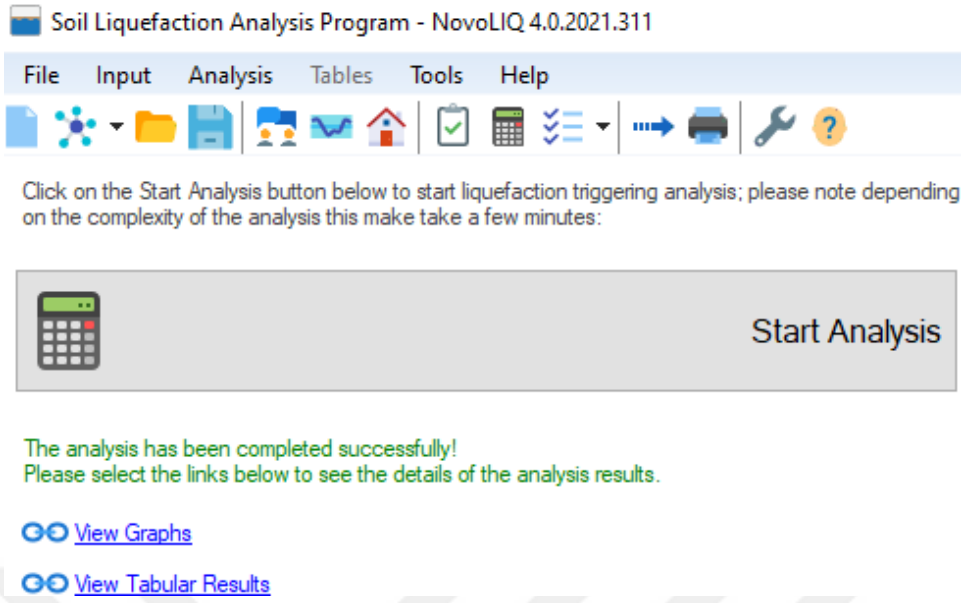
Büyüklük ölçek faktörü, rölatif yoğunluk, derinlik azaltma faktörü ve ince tane oranının hesaplanmasında kullanılacak olan formüllerinin tercih edildiği bölümdür. İstenilen bilim insanları seçildikten sonra "Save" butonu ile kaydedilerek devam edilebilir. Şekil 3.60.'da analiz ayarları yer almaktadır.



Şekil 3.60. Analiz ayarlarının seçilmesi

3.2.12.6. Analizin başlatılması

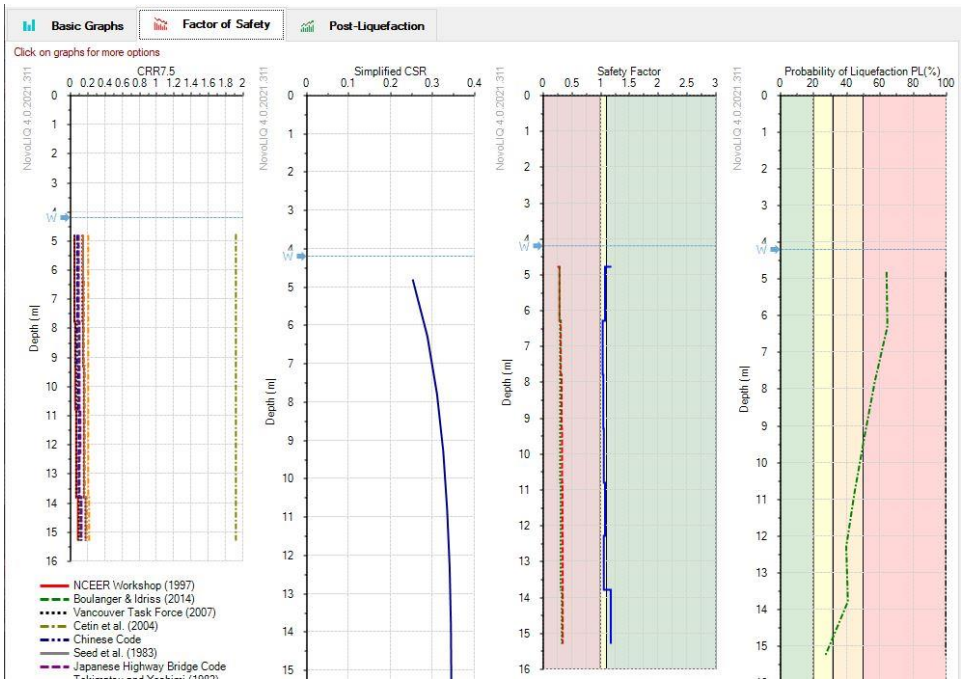
Zemin özellikleri, SPT testi verileri, analiz yöntemi, sismik veriler ve analiz ayarları girildikten sonra "Next: Start Analysis" butonuna basarak analiz bölümüne geçilir. "Start Analysis" kısmına tıklandığında analiz hemen başlatılır. Analiz yapıldıktan sonra "View Graphs" bölümünden analiz sonuçlarının grafiklerine, "View Tabular Results" bölümünden ise tablolarına ulaşılabilmektedir. Şekil 3.61.'de analizin başlatılma ekranı görülmektedir.



Şekil 3.61. Analizin başlatılması

3.2.12.7. Analiz sonuçlarının grafiklerinin oluşturulması

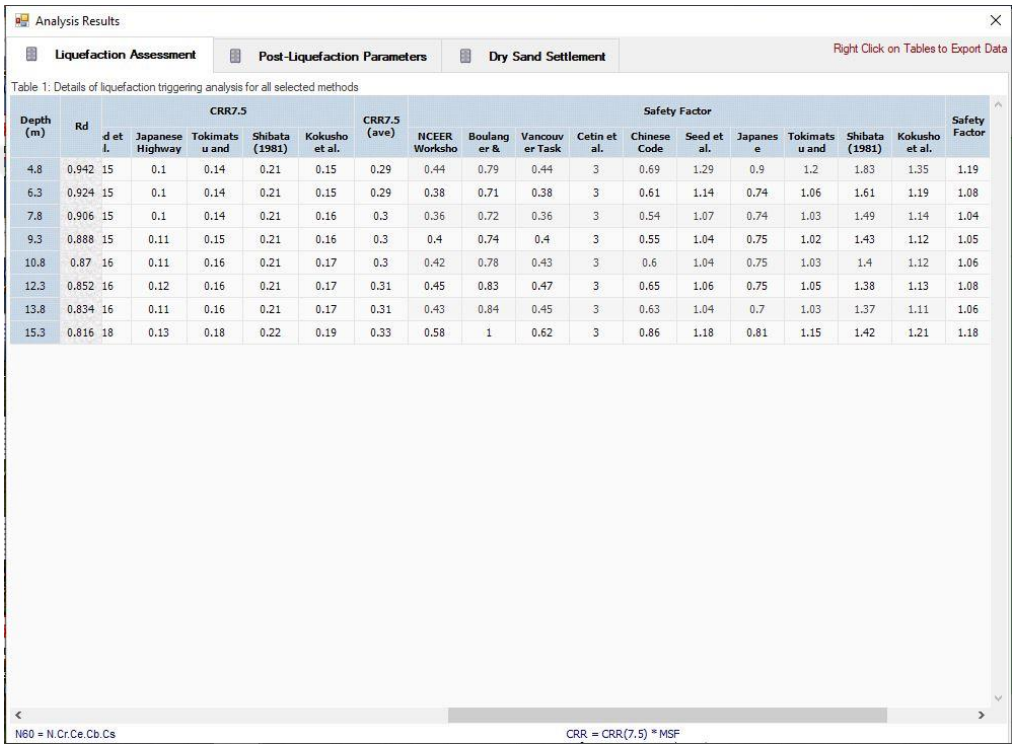
Analizin ardından seçilen her bir yöntem için ayrı ayrı CRR katsayıları, CSR katsayıları, güvenlik katsayıları, sıvılaşma ihtimallerine ait grafikler çizilebilmektedir. Şekil 3.62.'de analiz sonrasında elde edilen grafikler görülmektedir.



Şekil 3.62. Analiz sonuçlarının grafiksel gösterimi

3.2.12.8. Analiz sonuçlarının tablo olarak gösterimi

Analizin ardından seçilen her bir yöntem için ayrı ayrı r_d katsayıları, efektif ve toplam gerilmeler, N_{60} ve $N_{1,60}$ değerleri, rölatif sıkılık, CRR, CSR katsayıları, güvenlik katsayıları, sıvılaşma ihtimallerine ait veriler program tarafından tablo şeklinde verilmektedir. Şekil 3.63.'te analiz sonrasında elde edilen tablolar görülmektedir.



Şekil 3.63. Analiz sonuçlarının tablo olarak gösterimi

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında Haydarpaşa Limanında sıvılaşma analizlerinin yapılması için ilk adımda DEEPSOIL (2020) programıyla sismik saha analizi yapılmıştır. Düzce (Bolu) Depremi (Bolu Merkez istasyonu, 12.11.1999, Mw=5.5), Orta (Çankırı) Depremi (Çankırı Çerkeş istasyonu, 06.06.2000, Mw=6.0), Ege Denizi (17.26 km Seferihisar (İzmir) Depremi, İzmir Çeşme istasyonu, 30.10.2020, Mw=6.6), Düzce (Bolu) Depremi (Düzce istasyonu, 12.11.1999, Mw=7.1), Gölcük (İzmit) Depremi (DEEPSOIL (2020) kayıtlı deprem, 17.08.1999, Mw=7.6) senaryoları çalışılan alana uygulanmıştır. Bu yapılan sismik saha analizinde elde edilen PGA değerlerinin derinlik ile değişim grafikleri elde edilmiştir. PGA değerleri elde edildikten sonra Seed ve Idriss'e (1971) göre teorik analiz için zemin etüt raporundan; zeminin özellikleri ile Standart Penetrasyon Deneyi verileri alınarak, N_{60} ve $N_{1,60}$ değerlerine ulaşılmıştır. Daha sonra CRR ve CSR değerleri hesaplanarak güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Teorik analiz sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla pek çok sıvılaşma analizi yöntemini kapsayacak şekilde tasarlanmış olan NOVOLIQ (2020) programıyla da sıvılaşma analizleri yapılmıştır. NOVOLIQ (2020) programına zemin özellikleri, deney çeşidi ve sismik veriler girildikten sonra analiz yöntemi seçilerek analiz yapılmıştır. Analizde önemli araştırmacıların çeşitli yöntemleri (9 farklı yöntem) kullanılmıştır.

4.1. İnceleme Alanında Açılan Sondaj Kuyuları

İnceleme alanında zemin profilinin takibi için 1 adet 17.00 metre ve 5 adet 20.00 metre derinlikte toplamda 6 adet zemin etüt sondaj kuyusu açılmıştır. Sondajlar için portatif sondaj makinasını kullanılmıştır. Sirkülasyon sıvısı için su kullanılmıştır. Yapılan zemin etüt sondajlarının derinlikleri ve ITRF'ye göre koordinatları Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Şekil 4.1.'de ölçümlerin lokasyonları görülmektedir.

Çizelge 4.1. Sondajlara ait koordinat ve derinlik bilgileri (Zemin Etüt Raporu, 2019)

Sondaj Numarası	Koordinat (ITRF)	Derinlik (m)
Sk1	X: 669865 Y: 4540396	17.00
Sk2	X: 669859 Y: 4540381	20.00
Sk3	X: 669834 Y: 4540378	20.00
Sk4	X: 669829 Y: 4540361	20.00
Sk5	X: 669813 Y: 4540362	20.00
Sk6	X: 669803 Y: 4540344	20.00

Sondaja ait tüm veriler EK 1'de yer alan sondaj logları bölümünde sunulmuştur.



Şekil 4.1. Sismik serim ve sondaj kuyularının yerlerinin vaziyet planında gösterimi (Zemin Etüt Raporu, 2019)

4.2. Standart Penetrasyon Testlerinin (SPT) Sonuçları

Haydarpaşa Garı inceleme alanında açılmış olan 6 adet zemin etüt sondajı esnasında, her 1,5 metrede bir olmak üzere SPT yapılması amaçlanmıştır. SPT

sonuçları genelde düşük değerler olarak elde edilmiştir. SPT değerleri Çizelge 4.2.'de ve EK 1'de yer alan sondaj loglarında detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Sondaj verileri sıvılaşma analizlerinde güvenli tarafta kalacak biçimde Çizelge 4.2.'de sunulan şekliyle dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.2. SPT derinlikleri ve vuruş sayıları (Zemin Etüt Raporu, 2019)

		SPT-N_{30}						
SPT NO	**Derinlik(Metre)**	**Sk1**	**Sk2**	**Sk3**	**Sk4**	**Sk5**	**Sk6**	**Sk,min**
SPT1	4.50 – 4.95	1	1	1	1	1	1	1
SPT2	6.00 – 6.45	1	1	2	2	1	1	1
SPT3	7.50 – 7.95	3	3	11	2	2	3	2
SPT4	9.00 – 9.45	4	12	5	4	3	4	3
SPT5	10.50 – 10.95	14	5	4	5	14	5	4
SPT6	12.00 – 12.45	5	6	5	16	7	19	5
SPT7	13.50 – 13.95	6		5	7	10	6	5
SPT8	15.00 – 15.45					11	8	8

4.3. Zeminlerin Fiziksel Özellikleri

İnceleme alanında zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için su muhtevası, doğal-kuru birim ağırlıklar, elek analizi ve Atterberg limitleri deneyleri yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Laboratuvardan elde edilen zeminin deney sonuçları (Zemin Etüt Raporu, 2019)

Sondaj No	**Derinlik (m)**	**ÇAKIL**	**KUM**	**SİLT**	**KİL**	**Atterberg limitleri**			**Wn**	**γ_n**
						LL	**PL**	**PI**		
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	gr/cm3
SK-1	5,00-5,50					38,3	18,4	19,9	16,1	1,794
SK-1	15,50-16,00									
SK-2	13,00-13,50					37,2	18,9	18,3	19,5	1,803
SK-2	14,00-14,50									
SK-3	14,50-15,00	9,54	68,96	21,5		31,6	12,5	19,1		
SK-3	16,00-16,50									2,461
SK-4	7,00-7,50	8,45	71,69	19,86		32,7	12,7	20		
SK-4	15,00-15,50									
SK-5	11,00-11,50	1	66,55	22,61		28,9	14,7	14,2		
SK-5	17,00-17,50									
SK-6	8,00-8,50					35,4	15,5	19,9	15,8	1,817
SK-6	19,50-20,00									2,498

4.4. DEEPSOIL Programı ile Sismik Saha Analizi

Bu tez çalışması kapsamında DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak Haydarpaşa Limanı için sismik saha analizi yapılmıştır. İnceleme alanı ve çevresi için civar yerlerde meydana gelmiş olan Düzce (Bolu) Depremi (Bolu Merkez istasyonu, 12.11.1999, Mw=5.5), Orta (Çankırı) Depremi (Çankırı Çerkeş istasyonu, 06.06.2000, Mw=6.0), Ege Denizi (17.26 km Seferihisar (İzmir) Depremi, İzmir Çeşme istasyonu, 30.10.2020, Mw=6.6), Düzce (Bolu) Depremi (Düzce istasyonu, 12.11.1999, Mw=7.1), Gölcük (İzmit) Depremi (DEEPSOIL (2020) kayıtlı deprem, 17.08.1999, Mw=7.6) senaryoları çalışılan alana uygulanmıştır. Bu yapılan sismik saha analizinde elde edilen PGA değerlerinin derinlik ile değişimleri Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. DEEPSOIL (2020) programının bu tez çalışması kapsamındaki adım adım kullanımı ve seçilen ayarlar aşağıda sunulmuştur.

Analizin tanımlanması (1. Adım)

- Analiz Yöntemi: Doğrusal Olmayan,
- Çözüm Tipi: Zaman Alanı,
- Uygun Zemin Modeli: Genel Kuadratik/Hiperbolik Model (GQ/H),
- Olası Histeretik Yeniden/Boşaltma Formülasyonu: Masif Olmayan Yeniden/Boşaltma,
- Analiz Etiketi: DS-NL4.

Zemin profilinin tanımlanması (2. Adım)

- 22 katman tanımlandı,
- YAS seviyesi 8. katman ve altında konumlandı,
- Her katman için kalınlık, birim ağırlık, kayma dalgası hızı ve kayma dayanımı parametreleri girildi (EK 2' de yer alan Çizelge Ek 1.'de sunulmuştur).
- Zemin Modeli Özellikleri: "Reference Curve" kısmından" Seed ve Idriss, 1970 (Mean)" seçilip ardından "Curve Fitting" kısmından "MRDF with UIUC Reduction Factor" seçildi ve ardından "Use Fit" bölümünden değerler her katman için hesaplandı.
- Tüm değerler girildikten sonra "Check Data" kısmından devam edildi ve grafik çizimleri gerçekleştirildi.

Girdi hareketlerinin seçilmesi (3. Adım)

- Düzce (Bolu) Depremi, Bolu Merkez istasyonu, 12.11.1999, Mw=5.5
- Orta (Çankırı) Depremi, Çankırı Çerkeş istasyonu, 06.06.2000, Mw=6.0
- Ege Denizi, 17.26 km Seferihisar (İzmir) Depremi, İzmir Çeşme istasyonu, 30.10.2020, Mw=6.6
- Düzce (Bolu) Depremi, Düzce istasyonu, 12.11.1999, Mw=7.1
- Gölcük (İzmit) Depremi, DEEPSOIL (2020) kayıtlı deprem, 17.08.1999, Mw=7.6 depremleri ayrı ayrı uygulanmıştır.

  DEEPSOIL (2020) programına manuel olarak girilen deprem kayıtları AFAD (2021) veri tabanından (işlenmiş veri olarak) indirilmiş, deprem detayları ve istasyon bilgileri EK 3'te yer almaktadır.

Viskoz / küçük şekil değiştirme sönümleme (4. Adım)

- Sönüm Matrisi Tipi: Frekanstan Bağımsız
- Doğrusal Tepki Değerlendirmesi: Hareket (Her bir deprem için ayrı ayrı seçildi)
- Doğrusal Tepki Değerlendirmesi: Plot Frekans Etki Alanı Çözümü
- Doğrusal Tepki Değerlendirmesi: Plot Zaman Etki Alanı Çözümü

Analiz kontrol parametreleri (5. Adım)

- Frekans Alanı: Yineleme sayısı = 15
- Efektif Kayma Gerilme Tanımı: Efektif Kayma Gerilme Oranı (SRR) = 0,65
- Karmaşık Kayma Modülü Formülasyonu: Frekanstan Bağımsız
- Çıktı Ayarları:Tüm Katmanlar
- Adım Kontrolü: Esnek
- Entegrasyon Şeması: Örtülü: Newmark Beta Yöntemi (β=0.25, γ=0.5)
- Zaman Geçmişi İnterpolasyon Yöntemi: Frekans alanında sıfır dolgulu

Analiz sonuçları

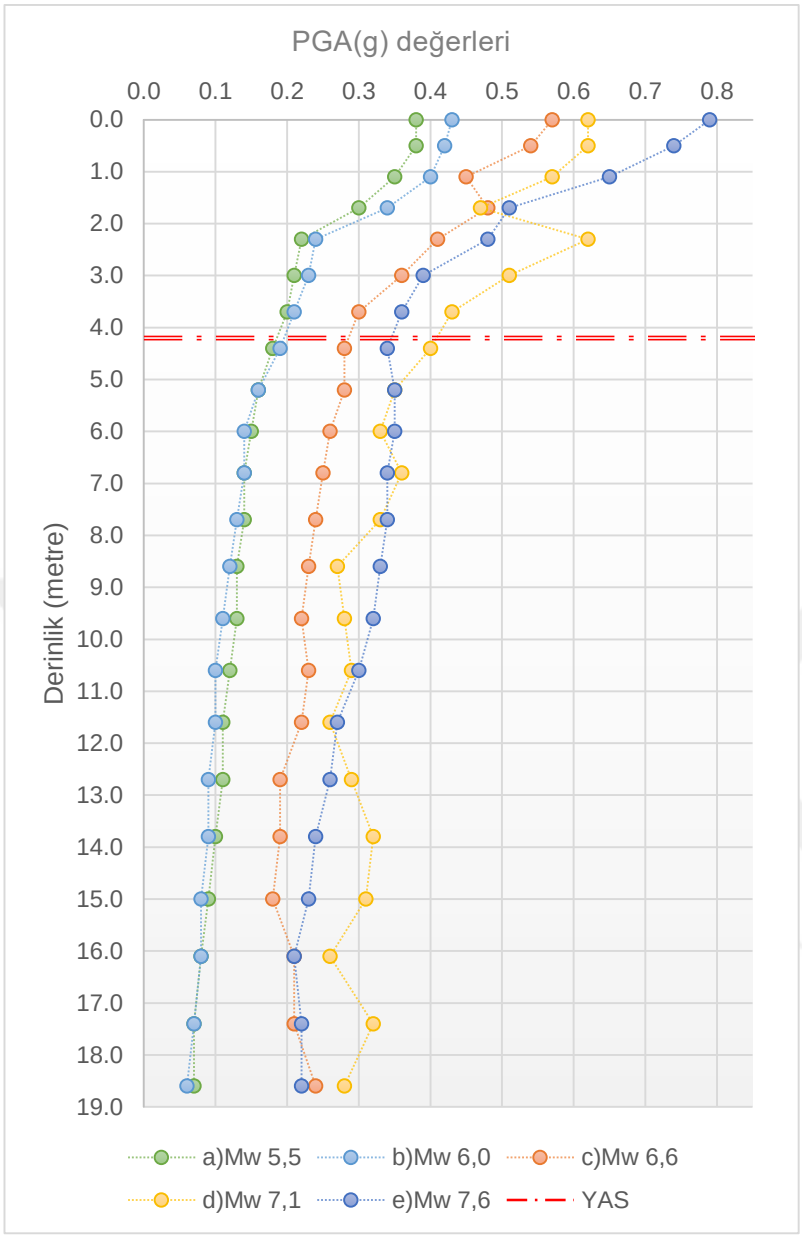
- İstenilen deprem/depremler ve katman/katmanlar seçildikten sonra "Export to Excel" bölümünden excel dosyasına analiz sonuçları aktarılmıştır.
- "Profile Plots" seçeneği ile analiz sonuçları grafik üzerinde özet şekline getirilmiştir.

4.4.1. Sismik saha analiz sonuçları

Yapılan sismik saha analizi sonucunda her deprem için PGA değerleri elde edilmiş olup bu PGA değerleri Çizelge 4.4.'te sunulmuştur. Bu ivme değerleri kullanılarak Seed ve Idriss'e (1971) göre sıvılaşma analizi Bölüm 4.5.'te ve NOVOLIQ (2020) programıyla analiz Bölüm 4.6.'da yapılmıştır.

Çizelge 4.4. DEEPSOIL (2020) ile gerçek deprem verilerinden elde edilen PGA-Derinlik değerleri

Derinlik (m)	PGA (g)				
	Mw 5,5	Mw 6,0	Mw 6,6	Mw 7,1	Mw 7,6
0.00	0.38	0.43	0.57	0.62	0.79
0.50	0.38	0.42	0.54	0.62	0.74
1.10	0.35	0.40	0.45	0.57	0.65
1.70	0.30	0.34	0.48	0.47	0.51
2.30	0.22	0.24	0.41	0.62	0.48
3.00	0.21	0.23	0.36	0.51	0.39
3.70	0.20	0.21	0.30	0.43	0.36
4.40	0.18	0.19	0.28	0.40	0.34
5.20	0.16	0.16	0.28	0.35	0.35
6.00	0.15	0.14	0.26	0.33	0.35
6.80	0.14	0.14	0.25	0.36	0.34
7.70	0.14	0.13	0.24	0.33	0.34
8.60	0.13	0.12	0.23	0.27	0.33
9.60	0.13	0.11	0.22	0.28	0.32
10.60	0.12	0.10	0.23	0.29	0.30
11.60	0.11	0.10	0.22	0.26	0.27
12.70	0.11	0.09	0.19	0.29	0.26
13.80	0.10	0.09	0.19	0.32	0.24
15.00	0.09	0.08	0.18	0.31	0.23
16.10	0.08	0.08	0.21	0.26	0.21
17.40	0.07	0.07	0.21	0.32	0.22
18.60	0.07	0.06	0.24	0.28	0.22



Şekil 4.2. a) Düzce (Bolu) Depremi, Mw=5.5, b) Orta (Çankırı) Depremi, Mw=6.0, c) Ege Denizi, 17.26 km Seferihisar (İzmir) Depremi, Mw=6.6, d)Düzce (Bolu) Depremi, Mw=7.1, e)Gölcük (İzmit) Depremi, Mw=7.6 depremleri için DEEPSOIL (2020)'den elde edilen PGA grafiği

4.5. Seed ve Idriss'e (1971) Göre Sıvılaşma Analizi

4.5.1. SPT-N_{arazi} değerinin düzeltilmesi ve sıvılaşma analizi için gerekli parametrelerin elde edilmesi

SPT deneyinin yapıldığı anda uygulanan enerji ölçülürse deneye etki eden birçok faktörün etkisi azaltılıp yok edilebilmektedir. SPT-N_{arazi} sayılarında tokmak enerjisi ve bazı durumlarda deney sonuçlarını etkileyen diğer etkenler için de düzeltmeler yapılmaktadır. SPT-N (ölçülen darbe sayısı), N_{60} ya da $N_{1,60}$ olarak düzenlenir, sıvılaşma analizi buna göre yapılır. Bu tez çalışmasında kullanılan ilgili bölgedeki SPT-N sayılarına bakıldığında genel olarak bu değerlerin düşük olduğu görülmektedir. SPT ölçümleri 4,5 metre ile 15,45 metre arasında yapılmıştır. Zemin etüt raporunda YAS seviyesi 4,20 metre olarak belirtilmiştir. Bölüm 3.2.9.3.'te SPT-N düzenleme işleminin detayları açıklanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında aşağıda belirtilen parametreler dikkate alınarak düzeltmeler yapılmış olup sıvılaşma analizi için gerekli parametreler elde edilmiştir.

- N_{arazi}: Arazide ölçülen darbe sayısı için Çizelge 4.2 dikkate alınmıştır,
- E_m: Güvenli şahmerdan olduğundan 0,60 olarak alınmıştır,
- C_b: Çizelge 3.3.'e göre seçilmiştir (5 mm-115 mm arası olduğundan 1,00),
- C_r: Bölüm 3.2.9. dikkate alınarak seçim yapılmıştır,
- C_N: Denklem 3.11'e göre hesaplanmıştır,
- N_{60} değeri Denklem 3.9'a göre hesaplanmıştır,
- $N_{1,60}$ değerleri Denklem 3.10'a göre hesaplanmıştır,
- CRR değeri $N_{1,60}$ değerleri kullanılarak Şekil 3.45.'den elde edilmiştir,
- CSR değeri Denklem 3.14'e göre hesaplanmıştır,
- Gs değeri Denklem 3.13'e göre hesaplanmıştır,
- BÖF katsayıları Denklem 3.16'ya göre hesaplanmıştır,
- r_d: Denklem 3.15'e göre hesaplanmıştır,
- DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak PGA değerleri Mw=5,5 için 0,38 g, Mw=6,0 için 0,43 g, Mw=6,6 için 0,57 g, Mw=7,1 için 0,62 g, Mw=7,6 için 0,79 g olarak elde edilmiştir,
- γ_{su} 9,81 kN/m^3 olarak işlemler yapılmıştır,
- YAS seviyesi 4,20 metredir,
- Gerilme hesaplarında YAS dikkate alınmıştır.

Seed ve Idriss'e (1971) göre SPT-Narazi değerinin düzeltilmesi Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Seed ve Idriss'e (1971) göre SPT-N_{arazi} değerinin düzeltilmesi

Deprem Büyüklüğü	Derinlik (m)	N_{30}	E_m	C_b	C_r	N_{60}	σv' (kN/m2)	C_N	$N_{1,60}$
Mw=5,5	4.80	1	0.60	1.00	0.85	0.85	66.46	1.23	1.04
	6.30	1	0.60	1.00	0.95	0.95	78.75	1.13	1.07
	7.80	2	0.60	1.00	0.95	1.90	91.03	1.05	2.00
	9.30	3	0.60	1.00	0.95	2.86	103.32	0.98	2.81
	10.80	4	0.60	1.00	1.00	4.01	115.60	0.93	3.73
	12.30	5	0.60	1.00	1.00	5.01	127.89	0.88	4.43
	13.80	5	0.60	1.00	1.00	5.01	140.17	0.84	4.23
	15.30	8	0.60	1.00	1.00	8.02	153.06	0.81	6.48
Mw=6,0	4.80	1	0.60	1.00	0.85	0.85	66.46	1.23	1.04
	6.30	1	0.60	1.00	0.95	0.95	78.75	1.13	1.07
	7.80	2	0.60	1.00	0.95	1.90	91.03	1.05	2.00
	9.30	3	0.60	1.00	0.95	2.86	103.32	0.98	2.81
	10.80	4	0.60	1.00	1.00	4.01	115.60	0.93	3.73
	12.30	5	0.60	1.00	1.00	5.01	127.89	0.88	4.43
	13.80	5	0.60	1.00	1.00	5.01	140.17	0.84	4.23
	15.30	8	0.60	1.00	1.00	8.02	153.06	0.81	6.48
Mw=6,6	4.80	1	0.60	1.00	0.85	0.85	66.46	1.23	1.04
	6.30	1	0.60	1.00	0.95	0.95	78.75	1.13	1.07
	7.80	2	0.60	1.00	0.95	1.90	91.03	1.05	2.00
	9.30	3	0.60	1.00	0.95	2.86	103.32	0.98	2.81
	10.80	4	0.60	1.00	1.00	4.01	115.60	0.93	3.73
	12.30	5	0.60	1.00	1.00	5.01	127.89	0.88	4.43
	13.80	5	0.60	1.00	1.00	5.01	140.17	0.84	4.23
	15.30	8	0.60	1.00	1.00	8.02	153.06	0.81	6.48
Mw=7,1	4.80	1	0.60	1.00	0.85	0.85	66.46	1.23	1.04
	6.30	1	0.60	1.00	0.95	0.95	78.75	1.13	1.07
	7.80	2	0.60	1.00	0.95	1.90	91.03	1.05	2.00
	9.30	3	0.60	1.00	0.95	2.86	103.32	0.98	2.81
	10.80	4	0.60	1.00	1.00	4.01	115.60	0.93	3.73
	12.30	5	0.60	1.00	1.00	5.01	127.89	0.88	4.43
	13.80	5	0.60	1.00	1.00	5.01	140.17	0.84	4.23
	15.30	8	0.60	1.00	1.00	8.02	153.06	0.81	6.48
Mw=7,6	4.80	1	0.60	1.00	0.85	0.85	66.46	1.23	1.04
	6.30	1	0.60	1.00	0.95	0.95	78.75	1.13	1.07
	7.80	2	0.60	1.00	0.95	1.90	91.03	1.05	2.00
	9.30	3	0.60	1.00	0.95	2.86	103.32	0.98	2.81
	10.80	4	0.60	1.00	1.00	4.01	115.60	0.93	3.73
	12.30	5	0.60	1.00	1.00	5.01	127.89	0.88	4.43
	13.80	5	0.60	1.00	1.00	5.01	140.17	0.84	4.23
	15.30	8	0.60	1.00	1.00	8.02	153.06	0.81	6.48

İlgili alanın $N_{1,60}$ değerlerinin tümü 0-20 aralığında olduğundan potansiyel hasar derecesi yüksektir (Çizelge 3.4.).

4.5.2. Teorik sıvılaşma analizi sonuçları

Seed ve Idriss'e (1971) göre yapılan teorik sıvılaşma analizi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.6.'da sunulmuştur.

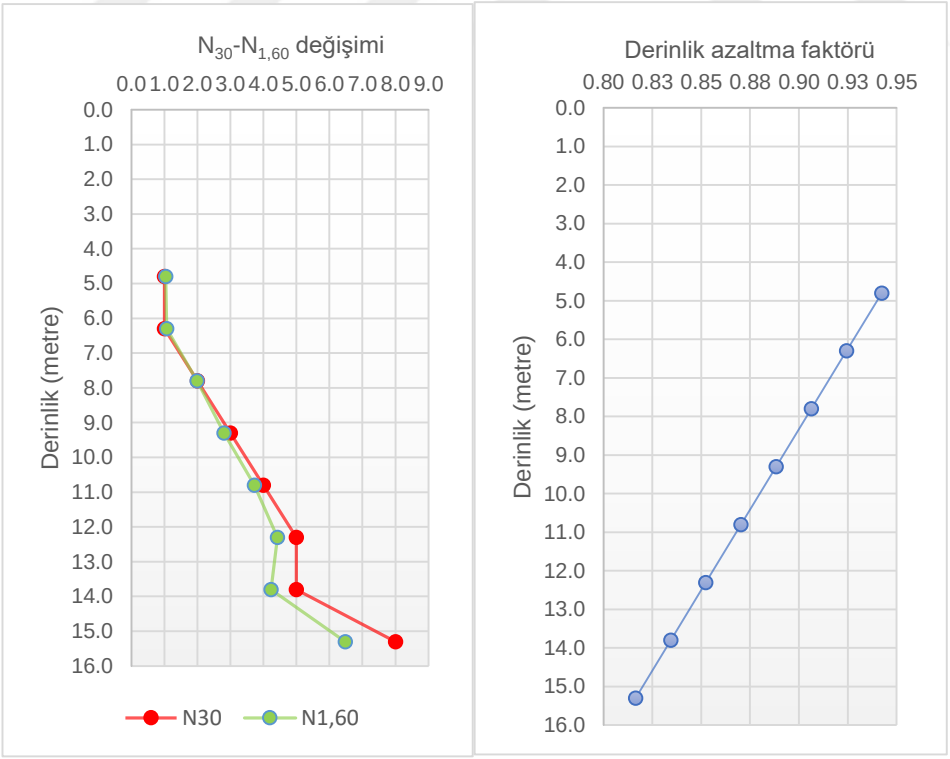
Çizelge 4.6. Seed ve Idriss'e (1971) göre teorik sıvılaşma analizi

Deprem Büyüklüğü	Derinlik (m)	N_{30}	N_{60}	$N_{1,60}$	σv (kN/m2)	σv' (kN/m2)	rd	amax/g	BÖF	CRR	CRR*BÖF	CSR	GS
Mw=5,5	4.80	1	1	1.04	72.35	66.46	0.94	0.38	2.21	0.05	0.11	0.25	0.44
	6.30	1	1	1.07	99.35	78.75	0.92	0.38	2.21	0.05	0.11	0.29	0.39
	7.80	2	2	2.00	126.35	91.03	0.91	0.38	2.21	0.06	0.14	0.31	0.46
	9.30	3	3	2.81	153.35	103.32	0.89	0.38	2.21	0.08	0.17	0.33	0.52
	10.80	4	4	3.73	180.35	115.60	0.87	0.38	2.21	0.09	0.20	0.34	0.59
	12.30	5	5	4.43	207.35	127.89	0.85	0.38	2.21	0.10	0.22	0.34	0.65
	13.80	5	5	4.23	234.35	140.17	0.83	0.38	2.21	0.10	0.21	0.34	0.62
	15.30	8	8	6.48	261.95	153.06	0.82	0.38	2.21	0.13	0.28	0.35	0.80
Mw=6,0	4.80	1	1	1.04	72.35	66.46	0.94	0.43	1.77	0.05	0.09	0.29	0.31
	6.30	1	1	1.07	99.35	78.75	0.92	0.43	1.77	0.05	0.09	0.33	0.28
	7.80	2	2	2.00	126.35	91.03	0.91	0.43	1.77	0.06	0.11	0.35	0.33
	9.30	3	3	2.81	153.35	103.32	0.89	0.43	1.77	0.08	0.14	0.37	0.37
	10.80	4	4	3.73	180.35	115.60	0.87	0.43	1.77	0.09	0.16	0.38	0.42
	12.30	5	5	4.43	207.35	127.89	0.85	0.43	1.77	0.10	0.18	0.39	0.46
	13.80	5	5	4.23	234.35	140.17	0.83	0.43	1.77	0.10	0.17	0.39	0.44
	15.30	8	8	6.48	261.95	153.06	0.82	0.43	1.77	0.13	0.22	0.39	0.57
Mw=6,6	4.80	1	1	1.04	72.35	66.46	0.94	0.57	1.44	0.05	0.07	0.38	0.19
	6.30	1	1	1.07	99.35	78.75	0.92	0.57	1.39	0.05	0.07	0.43	0.16
	7.80	2	2	2.00	126.35	91.03	0.91	0.57	1.39	0.06	0.09	0.47	0.19
	9.30	3	3	2.81	153.35	103.32	0.89	0.57	1.39	0.08	0.11	0.49	0.22
	10.80	4	4	3.73	180.35	115.60	0.87	0.57	1.39	0.09	0.12	0.50	0.25
	12.30	5	5	4.43	207.35	127.89	0.85	0.57	1.39	0.10	0.14	0.51	0.27
	13.80	5	5	4.23	234.35	140.17	0.83	0.57	1.39	0.10	0.13	0.52	0.26
	15.30	8	8	6.48	261.95	153.06	0.82	0.57	1.39	0.13	0.17	0.52	0.34

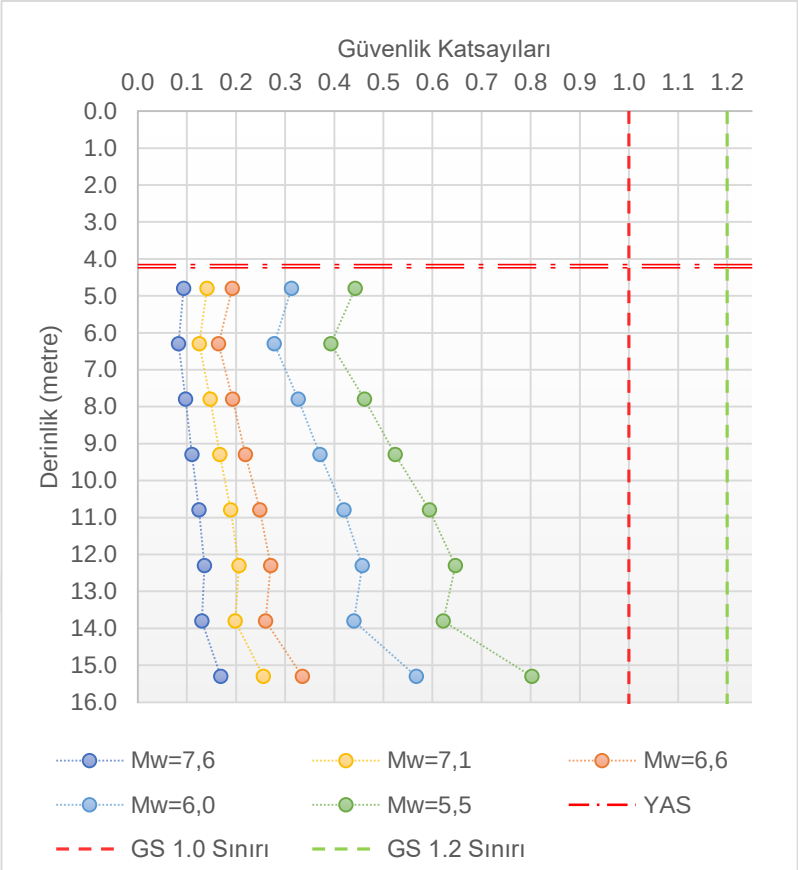
Çizelge 4.6. **(devam)**

Mw=7,1	4.80	1	1	1.04	72.35	66.46	0.94	0.62	1.15	0.05	0.06	0.41	0.14
	6.30	1	1	1.07	99.35	78.75	0.92	0.62	1.15	0.05	0.06	0.47	0.13
	7.80	2	2	2.00	126.35	91.03	0.91	0.62	1.15	0.06	0.07	0.51	0.15
	9.30	3	3	2.81	153.35	103.32	0.89	0.62	1.15	0.08	0.09	0.53	0.17
	10.80	4	4	3.73	180.35	115.60	0.87	0.62	1.15	0.09	0.10	0.55	0.19
	12.30	5	5	4.43	207.35	127.89	0.85	0.62	1.15	0.10	0.11	0.56	0.21
	13.80	5	5	4.23	234.35	140.17	0.83	0.62	1.15	0.10	0.11	0.56	0.20
	15.30	8	8	6.48	261.95	153.06	0.82	0.62	1.15	0.13	0.14	0.56	0.26
Mw=7,6	4.80	1	1	1.04	72.35	66.46	0.94	0.79	0.97	0.05	0.05	0.53	0.09
	6.30	1	1	1.07	99.35	78.75	0.92	0.79	0.97	0.05	0.05	0.60	0.08
	7.80	2	2	2.00	126.35	91.03	0.91	0.79	0.97	0.06	0.06	0.65	0.10
	9.30	3	3	2.81	153.35	103.32	0.89	0.79	0.97	0.08	0.07	0.68	0.11
	10.80	4	4	3.73	180.35	115.60	0.87	0.79	0.97	0.09	0.09	0.70	0.12
	12.30	5	5	4.43	207.35	127.89	0.85	0.79	0.97	0.10	0.10	0.71	0.14
	13.80	5	5	4.23	234.35	140.17	0.83	0.79	0.97	0.10	0.09	0.72	0.13
	15.30	8	8	6.48	261.95	153.06	0.82	0.79	0.97	0.13	0.12	0.72	0.17

Teorik analizle elde edilen $N_{1,60}$ ve derinlik azaltma faktörlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri Şekil 4.3.'te güvenlik sayıları ise Şekil 4.4.'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Teorik analiz sonucu elde edilen $N_{1,60}$ ve derinlik azaltma faktörlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri



Şekil 4.4. Teorik analiz sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları

Seed ve Idriss'e (1971) göre yapılan teorik analizin sonucunda Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1 ve Mw=7.6 deprem büyüklükleri için bütün derinliklerde sıvılaşma riski olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.3.'te N_{30}, $N_{1,60}$ ve derinlik azaltma faktörünün derinlik ile değişimi yer almaktadır. Şekil 4.4.'te ise Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1 ve Mw=7.6 deprem büyüklükleri için elde edilen güvenlik katsayılarının derinlik ile değişim grafikleri verilmiştir. Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen sadeleştirilmiş yönteme göre yapılan teorik analizin sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla NOVOLIQ (2020) programı kullanılarak 9 farklı yöntem için sıvılaşma analizi yapılmış, detayları Bölüm 4.6.'da verilmiştir.

4.6. NOVOLIQ Programı ile Zemin Sıvılaşma Analizi

NOVOLIQ (2020) programı ile Haydarpaşa Limanı için sıvılaşma analizi 9 farklı yöntem ile yapılmıştır. NOVOLIQ (2020) programına tanımlanan veriler zemin etüt raporundan alınmıştır. Tanımlanan veriler aşağıda sunulmuştur;

➢ **Zemin özelliklerinin girilmesi**

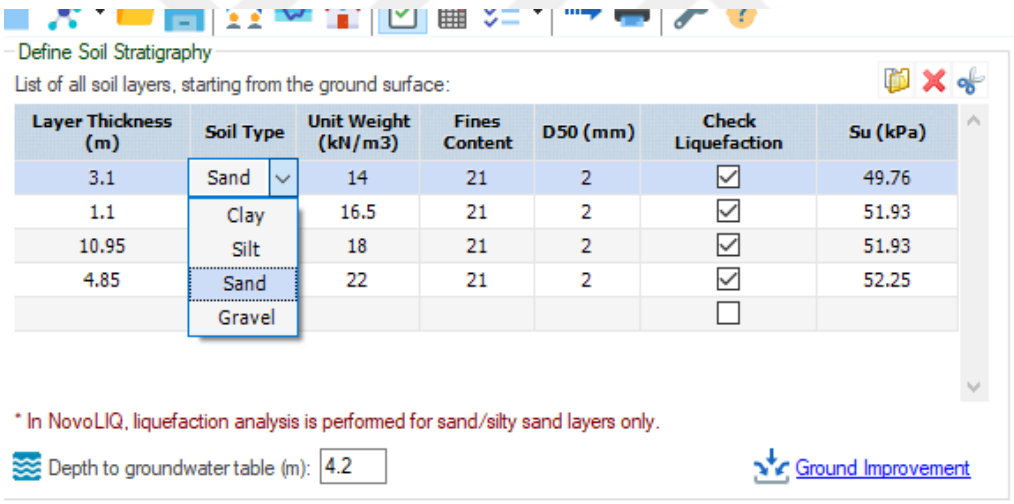
Katman kalınlığı: 1.katman için 3,10 metre, 2.katman için 1,10 metre, 3.katman için 10,95 metre ve 4.katman için 4,85 metre olarak giriş yapılmıştır.

Zemin tipi: Kil, silt, kum veya çakıl seçilebilmektedir. Zemin çeşidi olarak kum seçilmiştir.

Birim ağırlık: Katmanların birim ağırlıkları 1.katman için 14 kN/m^3, 2.katman için 16,5 kN/m^3, 3.katman için 18 kN/m^3 ve 4.katman için 22 kN/m^3 olarak giriş yapılmıştır.

İnce tane oranı (%): İnceleme alanı için %21 olarak veri girişi yapılmıştır.

Yeraltı su seviyesi: Yapılan zemin etüt raporunda tespit edilen YAS seviyesi 4,20 metredir. Şekil 4.5.'te NOVOLIQ (2020) programına girilen zemin özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.5. NOVOLIQ (2020) programına girilen zemin özellikleri

➢ **Test çeşidinin seçilmesi ve verilerinin girilmesi**

SPT deneyinden N60 ve N1(60) elde etmek için SPT-N darbelerine aşağıdaki düzeltmeler program tarafından uygulanmıştır.

Enerji seviyesi (Ce): SPT ekipman enerjisi standart %60 enerjiye göre ayarlandı.

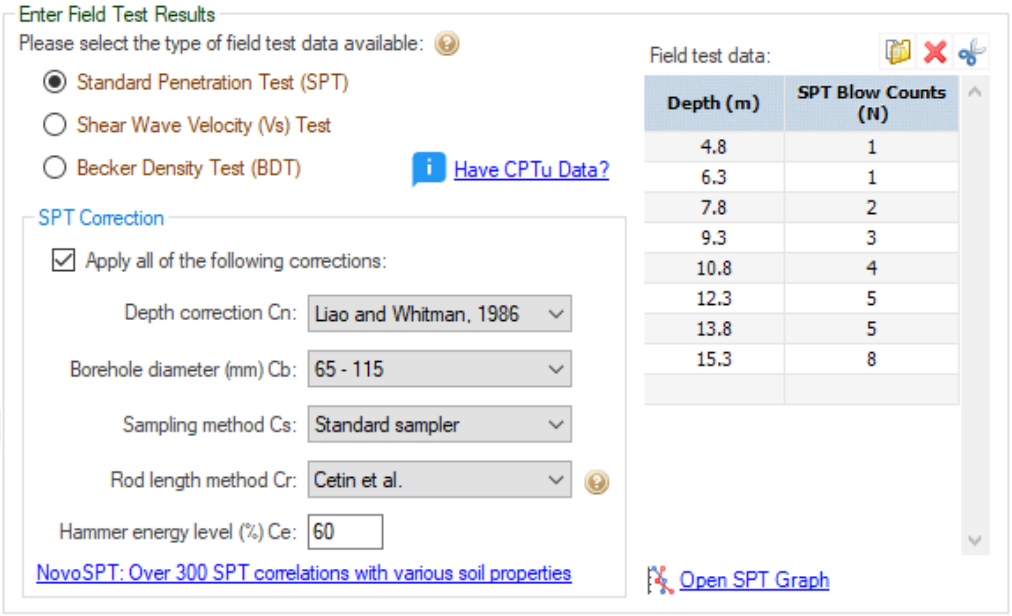
Kuyu çapı (Cb): Kuyu çapının genişliği 65-115 seçildi.

Kılıf düzeltme (Cs): Numune alıcısı "Standard sampler" olarak seçildi.

Tij uzunluğu (Cr): Çetin ve ark. dikkate alınarak seçim yapıldı.

Örtü basıncı (CN): Liao ve Whitman, 1986 seçildi.

SPT derinlikleri ve SPT-N sayıları programa girildi. Şekil 4.6.'da deney çeşidi ve düzeltme faktörleri görülmektedir.



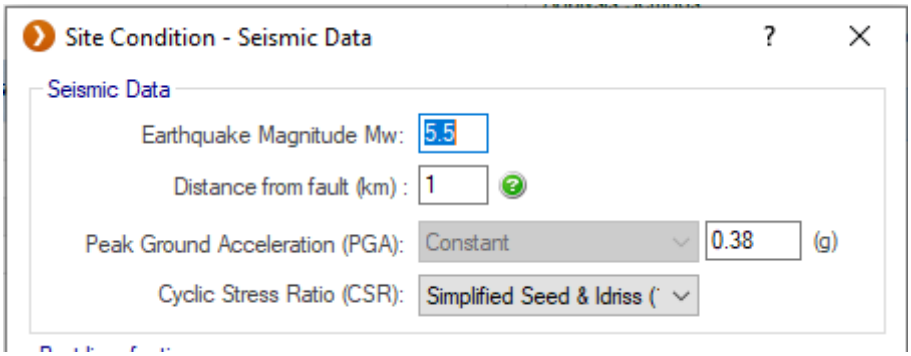
Şekil 4.6. Deney çeşidi ve düzeltme faktörlerinin seçilmesi

➢ **Deprem sismik verilerinin girilmesi**

Maksimum deprem ivmesi: DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak elde edilmiş PGA değerleri her bir deprem büyüklüğü için Çizelge 4.4.'te yer almaktadır. Bu ivmelerden maksimum olanları Mw=5,5 için 0,38 g, Mw=6,0 için 0,43 g, Mw=6,6 için 0,57 g, Mw=7,1 için 0,62 g, Mw=7,6 için 0,79 g olarak seçilmiştir.

Deprem büyüklüğü (Mw): Analiz yapılmak istenilen deprem büyüklükleri sırasıyla 5.5, 6.0, 6.6, 7.1 ve 7.6 olarak giriş yapılmıştır. Deprem büyüklüğüne göre büyüklük ölçek faktörü hesaplanmaktadır.

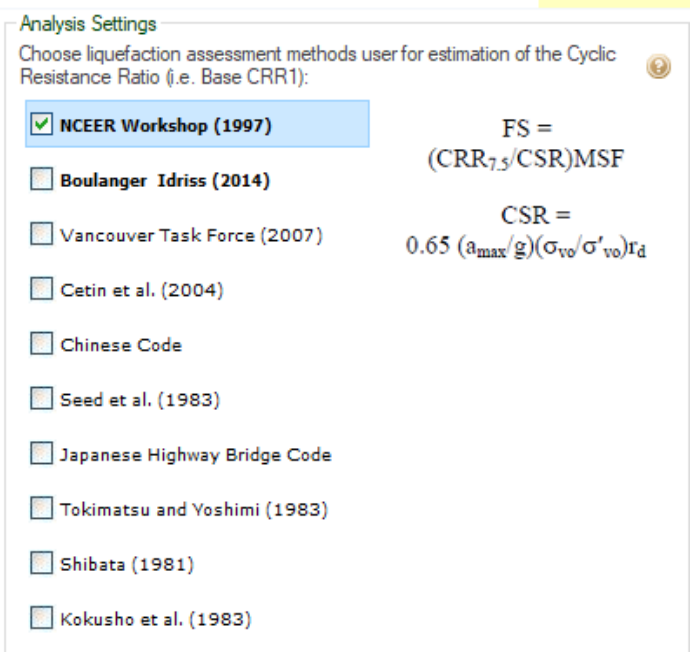
Döngüsel direnç oranı (CRR1) yöntemi: NOVOLIQ (2020), CRR1'İ hesaplamak için 10 yöntemi destekler (7.5'lik bir deprem büyüklüğü için). Büyüklük ölçek faktörü kullanılarak 7.5 dışındaki depremler için hesaplamalar yapılmaktadır. Her bir deprem büyüklüğü ve ivme değeri için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Şekil 4.7.'de Mw=5.5 için girilmiş örnek veriler gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Sismik verilerinin girilmesi

➢ **Analiz yönteminin seçilmesi**

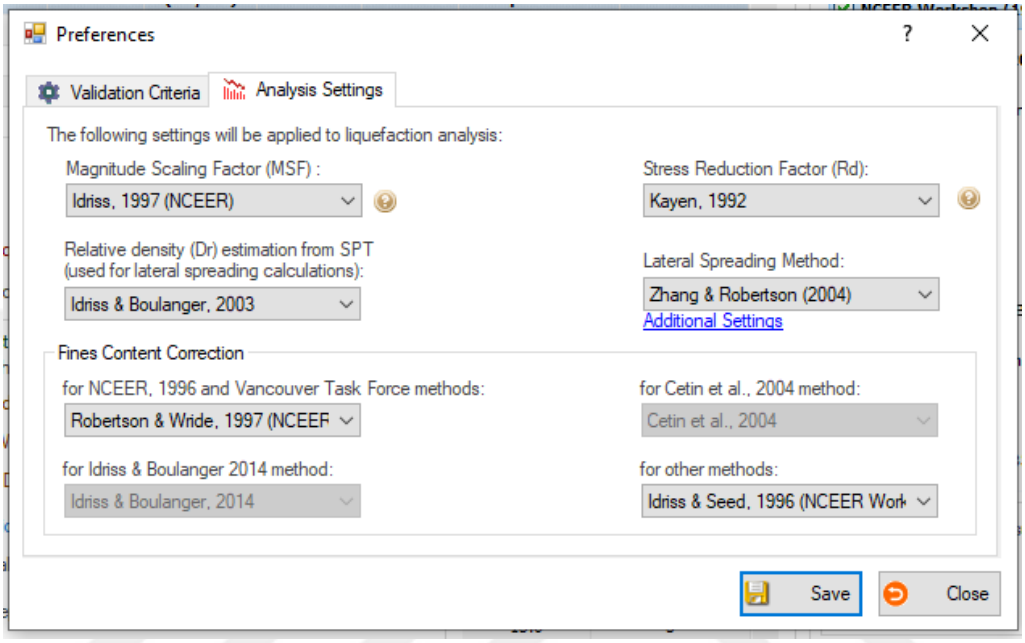
Şekil 4.8.'de gösterildiği gibi sıvılaşma analizi için çeşitli yöntemler seçilebilmektedir. Kullanıcı birden fazla analiz yöntemi seçebilir ve program çıktılarda seçilen tüm yöntemlerin karşılaştırılmasını sağlar. Bu tez çalışması kapsamında Youd ve ark. (NCEER Workshop) (1997), Boulanger & Idriss (2014), Vancouver Task Force (2007), Chinese Code, Seed ve ark. (1983), Japanese Highway Bridge Code, Tokimatsu and Yoshimi (1983), Shibata (1981) ve Kokusho ve ark. (1983) olmak üzere toplamda 9 farklı yöntem için sıvılaşma analizi yapılmıştır.



Şekil 4.8. Analiz yönteminin seçilmesi

➢ **Analiz ayarlarının seçilmesi**

Büyüklük ölçek faktörü: "Idriss, 1997 (NCEER)"; derinlik azaltma faktörü: "Kayen, 1992"; rölatif yoğunluk tahmin yöntemi: "Idriss & Boulanger, 2003" olarak seçilmiştir. Şekil 4.9.'da analiz ayarları görülmektedir.



Şekil 4.9. Analiz ayarlarının seçilmesi

➢ **Analizin başlatılması**

Zemin özellikleri, SPT testi verileri, analiz yöntemi, sismik veriler ve analiz ayarları girildikten sonra analiz başlatılmıştır.

4.6.1. NOVOLIQ programı analiz sonuçları

NOVOLIQ (2020) programı ile elde edilmiş analiz sonuçları Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.7. NOVOLIQ (2020) programı analiz sonuçları

Deprem Büyüklüğü	Derinlik (m)	Rd	Gerilmeler (kPa)		İnce Tane Yüzdesi (%)	SPT				Rölatif Sıkılık Dr (%)
			Toplam	Efektif		N	Co-(Düzeltme Faktörü)	CN	N1(60)	
Mw=5.5	4.80	0.94	72.35	66.47	21	1	0.90	1.21	1	32.90
	6.30	0.92	99.35	78.76	21	1	0.93	1.12	1	32.60
	7.80	0.91	126.35	91.04	21	2	0.96	1.04	2	35.90
	9.30	0.89	153.35	103.33	21	3	0.97	0.97	3	38.60
	10.80	0.87	180.35	115.62	21	4	0.98	0.92	4	40.90
	12.30	0.85	207.35	127.91	21	5	0.98	0.88	4	42.90
	13.80	0.83	234.35	140.20	21	5	0.99	0.84	4	42.40
	15.30	0.82	261.95	153.09	21	8	0.99	0.80	6	48.20
Mw=6.0	4.80	0.94	72.35	66.47	21	1	0.90	1.21	1	32.90
	6.30	0.92	99.35	78.76	21	1	0.93	1.12	1	32.60
	7.80	0.91	126.35	91.04	21	2	0.96	1.04	2	35.90
	9.30	0.89	153.35	103.33	21	3	0.97	0.97	3	38.60
	10.80	0.87	180.35	115.62	21	4	0.98	0.92	4	40.90
	12.30	0.85	207.35	127.91	21	5	0.98	0.88	4	42.90
	13.80	0.83	234.35	140.20	21	5	0.99	0.84	4	42.40
	15.30	0.82	261.95	153.09	21	8	0.99	0.80	6	48.20
Mw=6.6	4.80	0.94	72.35	66.47	21	1	0.90	1.21	1	32.90
	6.30	0.92	99.35	78.76	21	1	0.93	1.12	1	32.60
	7.80	0.91	126.35	91.04	21	2	0.96	1.04	2	35.90
	9.30	0.89	153.35	103.33	21	3	0.97	0.97	3	38.60
	10.80	0.87	180.35	115.62	21	4	0.98	0.92	4	40.90
	12.30	0.85	207.35	127.91	21	5	0.98	0.88	4	42.90
	13.80	0.83	234.35	140.20	21	5	0.99	0.84	4	42.40
	15.30	0.82	261.95	153.09	21	8	0.99	0.80	6	48.20
Mw=7.1	4.80	0.94	72.35	66.47	21	1	0.90	1.21	1	32.90
	6.30	0.92	99.35	78.76	21	1	0.93	1.12	1	32.60
	7.80	0.91	126.35	91.04	21	2	0.96	1.04	2	35.90
	9.30	0.89	153.35	103.33	21	3	0.97	0.97	3	38.60
	10.80	0.87	180.35	115.62	21	4	0.98	0.92	4	40.90
	12.30	0.85	207.35	127.91	21	5	0.98	0.88	4	42.90
	13.80	0.83	234.35	140.20	21	5	0.99	0.84	4	42.40
	15.30	0.82	261.95	153.09	21	8	0.99	0.80	6	48.20
Mw=7.6	4.80	0.94	72.35	66.47	21	1	0.90	1.21	1	32.90
	6.30	0.92	99.35	78.76	21	1	0.93	1.12	1	32.60
	7.80	0.91	126.35	91.04	21	2	0.96	1.04	2	35.90
	9.30	0.89	153.35	103.33	21	3	0.97	0.97	3	38.60
	10.80	0.87	180.35	115.62	21	4	0.98	0.92	4	40.90
	12.30	0.85	207.35	127.91	21	5	0.98	0.88	4	42.90
	13.80	0.83	234.35	140.20	21	5	0.99	0.84	4	42.40
	15.30	0.82	261.95	153.09	21	8	0.99	0.80	6	48.20

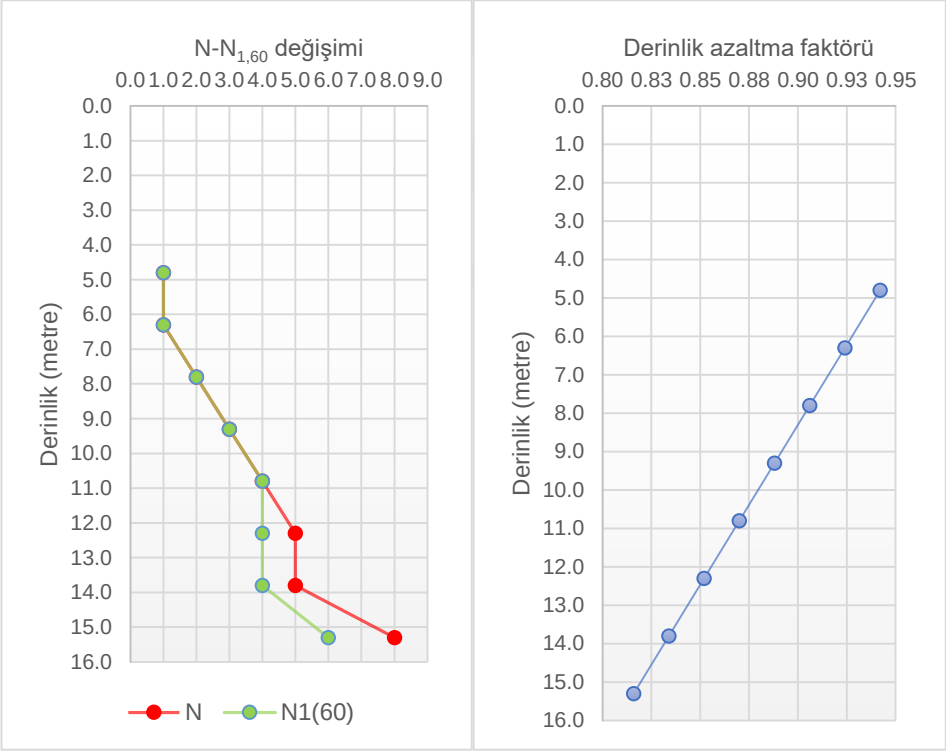
Çizelge 4.8. NOVOLIQ (2020) programı ve teorik analizde elde edilen CSR ve CRR katsayıları

Deprem Büyüklüğü	Derinlik (m)	CSR	$CRR_{7,5}$									
			Seed ve Idriss (1971), Teorik	NCEER Workshop (1997)	Boulanger & Idriss (2014)	Vancouver Task Force	Chinese Code	Seed ve ark. (1983)	Japanese Highway Bridge Code	Tokimatsu and Yoshimi (1983)	Shibata (1981)	Kokusho ve ark. (1983)
Mw=5.5	4.80	0.25	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	6.30	0.29	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	7.80	0.31	0.06	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.16
	9.30	0.33	0.08	0.06	0.10	0.06	0.08	0.15	0.11	0.15	0.21	0.16
	10.80	0.34	0.09	0.06	0.10	0.07	0.09	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	12.30	0.34	0.10	0.07	0.11	0.07	0.10	0.16	0.12	0.16	0.21	0.17
	13.80	0.34	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	15.30	0.35	0.13	0.09	0.12	0.10	0.13	0.18	0.13	0.18	0.22	0.19
Mw=6.0	4.80	0.29	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	6.30	0.33	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	7.80	0.35	0.06	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.16
	9.30	0.37	0.08	0.06	0.10	0.06	0.08	0.15	0.11	0.15	0.21	0.16
	10.80	0.38	0.09	0.06	0.10	0.07	0.09	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	12.30	0.39	0.10	0.07	0.11	0.07	0.10	0.16	0.12	0.16	0.21	0.17
	13.80	0.39	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	15.30	0.39	0.13	0.09	0.12	0.10	0.13	0.18	0.13	0.18	0.22	0.19
Mw=6.6	4.80	0.38	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	6.30	0.43	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	7.80	0.47	0.06	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.16
	9.30	0.49	0.08	0.06	0.10	0.06	0.08	0.15	0.11	0.15	0.21	0.16
	10.80	0.50	0.09	0.06	0.10	0.07	0.09	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	12.30	0.51	0.10	0.07	0.11	0.07	0.10	0.16	0.12	0.16	0.21	0.17
	13.80	0.52	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	15.30	0.52	0.13	0.09	0.12	0.10	0.13	0.18	0.13	0.18	0.22	0.19
Mw=7.1	4.80	0.41	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	6.30	0.47	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	7.80	0.51	0.06	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.16
	9.30	0.53	0.08	0.06	0.10	0.06	0.08	0.15	0.11	0.15	0.21	0.16
	10.80	0.55	0.09	0.06	0.10	0.07	0.09	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	12.30	0.56	0.10	0.07	0.11	0.07	0.10	0.16	0.12	0.16	0.21	0.17
	13.80	0.56	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	15.30	0.56	0.13	0.09	0.12	0.10	0.13	0.18	0.13	0.18	0.22	0.19
Mw=7.6	4.80	0.53	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	6.30	0.60	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.15
	7.80	0.65	0.06	0.05	0.09	0.05	0.08	0.15	0.10	0.14	0.21	0.16
	9.30	0.68	0.08	0.06	0.10	0.06	0.08	0.15	0.11	0.15	0.21	0.16
	10.80	0.70	0.09	0.06	0.10	0.07	0.09	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	12.30	0.71	0.10	0.07	0.11	0.07	0.10	0.16	0.12	0.16	0.21	0.17
	13.80	0.72	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10	0.16	0.11	0.16	0.21	0.17
	15.30	0.72	0.13	0.09	0.12	0.10	0.13	0.18	0.13	0.18	0.22	0.19

Çizelge 4.9. NOVOLIQ (2020) programı ve teorik analizde elde edilen güvenlik katsayıları

Deprem Büyüklüğü	Derinlik (m)	Güvenlik Sayısı									
		Seed ve Idriss (1971), Teorik	NCEER Workshop (1997)	Boulanger & Idriss (2014)	Vancouver Task Force (2007)	Chinese Code	Seed ve ark. (1983)	Japanese Highway Bridge Code	Tokimatsu and Yoshimi (1983)	Shibata (1981)	Kokusho ve ark. (1983)
Mw=5.5	4.80	0.44	0.44	0.79	0.44	0.69	1.29	0.90	1.20	1.83	1.35
	6.30	0.39	0.38	0.71	0.38	0.61	1.14	0.74	1.06	1.61	1.19
	7.80	0.46	0.36	0.72	0.36	0.54	1.07	0.74	1.03	1.49	1.14
	9.30	0.52	0.40	0.74	0.40	0.55	1.04	0.75	1.02	1.43	1.12
	10.80	0.59	0.42	0.78	0.43	0.60	1.04	0.75	1.03	1.40	1.12
	12.30	0.65	0.45	0.83	0.47	0.65	1.06	0.75	1.05	1.38	1.13
	13.80	0.62	0.43	0.84	0.45	0.63	1.04	0.70	1.03	1.37	1.11
	15.30	0.80	0.58	1.00	0.62	0.86	1.18	0.81	1.15	1.42	1.21
Mw=6.0	4.80	0.31	0.31	0.55	0.31	0.49	0.91	0.64	0.85	1.29	0.96
	6.30	0.28	0.27	0.49	0.27	0.43	0.80	0.52	0.75	1.14	0.84
	7.80	0.33	0.25	0.49	0.25	0.39	0.75	0.53	0.73	1.06	0.80
	9.30	0.37	0.28	0.51	0.29	0.39	0.74	0.53	0.72	1.01	0.79
	10.80	0.42	0.30	0.53	0.31	0.42	0.74	0.53	0.73	0.99	0.79
	12.30	0.46	0.32	0.56	0.33	0.46	0.75	0.53	0.74	0.98	0.80
	13.80	0.44	0.30	0.56	0.32	0.44	0.74	0.50	0.73	0.97	0.79
	15.30	0.57	0.41	0.66	0.44	0.60	0.83	0.57	0.81	1.00	0.86
Mw=6.6	4.80	0.19	0.18	0.32	0.18	0.29	0.54	0.38	0.50	0.77	0.57
	6.30	0.16	0.16	0.28	0.16	0.25	0.48	0.31	0.44	0.67	0.50
	7.80	0.19	0.15	0.28	0.15	0.23	0.45	0.31	0.43	0.62	0.48
	9.30	0.22	0.17	0.29	0.17	0.23	0.44	0.31	0.43	0.60	0.47
	10.80	0.25	0.18	0.30	0.18	0.25	0.44	0.31	0.43	0.58	0.47
	12.30	0.27	0.19	0.31	0.20	0.27	0.44	0.32	0.44	0.58	0.47
	13.80	0.26	0.18	0.31	0.19	0.26	0.43	0.29	0.43	0.57	0.46
	15.30	0.34	0.24	0.36	0.26	0.36	0.49	0.34	0.48	0.59	0.51
Mw=7.1	4.80	0.14	0.14	0.24	0.14	0.22	0.41	0.29	0.38	0.58	0.43
	6.30	0.13	0.12	0.21	0.12	0.19	0.36	0.24	0.34	0.51	0.38
	7.80	0.15	0.11	0.21	0.11	0.17	0.34	0.24	0.33	0.48	0.36
	9.30	0.17	0.13	0.21	0.13	0.18	0.33	0.24	0.33	0.46	0.36
	10.80	0.19	0.13	0.22	0.14	0.19	0.33	0.24	0.33	0.45	0.36
	12.30	0.21	0.14	0.23	0.15	0.21	0.34	0.24	0.33	0.44	0.36
	13.80	0.20	0.14	0.22	0.14	0.20	0.33	0.22	0.33	0.44	0.35
	15.30	0.26	0.18	0.26	0.20	0.27	0.37	0.26	0.37	0.45	0.39
Mw=7.6	4.80	0.09	0.09	0.16	0.09	0.14	0.27	0.19	0.25	0.38	0.28
	6.30	0.08	0.08	0.14	0.08	0.13	0.24	0.16	0.22	0.34	0.25
	7.80	0.10	0.07	0.13	0.07	0.11	0.22	0.16	0.22	0.31	0.24
	9.30	0.11	0.08	0.13	0.08	0.12	0.22	0.16	0.21	0.30	0.23
	10.80	0.12	0.09	0.14	0.09	0.13	0.22	0.16	0.22	0.29	0.23
	12.30	0.14	0.09	0.14	0.10	0.14	0.22	0.16	0.22	0.29	0.24
	13.80	0.13	0.09	0.14	0.10	0.13	0.22	0.15	0.22	0.29	0.23
	15.30	0.17	0.12	0.16	0.13	0.18	0.25	0.17	0.24	0.30	0.26

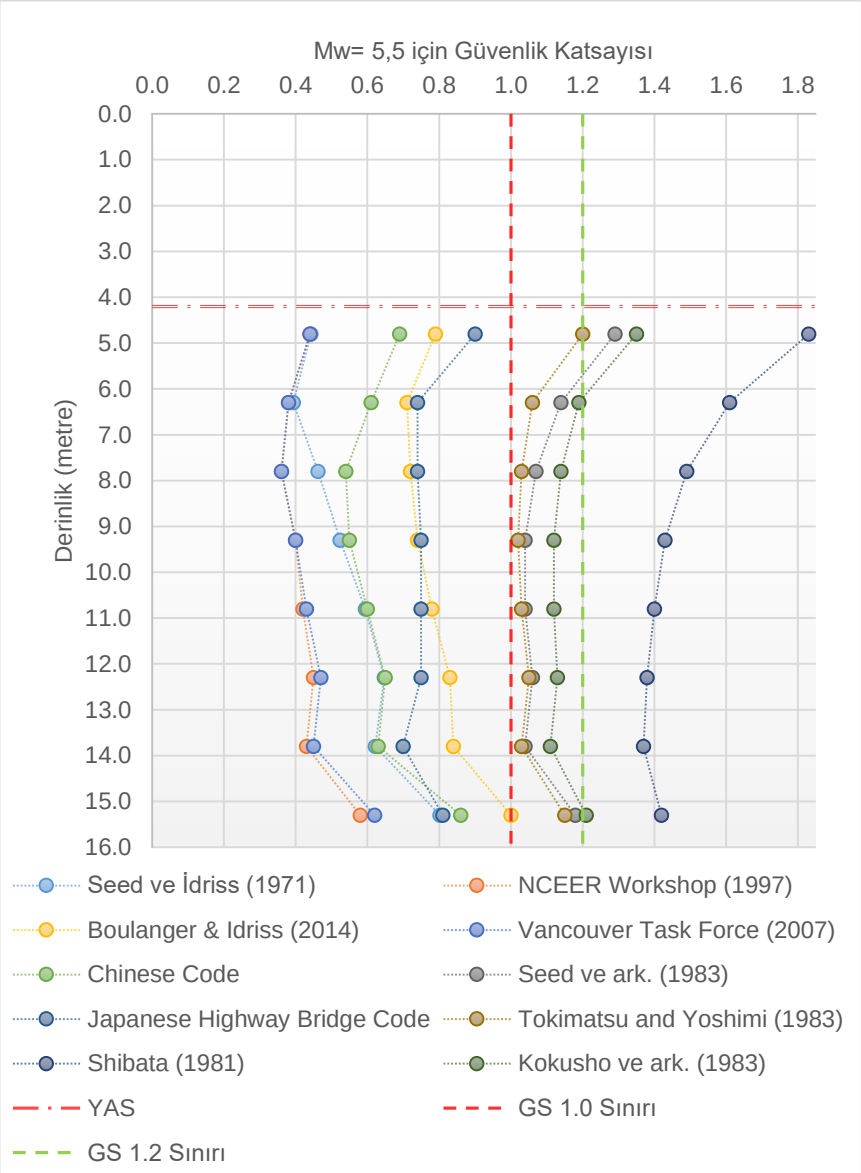
NOVOLIQ (2020) programıyla yapılan sıvılaşma analizinde elde edilen SPT deneyi düzeltmeleri Çizelge 4.7.'de yer almaktadır. Çizelge 4.8.'de CSR katsayıları ve CRR katsayıları (Teorik analiz için 1 yöntem, NOVOLIQ (2020) programı için 9 farklı yöntem) sunulmuştur. NOVOLIQ (2020) programıyla ve teorik olarak yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen güvenlik katsayıları ise (Teorik analiz için 1 yöntem, NOVOLIQ (2020) programı için 9 farklı yöntem) Çizelge 4.9.'da gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre oluşturulmuş Çizelge 4.9.'da yer alan güvenlik katsayılarından yola çıkarak sıvılaşma olacağı belirlenen noktalar (Gs<1,0) kırmızı renkle, sıvılaşma riski olan noktalar ($1,0 \leq G_s < 1.2$) sarı renk ile ve sıvılaşma riski olmayan noktalar ($G_s \geq 1.2$) ise mavi renk ile gösterilmiştir. Şekil 4.10.'da $N_{1,60}$ değerlerinin ve derinlik azaltma faktörünün derinlik ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.10. NOVOLIQ (2020) programı ile elde edilen $N_{1,60}$ ve derinlik azaltma faktörlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri

Çizelge 4.8.'de yer alan CRR değerlerinin tümü Mw=7,5 için hesaplanmıştır. Güvenlik sayısı hesaplanırken 7.5 büyüklüğünden farklı depremler için BÖF program tarafından arka planda dikkate alınarak deprem büyüklüğüne bağlı olarak işlemler gerçekleştirilir.

Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1 ve Mw=7.6 deprem büyüklükleri için sıvılaşma analizi farklı yöntemlere göre yapılmış olup Çizelge 4.9'da gösterilen güvenlik katsayılarının grafiksel gösterimleri Şekil 4.11.-4.15.'te sunulmuştur.

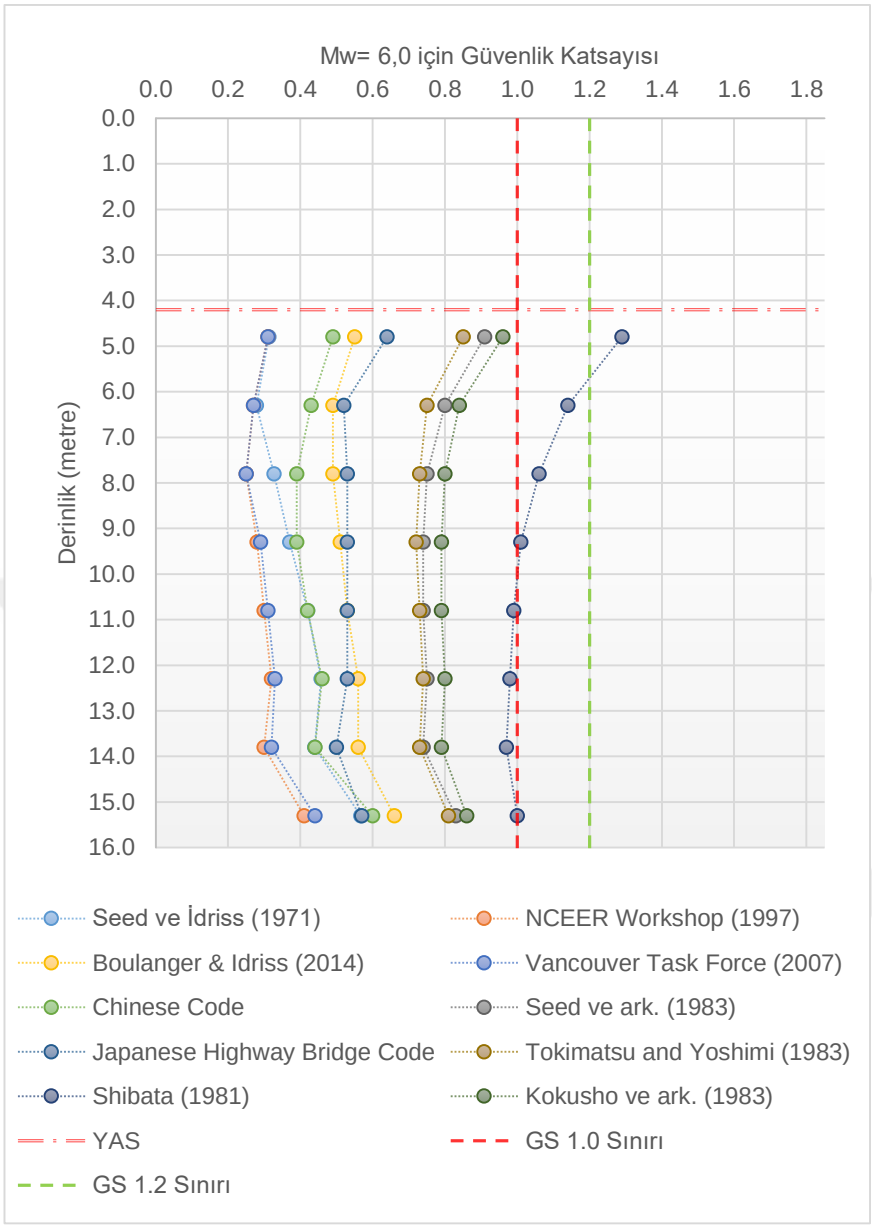


Şekil 4.11. Mw=5.5 için güvenlik katsayıları

Mw=5.5 ve PGA=0.38g değeri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizinin sonucunda 10 farklı yöntem için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs≥1.2 olarak elde edildiğinden sıvılaşma beklenmemektedir.

- Kokusho ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m ve 15.30 m'de Gs≥1.2 olarak elde edildiğinden bu derinliklerde sıvılaşma beklenmemektedir. 4.8 m ve 15.30 m arasındaki bütün değerler 1.0≤Gs<1.2 aralığında olduğundan dolayı bu derinliklerde sıvılaşma riski mevcuttur.
- Seed ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m'de Gs≥1.2 olarak elde edildiğinden 4.8 m için sıvılaşma beklenmemektedir. 4.8 m dışındaki bütün derinliklerde güvenlik katsayısı 1.0≤Gs<1.2 aralığında olduğundan dolayı bu derinliklerde sıvılaşma riski mevcuttur.
- Tokimatsu and Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m'de Gs≥1.2 olarak elde edildiğinden 4.8 m için sıvılaşma beklenmemektedir. 4.8 m dışındaki bütün derinliklerde güvenlik katsayısı 1.0≤Gs<1.2 aralığında olduğundan dolayı bu derinliklerde sıvılaşma riski mevcuttur.
- Boulanger & Idriss (2014) yöntemine göre yapılan analizde 15.30 m derinliğinde güvenlik katsayısı 1.0≤Gs<1.2 aralığında olduğundan bu derinlikte sıvılaşma riski mevcuttur. 15.30 m dışındaki bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan dolayı bu derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Japanese Highway Bridge Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Chinese Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve Idriss (1971) teorik yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Vancouver Task Force (2007) yöntemine göre yapılan analizde tüm derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- NCEER Workshop (1997) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

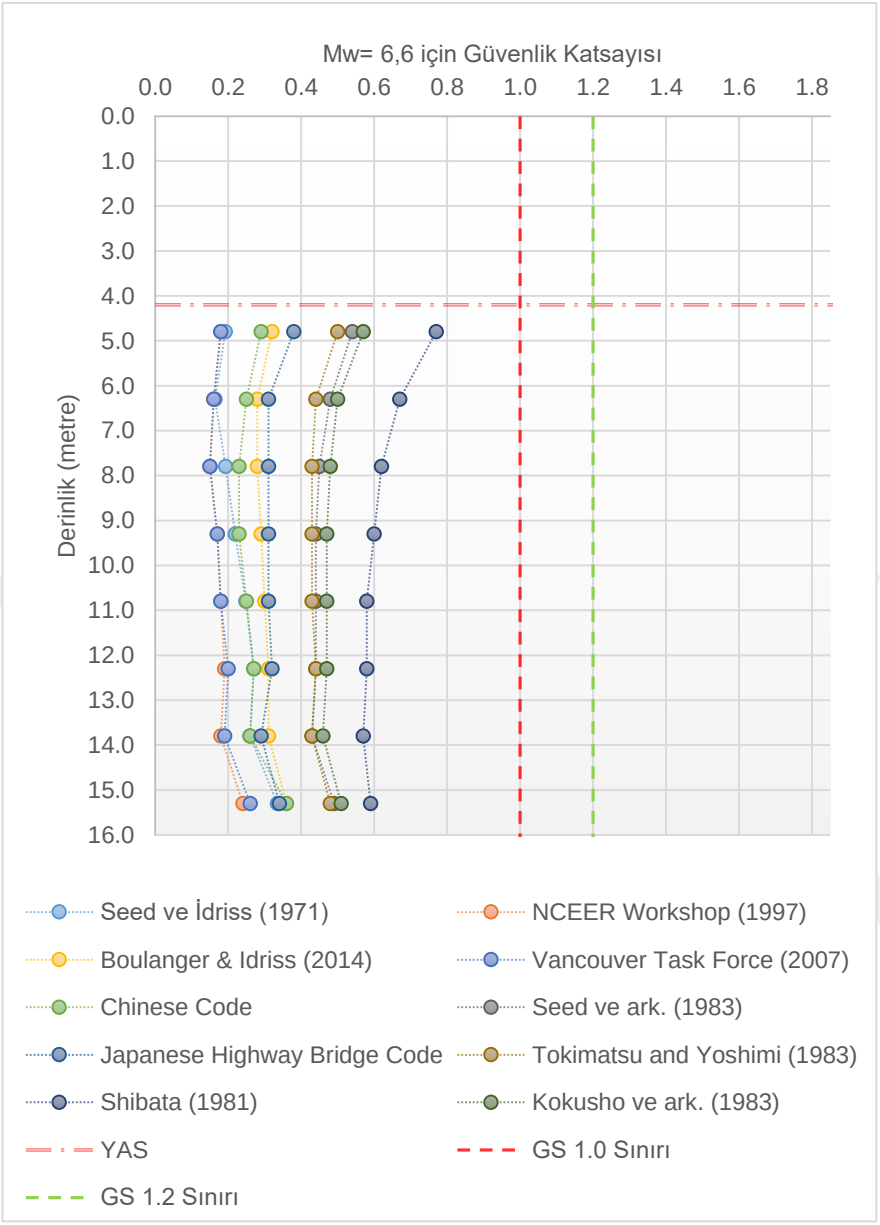


Şekil 4.12. Mw=6.0 için güvenlik katsayıları

Mw=6.0 ve PGA=0.43g değeri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizinin sonucunda 10 farklı yöntem için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m'de Gs≥1.2 olarak elde edildiğinden 4.8 m için sıvılaşma beklenmemektedir. 6.30 m, 7.80 m, 9.30 m ve 15.30 m derinliklerinde güvenlik katsayısı 1.0≤Gs<1.2 aralığında olduğundan bu derinliklerde sıvılaşma riski mevcuttur. 10.80 m, 12.30 m ve 13.80 m derinliklerinde Gs<1.0 olarak elde edildiğinden bu derinlikler için sıvılaşma beklenilmektedir.

- Kokusho ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan dolayı tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Tokimatsu and Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan dolayı tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Boulanger & Idriss (2014) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Japanese Highway Bridge Code yöntemine göre yapılan analizde tüm derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Chinese Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve Idriss (1971) teorik yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Vancouver Task Force (2007) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- NCEER Workshop (1997) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

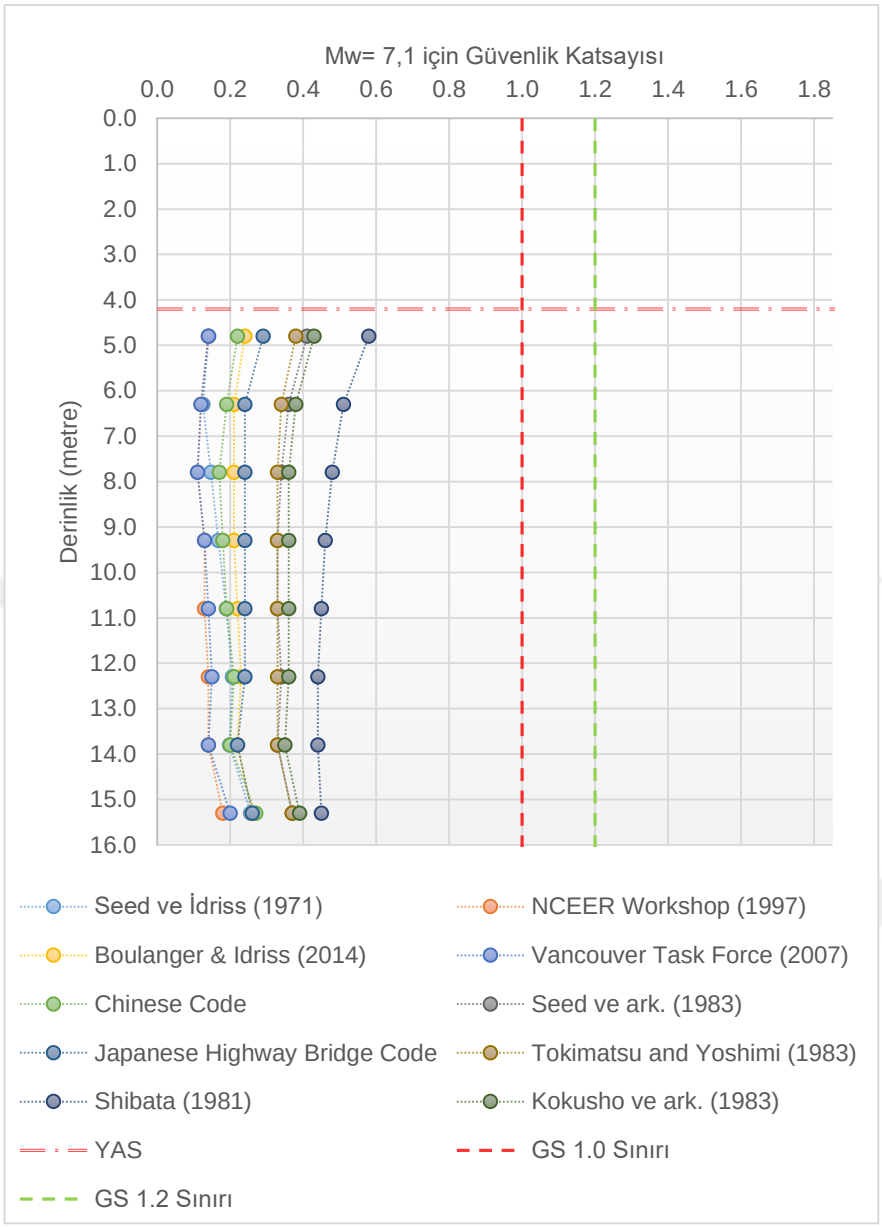


Şekil 4.13. Mw=6.6 için güvenlik katsayıları

Mw=6.6 ve PGA=0.57g değeri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizinin sonucunda 10 farklı yöntem için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Kokusho ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

- Tokimatsu and Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Boulanger & Idriss (2014) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Japanese Highway Bridge Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Chinese Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve Idriss (1971) teorik yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Vancouver Task Force (2007) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- NCEER Workshop (1997) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

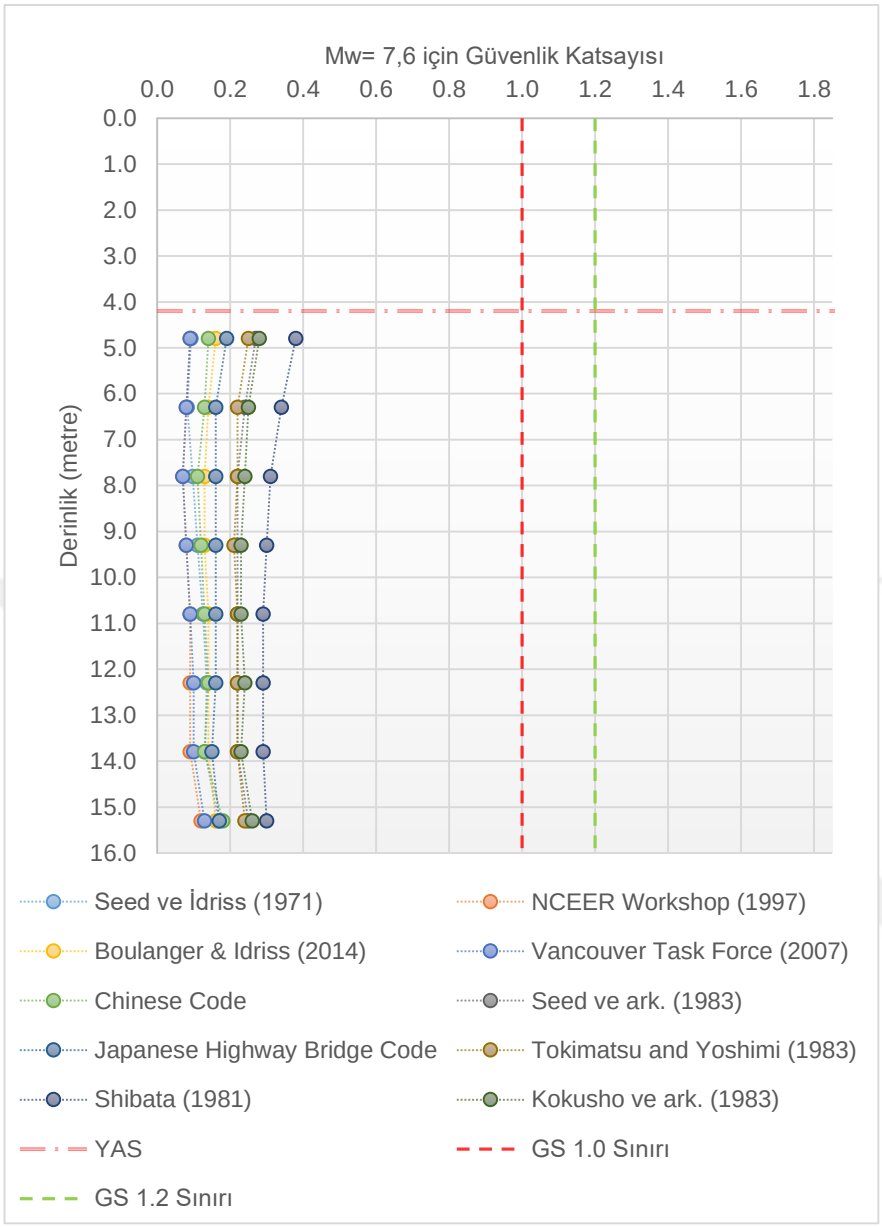


Şekil 4.14. Mw=7.1 için güvenlik katsayıları

Mw=7.1 ve PGA=0.62g değeri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizinin sonucunda 10 farklı yöntem için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Kokusho ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

- Tokimatsu and Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Boulanger & Idriss (2014) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Japanese Highway Bridge Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Chinese Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve Idriss (1971) teorik yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Vancouver Task Force (2007) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- NCEER Workshop (1997) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.



Şekil 4.15. Mw=7.6 için güvenlik katsayıları

Mw=7.6 ve PGA=0.79g değeri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizinin sonucunda 10 farklı yöntem için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Kokusho ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

- Tokimatsu and Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Boulanger & Idriss (2014) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Japanese Highway Bridge Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Chinese Code yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Seed ve Idriss (1971) teorik yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- Vancouver Task Force (2007) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.
- NCEER Workshop (1997) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde Gs<1.0 olduğundan tüm derinliklerde sıvılaşma beklenilmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, gerçek deprem senaryoları kullanılarak teorik yöntem ve bilgisayar programları aracılığı ile Haydarpaşa Limanı çevresi için sıvılaşma potansiyeli 10 farklı yöntemle incelenmiştir. İlgili alanın sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için DEEPSOIL (2020) programı ile yapılan sismik saha analizlerinde Mw=5.5, Mw=6.0, Mw=6.6, Mw=7.1 ve Mw=7.6 büyüklüklerindeki deprem kayıtları (Bolu-Düzce, Çankırı-Orta, İzmir-Seferihisar ve İzmit-Gölcük) kullanılmış olup doğrusal olmayan yöntem seçilerek her deprem için PGA değerleri elde edilmiştir. Sadeleştirilmiş teorik yöntem ile birlikte inceleme alanı için toplamda 10 farklı yönteme göre sıvılaşma analizi tamamlanmış olup elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında detayları Bölüm 4'te sunulan analizler sonucunda Mw=6.6, Mw=7.1 ve Mw=7.6 deprem büyüklükleri için tüm derinliklerde sıvılaşmanın beklendiği tespit edilmiştir.

Mw=6.0 büyüklüğü için Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde sadece 4.8 m'de sıvılaşma beklenmemektedir. Geri kalan tüm yöntemlerin tüm derinliklerinde sıvılaşma beklenmekte ya da sıvılaşma riski bulunmaktadır.

Mw=5.5 büyüklüğü için Shibata (1981) yöntemine göre yapılan analizde bütün derinliklerde sıvılaşma beklenmemektedir. Kokusho ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m ve 15.30 m'de sıvılaşma beklenmemektedir. Seed ve ark. (1983) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m'de sıvılaşma beklenmemektedir. Tokimatsu and Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizde 4.8 m'de sıvılaşma beklenmemektedir. Geri kalan tüm yöntemlerin tüm derinliklerinde sıvılaşma beklenmekte ya da sıvılaşma riski bulunmaktadır.

Sonuç olarak; tüm yöntemlerin analiz sonuçları birlikte dikkate alındığında ilgili alanda belirtilen büyüklüklerdeki depremler için bütün derinliklerde sıvılaşmanın beklendiği veya sıvılaşma riskinin söz konusu olduğu belirlenmiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, en riskli senaryoların dikkate alınmasıyla SPT verileri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizleri sonucunda ilgili alanda belirtilen büyüklüklerdeki depremler için bütün derinliklerde sıvılaşmanın beklendiği veya sıvılaşma riskinin söz konusu olduğu şeklinde bir değerlendirme yapılmıştır. Sıvılaşma olayı ve sonrasında ortaya çıkabilecek sorunlar düşünüldüğünde ilgili bölgedeki zemin için gerekli önlemlerin alınarak arazi şartları ve arazi üzerine inşa edilecek yapı tipine bağlı olarak uygun zemin iyileştirme yönteminin seçilip sıvılaşma potansiyeli olan bölgeye uygulanması tavsiye edilmektedir. Doğru zemin iyileştirilme yönteminin seçilmesi hem güvenlik hem de maliyet açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında dikkate alınan meydana gelmiş depremlerin ilgili saha için simüle edilerek sıvılaşma analizlerinin yürütülmesi yaklaşımı gerçek duruma daha yakın analizlerin gerçekleştirilmesini sağladığından yapılacak sıvılaşma analizlerinde bu yöntemin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

AFAD, 2021. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Deprem Dairesi Başkanlığı, Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi.

ALPARSLAN, H., 2006. Sıvılaşma Potansiyeline Sahip Zeminlerde İyileştirme Yöntemlerine Ait Kriterlerin Belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, s.29-30.

ANDREWS, D. C., ve MARTIN, G. R., 2000. Criteria for Liquefaction of Silty Soils. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand, 1-8.

ANDRUS, R. D., ve STOKOE II, K. H., 1997. Liquefaction Resistance based on Shear Wave Velocity. Proc. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Cntr. for Earthquake Engng. Res. State Univ. of New York at Buffalo, p.89-128.

ANDRUS, R. D., ve STOKOE II, K. H., 2000. Liquefaction Resistance of Soils from Shear Wave Velocity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(11): 1015-1025.

ANSAL, A., 1999. Depremlerde Yerel Zemin Davranışları. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 384: 64-68.

ANSAL, A., ve ÖĞÜNÇ, G., 1981. Dinamik Üç Eksenli Sıvılaşma Deneyleri ve Tekrar Sıvılaşma. Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, 8(35): 61-82.

ARSLAN, A., 2020. Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Zemin Sıvılaşması Gözlenen Alanda Zemin İyileştirme Uygulama Örneği. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, s.2-15.

ATAK, V. O., AKSU, O., BİRCAN, Ö., AYDAN, Ö., KOCA, H., ve KARAKAYA, M., 2005. Zemin Sıvılaşması ve Faylanmaya Bağlı Yer Değişimlerinin Hava Fotoğrafları Yardımıyla Tespiti. Harita Dergisi, 134: 44-60.

ATAK, V. O., AKSU, O., ÖNDER, M., AYDAN, Ö., ve TOZ, G., 2003. Zeminlerde Sıvılaşmaya ve Faylanmaya Bağlı Yer Değiştirmelerin Yön ve Büyüklüklerinin Fotogrametrik Yöntemlerle Belirlenmesi. Küçükçekmece ve Yakın Çevresi Teknik Kongresi, İstanbul, 1-5.

ATEŞ, A., 2003. Sıvılaşma ve Sıvılaşma Metodlarının İrdelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s.11-33.

AYAD, F., BEKKOUCHE, A., ve HOUMADI, Y., 2014. Sensitivity Analysis of Soil Liquefaction Potential. Earth Science Research, 3(1): 14-24.

BARGU, S., OSMANŞAHİN, İ., ve ÖZTOPRAK, S., 2000. Gürsu (Bursa) Alanının Jeolojik ve Jeoteknik Araştırma Raporu. İstanbul Üniversitesi Araştırma ve Yardım Vakfı Eğitim Faliyetleri İşletmesi.

BOULANGER, R. W., ve IDRISS, I. M., 2014. CPT and SPT based Liquefaction Triggering Procedures. Report No: UCD/CGM.-14, 1, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, pp.138.

CANBEY, E., ERSOY, U., ÖZCEBE, G., SUCUOĞLU, H., ve WASTI, S. T., 2008. Binalar için Deprem Mühendisliği Temel İlkeler. Bizim Büro Basımevi, Ankara.

CASTELLARO, S., PANZERI, R., MESITI, F., ve BERTELLO, L., 2015. A Surface Siesmic Approach to Liquefaction. Soil Dynamics and Eartquake Engineering, 77: 35-46.

CASTRO, G., POULOS, S. J., FRANCE, J. W., ve ENOS, J. L., 1982. Liquefaction Induced by Cyclic Loading. Report Submitted to the National Science Found.,Washington D.C., 80p.

CHINESE CODE, 2010. Code for Seismic Design of Buildings-GB 50011-2010. National Standard of the People's Republic of China, China Architecture and Building Press, Beijing.

CODUTO, D. P., 1994. Foundation Design Principles and Practices. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

ÇAVUŞ, U. Ş., 2004. Deprem Sebebiyle Zeminlerin Sıvılaşma Potensiyelinin "Bulanık Mantık Modellemesi (Fuzzy Logic Modelling)" ile Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta, s.31-39.

ÇETİN, K. Ö., ve UNUTMAZ, B., 2004. Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı. Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 430-2004/2, s.32-37.

ÇIKLAİBLİKÇİ, P., 2019. Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Sonrasında Meydana Gelen Deplasmanların Belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, s1.

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

DERE, A., 2009. Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi ve Adapazarı için Örnek Bir Uygulama. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, s.10-50.

DIXIT, J., DEWAIKAR, D. M., ve JANGID, R. S., 2012. Assessment of Liquefaction Potential Index for Mumbai City. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,12: 2759-2768.

DOBRY, R., STOKOE II, K. H., LADD, R. S., ve YOUD, T. L., 1981. Liquefaction Susceptibility from S-Wave Velocity. Proceeedings, In Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convertion, St. Louis.

DOĞAN, H. M., 2015. Sismik Sıvılaşma Mekanizması ve Buna Bağlı Oluşan Deformasyonların İncelenmesi: Adapazarı Bölgesi. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, s.20-27.

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

DUMAN, E. S., 2013. Erzincan İl Merkezi ve Çevresindeki Zeminlerin Standart Penetrasyon Deneyi Verileri Kullanılarak Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, s.25-38.

EMİROĞLU, T., 2018. Serbest Arazi Koşullarında ve Düşey Gerilme Artışı Etkisinde Sıvılaşma Analizi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, s.4-10.

ERKEN, A., ÖZAY, R., KAYA, Z., ÜLKER, M. B. C., ve ELİBOL, B., 2004. Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Taşıma Gücü Kayıpları. Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 431- 2004/3, s.7-26.

ERTEK, M. K., 2015. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi ve Oturmalara Etkisinin İncelenmesi: Atakum Örneği. On dokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, s.36-39.

ERTUŞ, L., 2017. Erciş (Van) Yerleşiminde Sıvılaşmayla İlişkili Olası Yüzey Deformasyonlarının Değerlendirilmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van, s.27-35.

FEI-HONG, G., 2016. Evaluation of Soil Liquefaction in Harbor District in Tianjin City. The Open Civil Engineering Journal, 10: 293-300.

GÜNGÖR, L., 2007. İzmir-Mavi Şehir Kuzey Üst Bölgesi Kapsamındaki Sıvılaşma Riskinin Teorik ve Uygulamalı Olarak Değerlendirilmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, s.19-55.

HAKAN, T., 2019. Zeminlerin Sıvılaşmasının Tahmini için İstatistik ve Yapay Zeka'ya Dayalı Modeller Oluşturma. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, s1.

HASHASH, Y. M. A., MUSGROVE, M. I., HARMON, J. A., ILHAN, O., XING, G., NUMANOGLU, O., GROHOLSKI, D. R., PHILLIPS, C. A., ve PARK, D., 2020. DEEPSOIL 7.0-User Manual. IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.

HAZEN, A., 1920. Hydraulic Fill Dams. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 83: 1713–1745.

HUANG, C., SUI, Z., WANG, L., ve LIU, K., 2015. Mitigation of Soil Liquefaction Using Stone Columns: An Experimental Investigation. Marine Georesources and Geotechnology, 34(3): 244-251.

IDRISS, I. M., ve BOULANGER, R. W., 2006. Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. J. Soil Dynamics and Earthquake Eng. 26: 115–30.

ISHIHARA, K., 1980. Subsurface Soil Liquefaction During Earthquakes in Japan University of Tokyo. Bunkyo-ku, Tokyo, p.184-192.

ISHIHARA, K., 1985. Stability of Natural Deposits During Earthquakes. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1: 321-376.

JAPAN ROAD ASSOCIATION, 2002. Design Specifications for Highway Bridges. Part V, Seismic Design, Tokyo:Maruzen, Japanese.

KARALI, S., 2019. Sıvılaşma Kaynaklı Zemin Deformasyonlarının Olasılıksal Yöntemlerle İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, s.16-17.

KARANLIK, S., 2006. Hatay Altınköy Çevresinin Zemin Sıvılaşma Riskinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, s.17-60.

KAYEN, R. E., MITCHELL, J. K., SEED, R. B., LODGE, A., NISHIO, S., ve COUNTINHO, R., 1992. Evaluation of SPT-CPT and Shear Wave-based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data. Proceedings, Fourth Japan-US, Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, M. Hamada and T.D. O'Rourke, (Eds.), Honolulu, Hawaii, Buffalo, NY, 1: 177-204.

KOÇ, G., 2007. Gölcük ve Çevresinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, s.30-38.

KOÇKAR, M. K., 2006. Engineering Geological and Geotechnical Site Characterization and Determination of The Seismic Hazards of Upper

Pliocene and Quaternary Deposits Situated Towards The West of Ankara. METU, PhD Thesis, Ankara, 401p.

KOKUSHO, T., YOSHIDA, Y., ve ESASHI, Y., 1983. A Study on a Seismic Stability of Dense Sand (Part 2)-Evaluation Method based on SPT N-Value. Technical Report of Central Research Institute of Electric Power, Research Report No: 383026, Japanese, p.1-32.

KRAMER, S. L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653p.

KRAMER, S. L., ve ELGAMAL, A., 2001. Modeling Soil Liquefaction Hazards for Performance-based Earthquake Engineering. Pacific Earthquake Engineering Research Center Report 2001/13, College of Engineering University of California, Berkeley.

LIAO, S. S. C., ve WHITMAN, R. V., 1986. Overburden Correction Factor for SPT in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, 3: 373-377.

LOMA PRİETA DEPREMİNDE OLUŞAN KUM KONİSİ, 2021. Erişim tarihi: 09/10/2021, Erişim adresi: https://sites.google.com/site/earthquakegeohazardinadelaide/what-are-earthquakes/effects-of-earthquakes

LOMA PRİETA DEPREMİNDE OLUŞAN KUM VOLKANI, 2021. Erişim tarihi: 09/10/2021, Erişim adresi: https://depts.washington.edu/liquefy/selectpiclique/lomaprieta89/sandboilbaybridge3.jpg

MOLLAMAHMUTOĞLU, M., ve BABUÇCU, F., 2006. Zeminlerde Sıvılaşma: Analiz ve İyileştirme Yöntemleri. Gazi Kitapevi, ANKARA.

MOLLAMAHMUTOĞLU, M., ve KAYABALI, K., 2004. Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı. Gazi Kitapevi, ANKARA, ISBN 0-07-137782-4.

MONKUL, M. M., GÜLTEKIN, C., GÜLVER, M., AKIN, Ö., ve ESELLER-BAYAT, E., 2015. Estimation of Liquefaction Potential from Dry and Saturated Sandy Soils Under Drained Constant Volume Cyclic Simple Shear Loading. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 75: 27-36.

MUDULI, P. K., ve DAS, S. K., 2015. Model Uncertainty of SPT-based Method for Evaluation of Seismic Soil Liquefaction Potential Using Multi-Gene Genetic Programming. Soils and Foundations, 55(2): 258-275.

NAS, M., 2013. Trabzon Akyazı Sahil Dolgu Alanı Zeminlerinde Sismik Kaynaklı Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, s.13-206.

NOVO TECH SOFTWARE, 2020. NOVOLIQ, Versiyon 4.0, Kullanım Kılavuzu. Vancouver, Kanada, s.3-27.

OLGUN, C. G., ve MARTIN, J. R., 2008. Effectiveness of Jet-Grout Columns for Mitigation of Liquefaction During Earthquakes. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Science Press Beijing and Springer, p.768-773.

ORHAN, M., ve ATEŞ, A., 2011. Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Taşıma Gücü Kayıpları: Manisa (Saruhanlı) Örneği. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(1): 52-70.

OVALI, T. N., 2010. Antakya Bölgesinin Sismik Yer Hareketinin Hasar Potansiyeli. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay, s.25-35.

ÖNALP, A., ve AREL, E., 2002. Siltlerin Sıvılaşma Yeteneği: Adapazarı Kriteri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Bildiriler Kitabı, Eskişehir, Ekim, s.363-372.

ÖNALP, A., BOL, E., ve URAL, N., 2006. Siltlerin Sıvılaşabilirliği: Adapazarı Kriterinin Geliştirilmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

ÖZ, M. Y., 2015. Sıvılaşmaya Karşı Jet Grouting Yöntemi ile Örnek Bir İyileştirme Uygulamasının İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, s.5-8.

ÖZAYDIN, K., 1982. Zemin Dinamiği. Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, No.1, İstanbul.

ÖZÇEP, F., ve ZARIF, H., 2009. Variations of Soil Liquefaction Safety Factors Depending on Several Design Earthquakes in the City of Yalova (Turkey). Scıentıfıc Research and Essays, 4: 594-604.

ÖZENÇ, S., 2019. Pm4sand Zemin Bünye Modeline Ait Parametrelerin Yüzeysel Temellerde Sıvılaşma Kaynaklı Deformasyonlara Etkisi. İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, s.5-81.

ÖZENER, P. T., 2007. Depremde Tabakalı Kum Zeminde Oluşan Sıvılaşma ve Sıvılaşma Sonrası Davranışın Model Deneylerle Araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, s.37-55.

ÖZTÜRK, S., 2016. Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirilmesi: Samsun-Tekkeköy Örneği. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, s.18-19.

POULOS, S. J., CASTRO, G., ve FRANCE, J. W., 1985. Liquefaction Evaluation Procedure. J. Geotechnical Eng., ASCE, 111(6): 772–792.

RAHN, P. H., 2006. Mühendislik Jeolojisi (Çevresel Bir Yaklaşım). Gazi Kitabevi, Ankara.

SEED, H. B., 1966. A Method for Earthquake Resistant Design of Earth Dams. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 92: 13-41.

SEED, H. B., 1976. Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes. ASCE National Convention on Liquefaction Problems in Engineering, P.A., p.27-52.

SEED, H. B., ve DE ALBA, P., 1986. Use of SPT and CPT Tests for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands. In Use of In-situ Tests in Geotechnical Engineering, ASCE Geotechnical Special Publication, 6: 281-302.

SEED, H. B., ve IDRISS, I. M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97(9): 1249-1273.

SEED, H. B., ve IDRISS, I. M., 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 134p.

SEED, H. B., IDRISS, I. M., ve ARANGO, I., 1983. Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. Journal of Geotechnical Engineering, 109(3): 458-482.

SEED, H. B., ve LEE, K. L., 1966. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. Univercity of California, Departmant of Civil Eng., Berkeley, p.65-134.

SEED, H. B., ve PEACOCK, W. H., 1977. Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics. ASCE.

SEED, H. B., TOKIMATSU, K., HARDER, L. F., ve CHUNG, R., 1985. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(12): 1425-1445.

SHIBATA, T., 1981. Relations Between N-Value and Liquefaction Potential of Sand Deposits. In Proc, 16th Annual Convention of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokio, p.621-624.

SILVER, M. L., ve SEED, H. B., 1971. Volume Changes in Sands During Cyclic Loading. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.

SİMS VE GARVİN'İN KUM KAYNAMASI MODELİ, 2021. Erişim tarihi: 09/10/2021, Erişim adresi: https://www.findglocal.com/IT/Perugia/477457638939414/Construingegneria-Studio-Associato

SİVRİKAYA, O., ve TOĞROL, E., 2019. Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları. Birsen Yayınevi, İstanbul.

SKEMPTON, A. W., 1986. Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation. Geotechnique, 36(3): 425-447.

ŞAYLAN, F. S., 2006. Erzincan Ovasının Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analizi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, s.16-55.

ŞEN, G., 2004. Gümüşler Belediyesi Mücavir Alanının Sıvılaşma Analizi ve Coğrafi Bilgi Sisteminde Uygulaması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, s.47-68.

ŞİŞMAN, E., 2006. Fethiye Yerleşim Alanındaki Zeminlerin SPT ve Kayma Dalga Hızı Verileri ile Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s.30-39.

TASK FORCE REPORT, 2007. Geotechnical Design Guidelines for Buildings on Liquefiable Sites in Accordance with NBC 2005 for Greater Vancouver Region.

TAYLAN, Z. N., UYSAL, H., LAV, M. A., ve ERKEN, A., 2007. Sıvılaşma ve Taşıma Gücü Kaybı Sonucu Oluşan Oturmaları Kapsayan Vaka Analizi. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, s.471-482.

TERZAGHI, K., 1925. Principles of Soil Mechanics. Engineering News-Record, 95(19-27): 19-32.

TERZAGHI, K., PECK, R. B., ve MESRI, G., 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd Edition). John Wiley and Sons Inc, New York, 644p.

TEZCAN, S. S., ve ÖZDEMİR, Z., 2004. Liquefaction Risk Analysis and Mapping Techniques. Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları, Bebek, İstanbul, 245s.

TOKIMATSU, K., ve YOSHIMI, Y., 1983. Empirical Correlation of Soil Liquefaction based on SPT N-Value and Fines Content. Soils and Foundations, 23(4): 56-74.

TONAROĞLU, M., 2006. Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, s.10-19.

TOSUN, H., SEYREK, E., ORHAN, A., SAVAŞ, H., ve TÜRKÖZ, M., 2011. Soil Liquefaction Potential in Eskişehir. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., NW Turkey, 11: 1071-1082.

TS EN ISO 22475-1, 2006. Jeoteknik Etüt ve Deneyler - Numune Alma Yöntemleri ve Yeraltı Suyu Ölçümleri - Bölüm 1: Teknik Uygulama Esasları. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 114s.

ULAMIŞ, K., 2002. Bolu İli D100 Karayolu ile Büyüksu Deresi Arasındaki Normal Konsolide Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri Arasındaki İlişkiler. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s.15-35.

ULUSAY, R., 2010. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 5(38): 10-458.

URAL, N., 2008. İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, s.4-11.

UYAR, O., 2006. Kayma Dalga Hızı ve Basitleştirilmiş Prosedüre Bağlı Karşılaştırmalı Olarak Sıvılaşma Direnç Değerlendirmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, s.8-23.

UYANIK, O., 2002. Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, s.3-49.

ÜÇÖZ, E., 2002. Yerin Sıvılaşma Potansiyelinin Sismik Verilerle Analizi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s.20-32.

ÜNDÜL, Ö., ve GÜRPINAR, O., 2003. Çokal Vadisindeki (Gelibolu) Alüvyal Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyeli. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi, 16(1): 67-80.

VAN DEPREMİ'NDE (2011) MEYDANA GELEN ZEMİN OTURMASI, 2021. Erişim tarihi: 09/10/2021, Erişim adresi: https://web.itu.edu.tr/~eedmi/Van2011Eq/index.html

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

WANG, W. S., 1979. Some Findings in Soil Liquefaction. Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Beijing, China.

YALÇIN, A., GOKCEOGLU, C., ve SÖNMEZ, H., 2008. Liquefaction Severity Map for Aksaray City Center (Central Anatolia, Turkey). Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 8: 641-649.

YASUDA, S., 2004. Evaluation of Liquefaction-Induced Deformations of Structures. Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p.199-230.

YATMAN, Z. Ö., 2006. Sıvılaşma Sonucu Oluşan Zemin Yetersizliklerinin İrdelenmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, s.7-29.

YAVUZER, D., 2004. Yalova Kenti Alüvyal Zeminlerinin Mühendislik Jeolojisi Özellikleri. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sivas, 108s.

YOLLARDA YANAL YAYILMA SONUCU OLUŞAN HASARLAR, 2021. Erişim tarihi: 09/10/2021, Erişim adresi: https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=lateral%20spread%20or%20flow

YOSHIMI, Y., 1967. An Experimental Study of Liquefaction of Saturated Sands. Soils and Foundations, 7(2): 20-32.

YOUD, T. L., ve IDRISS, I. M., 1997. Proceeeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. State University of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research, Report No: NCEER-97-0022.

YOUD, T. L., IDRISS, I. M., ANDRUS, R. D., ARANGO, I., CASTRO, G., CHRISTIAN, J. T., DOBRY, R., FINN, W. D. L., HARDER, JR. L. F., HYNES, M. E., ISHIHARA, K., KOESTER, J. P., LIAO, S. S. C., MARCUSON III 13, W. F., MARTIN, G. R., MITCHELL, J. K., MORIWAKI, Y., POWER, M. S., ROBERTSON, P. K., SEED, R. B., ve STOKOE II, K. H., 2001. Liquefaction Resistance of Soils. Summary Report from the NCEER and NSF Workshops, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10): 817-833.

ZEMİN ETÜT RAPORU, 2019. Haydarpaşa 5 Numaralı Bina (Eski Liman ve Gümrük Binası) Parsel Bazında Zemin ve Temel Etüdü Veri Raporu. İstanbul İli Kadıköy İlçesi Rasim Paşa Mahallesi 54 Pafta 240 Ada 16 Parsel, Rapor No:İZ0319, Tarih: 13.03.2019.

EKLER

EK 1: Sondaj Logları

SONDAJ LOGU

Yüklenici Firma	İSTANBUL ZEMİN SONDAJ MÜH. İNŞ. SAN. İÇ VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.						İşveren		
Proje Adı	Haydarpaşa Tren Garı Restorasyon Projesi								
İl	İstanbul	Sondaj Derinliği (m)	17.00				Sondaj No	SK1	
İlçe	Kadıköy	Başlama Tarihi	19.02.2019				Sayfa No	1	
Mahalle	Rasimpaşa	Bitiş Tarihi	19.02.2019				Sorumlu Jeoloji Müh.		
Pafta	54	Makine Tipi / Metodu	Portatif				Adı Soyadı / JMO Sicil No.		
Ada	240	SPT Şahmerdan Tipi					Aytaç ZİLEK / 7893		
Parsel	16	Delgi Çapı (mm)	76 mm						
Sondaj Kotu		Yeraltısuyu (m)	Derinlik	Tarih	Açıklama		Sondör Adı Soyadı / Belge No.		
Koordinatlar	X 669865		-				Uslu ÜNLÜ		
ITRF (TUREF)	Y 4540396						75801920150040373246		

Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu der.	Kuyu içi deneyler	Örnek derinliği (m)	Örnek türü ve no	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı 0 – 15	15 – 30	30 – 45	N	Presiyometre Deneyi Elastisite Modülü (kg/cm²)	Limit Basınç (kg/cm²)	Kaya Özellikleri TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı	Dayanım	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)
0.0																			0.0
0.5																			0.5
1.0																		**Yapay Dolgu:** Beton bloklu - kiremit parçacıklı, çakıllı, kumlu, heterojen Dolgu.	1.0
1.5																			1.5
2.0																			2.0
2.5																			2.5
3.0																			3.0
3.5																		**3.20**	3.5
4.0																			4.0
4.5																			4.5
5.0		SPT			-	1	-	1											5.0
5.5			✓	DS															5.5
6.0																			6.0
6.5		SPT			1	-	-	1											6.5
7.0																			7.0
7.5																			7.5
8.0		SPT			1	1	2	3										**Alüvyon:** koyu kahve – gri renkli, kumlu, siltli, **Kil.**	8.0
8.5																			8.5
9.0																			9.0
9.5		SPT			2	2	2	4											9.5
10.0																			10.0
10.5																			10.5
11.0		SPT			6	6	8	14											11.0
11.5																			11.5
12.0																			12.0
12.5		SPT			2	3	2	5											12.5
13.0																			13.0
13.5																			13.5
14.0		SPT			1	3	3	6											14.0
14.5																		**Grovak-Şeyl:** kahve renkli, ayrışmış. **14.20**	14.5
15.0																			15.0

Kıvam (İnce Daneli)			Ayrışma		Kaya Kalitesi (RQD)		Açıklamalar	
N	0 – 2	Çok Yumuşak	I	Taze	0 – 25 %	Çok Kötü	UD	Örselenmemiş Örnek
N	3 – 4	Yumuşak	II	Az Ayrışmış	25 – 50 %	Kötü	DS	Örselenmiş Örnek
N	5 – 8	Orta Katı	III	Orta Ayrışmış	50 – 75 %	Orta	SPT	Standart Penetrasyon Testi
N	9 – 15	Katı	IV	Çok Ayrışmış	75 – 90 %	İyi	P	Presiyometre Deneti
N	16 – 30	Çok Katı	V	Tamamen Ayrışmış	90 – 100 %	Çok İyi	K/C	Karot Örnek
N	> 30	Sert	VI	Kalıntı			BST	Basınçlı Su Deneyi
Sıkılık (İri Daneli)			**Dayanımlılık**		**Oranlar**		**Kırıklar / 30 cm.**	
N	0 – 4	Çok Gevşek	I	Çok Zayıf	0 – 10 %	Pek Az	< 1	Seyrek
N	5 – 10	Gevşek	II	Zayıf	10 – 20 %	Az	1 – 2	Orta
N	11 – 30	Orta Sıkı	III	Orta	20 – 35 %	Çok	2 – 10	Sık
N	31 – 50	Sıkı	IV	Dayanımlı	35 – 50 %	Ve	10 – 20	Çok Sık
N	> 50	Çok Sıkı	V	Çok Dayanımlı			> 20	Parçalı

SONDAJ LOGU

Yüklenici Firma	İSTANBUL ZEMİN SONDAJ MÜH. İNŞ. SAN. İÇ VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.					İşveren		
Proje Adı	Haydarpaşa Tren Garı Restorasyon Projesi							
İl	İstanbul	Sondaj Derinliği (m)	20.00			Sondaj No	SK2	
İlçe	Kadıköy	Başlama Tarihi	19.02.2019			Sayfa No	1	
Mahalle	Rasimpaşa	Bitiş Tarihi	19.02.2019			Sorumlu Jeoloji Müh.		
Pafta	54	Makine Tipi / Metodu	Portatif			Adı Soyadı / JMO Sicil No.		
Ada	240	SPT Şahmerdan Tipi				Aytaç ZİLEK / 7893		
Parsel	16	Delgi Çapı (mm)	76 mm					
Sondaj Kotu		Yeraltısuyu (m)	Derinlik	Tarih	Açıklama	Sondör Adı Soyadı / Belge No.		
Koordinatlar X	669859		-			Uslu ÜNLÜ		
ITRF (TUREF) Y	4540381					75801920150040373246		

Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu der.	Kuyu içi deneyler	Örnek derinliği (m)	Örnek türü ve no	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı 0 – 15	15 – 30	30 – 45	N	Presiyometre Deneyi Elastisite Modülü (kg/cm²)	Limit Basınç (kg/cm²)	Kaya Özellikleri TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı	Dayanım	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)
0.0																			0.0
0.5																			0.5
1.0																		**Yapay Dolgu:** Beton bloklu - kiremit parçacıklı, çakıllı, kumlu, heterojen Dolgu.	1.0
1.5																			1.5
2.0																			2.0
2.5																			2.5
3.0																			3.0
3.5																			3.5
4.0																		3.40	4.0
4.5																			4.5
5.0		SPT			1	-	-	1											5.0
5.5																			5.5
6.0																			6.0
6.5		SPT			1	-	-	1											6.5
7.0																			7.0
7.5																			7.5
8.0		SPT			1	2	1	3										**Alüvyon:** koyu kahve – gri renkli, kumlu, siltli, **Kil.**	8.0
8.5																			8.5
9.0																			9.0
9.5		SPT			5	7	5	12											9.5
10.0																			10.0
10.5																			10.5
11.0		SPT			1	2	3	5											11.0
11.5																			11.5
12.0																			12.0
12.5		SPT			2	3	3	6											12.5
13.0																			13.0
13.5			✓	DS															13.5
14.0																			14.0
14.5			✓	K														**Grovak-Şeyl:** kahve renkli, ayrışmış. 13.80	14.5
15.0																			15.0

Kıvam (İnce Daneli)			Ayrışma		Kaya Kalitesi (RQD)		Açıklamalar	
N	0 – 2	Çok Yumuşak	I	Taze	0 – 25 %	Çok Kötü	UD	Örselenmemiş Örnek
N	3 – 4	Yumuşak	II	Az Ayrışmış	25 – 50 %	Kötü	DS	Örselenmiş Örnek
N	5 – 8	Orta Katı	III	Orta Ayrışmış	50 – 75 %	Orta	SPT	Standart Penetrasyon Testi
N	9 – 15	Katı	IV	Çok Ayrışmış	75 – 90 %	İyi	P	Presiyometre Deneti
N	16 – 30	Çok Katı	V	Tamamen Ayrışmış	90 – 100 %	Çok İyi	K/C	Karot Örnek
N	> 30	Sert	VI	Kalıntı			BST	Basınçlı Su Deneyi
Sıkılık (İri Daneli)			**Dayanımlılık**		**Oranlar**		**Kırıklar / 30 cm.**	
N	0 – 4	Çok Gevşek	I	Çok Zayıf	0 – 10 %	Pek Az	< 1	Seyrek
N	5 – 10	Gevşek	II	Zayıf	10 – 20 %	Az	1 – 2	Orta
N	11 – 30	Orta Sıkı	III	Orta	20 – 35 %	Çok	2 – 10	Sık
N	31 – 50	Sıkı	IV	Dayanımlı	35 – 50 %	Ve	10 – 20	Çok Sık
N	> 50	Çok Sıkı	V	Çok Dayanımlı			> 20	Parçalı

SONDAJ LOGU

Yüklenici Firma	İSTANBUL ZEMİN SONDAJ MÜH. İNŞ. SAN. İÇ VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.					İşveren	
Proje Adı	Haydarpaşa Tren Garı Restorasyon Projesi						
İl	İstanbul	Sondaj Derinliği (m)	20.00			Sondaj No	**SK3**
İlçe	Kadıköy	Başlama Tarihi	19.02.2019			Sayfa No	1
Mahalle	Rasimpaşa	Bitiş Tarihi	19.02.2019			Sorumlu Jeoloji Müh.	
Pafta	54	Makine Tipi / Metodu	Portatif			Adı Soyadı / JMO Sicil No.	
Ada	240	SPT Şahmerdan Tipi				Aytaç ZİLEK / 7893	
Parsel	16	Delgi Çapı (mm)	76 mm				
Sondaj Kotu		Yeraltısuyu (m)	Derinlik	Tarih	Açıklama	Sondör Adı Soyadı / Belge No.	
Koordinatlar X	669834		-			Uslu ÜNLÜ	
ITRF (TUREF) Y	4540378					75801920150040373246	

Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu der.	Kuyu içi deneyler	Örnek derinliği (m)	Örnek türü ve no	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı 0 – 15	15 – 30	30 – 45	N	Presiyometre Deneyi Elastisite Modülü (kg/cm²)	Limit Basınç (kg/cm²)	Kaya Özellikleri TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı	Dayanım	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)
0.0																			0.0
0.5																			0.5
1.0																		**Yapay Dolgu:** Beton bloklu - kiremit parçacıklı, çakıllı, kumlu, heterojen Dolgu.	1.0
1.5																			1.5
2.0																			2.0
2.5																			2.5
3.0																			3.0
3.5																		**3.20**	3.5
4.0																			4.0
4.5																			4.5
5.0		SPT			-	-	1	1											5.0
5.5																			5.5
6.0																			6.0
6.5		SPT			1	1	1	2											6.5
7.0																			7.0
7.5																			7.5
8.0		SPT			3	5	6	11										**Alüvyon:** koyu kahve – gri renkli, kumlu, siltli, **Kil.**	8.0
8.5																			8.5
9.0																			9.0
9.5		SPT			2	2	3	5											9.5
10.0																			10.0
10.5																			10.5
11.0		SPT			1	2	2	4											11.0
11.5																			11.5
12.0																			12.0
12.5		SPT			2	2	3	5											12.5
13.0																			13.0
13.5																			13.5
14.0		SPT			4	3	2	5											14.0
14.5																			14.5
15.0			✓	DS														**15.00**	15.0

Kıvam (İnce Daneli)			Ayrışma		Kaya Kalitesi (RQD)		Açıklamalar	
N	0 – 2	Çok Yumuşak	I	Taze	0 – 25 %	Çok Kötü	UD	Örselenmemiş Örnek
N	3 – 4	Yumuşak	II	Az Ayrışmış	25 – 50 %	Kötü	DS	Örselenmiş Örnek
N	5 – 8	Orta Katı	III	Orta Ayrışmış	50 – 75 %	Orta	SPT	Standart Penetrasyon Testi
N	9 – 15	Katı	IV	Çok Ayrışmış	75 – 90 %	İyi	P	Presiyometre Deneti
N	16 – 30	Çok Katı	V	Tamamen Ayrışmış	90 – 100 %	Çok İyi	K/C	Karot Örnek
N	> 30	Sert	VI	Kalıntı			BST	Basınçlı Su Deneyi
Sıkılık (İri Daneli)			**Dayanımlılık**		**Oranlar**		**Kırıklar / 30 cm.**	
N	0 – 4	Çok Gevşek	I	Çok Zayıf	0 – 10 %	Pek Az	< 1	Seyrek
N	5 – 10	Gevşek	II	Zayıf	10 – 20 %	Az	1 – 2	Orta
N	11 – 30	Orta Sıkı	III	Orta	20 – 35 %	Çok	2 – 10	Sık
N	31 – 50	Sıkı	IV	Dayanımlı	35 – 50 %	Ve	10 – 20	Çok Sık
N	> 50	Çok Sıkı	V	Çok Dayanımlı			> 20	Parçalı

SONDAJ LOGU

Yüklenici Firma	İSTANBUL ZEMİN SONDAJ MÜH. İNŞ. SAN. İÇ VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.					İşveren		
Proje Adı	Haydarpaşa Tren Garı Restorasyon Projesi							
İl	İstanbul	Sondaj Derinliği (m)	20.00			Sondaj No	SK4	
İlçe	Kadıköy	Başlama Tarihi	23.02.2019			Sayfa No	1	
Mahalle	Rasimpaşa	Bitiş Tarihi	23.02.2019			Sorumlu Jeoloji Müh.		
Pafta	54	Makine Tipi / Metodu	Portatif			Adı Soyadı / JMO Sicil No.		
Ada	240	SPT Şahmerdan Tipi				Aytaç ZİLEK / 7893		
Parsel	16	Delgi Çapı (mm)	76 mm					
Sondaj Kotu		Yeraltısuyu (m)	Derinlik	Tarih	Açıklama	Sondör Adı Soyadı / Belge No.		
Koordinatlar X	669829		-			Uslu ÜNLÜ		
ITRF (TUREF) Y	4540361					75801920150040373246		

Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu der.	Kuyu içi deneyler	Örnek derinliği (m)	Örnek türü ve no	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı 0 – 15	15 – 30	30 – 45	N	Presiyometre Deneyi Elastisite Modülü (kg/cm²)	Limit Basınç (kg/cm²)	Kaya Özellikleri TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı	Dayanım	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)
0.0																			0.0
0.5																			0.5
1.0																		**Yapay Dolgu:** Beton bloklu - kiremit parçacıklı, çakıllı, kumlu, heterojen Dolgu.	1.0
1.5																			1.5
2.0																			2.0
2.5																			2.5
3.0																			3.0
3.5																		**3.00**	3.5
4.0																			4.0
4.5																			4.5
5.0		SPT			-	1	-	1											5.0
5.5																			5.5
6.0																			6.0
6.5		SPT			-	1	1	2	1.98	2.54									6.5
7.0																			7.0
7.5			✓	DS															7.5
8.0		SPT			1	1	1	2											8.0
8.5																		**Alüvyon:** koyu kahve – gri renkli, kumlu, siltli, **Kil.**	8.5
9.0																			9.0
9.5		SPT			1	2	2	4	1.98	3.28									9.5
10.0																			10.0
10.5																			10.5
11.0		SPT			2	3	2	5											11.0
11.5																			11.5
12.0																			12.0
12.5		SPT			7	7	9	16	1.98	3.39									12.5
13.0																			13.0
13.5																			13.5
14.0		SPT			2	4	3	7											14.0
14.5																			14.5
15.0																		**15.00**	15.0

Kıvam (İnce Daneli)			Ayrışma		Kaya Kalitesi (RQD)		Açıklamalar	
N	0 – 2	Çok Yumuşak	I	Taze	0 – 25 %	Çok Kötü	UD	Örselenmemiş Örnek
N	3 – 4	Yumuşak	II	Az Ayrışmış	25 – 50 %	Kötü	DS	Örselenmiş Örnek
N	5 – 8	Orta Katı	III	Orta Ayrışmış	50 – 75 %	Orta	SPT	Standart Penetrasyon Testi
N	9 – 15	Katı	IV	Çok Ayrışmış	75 – 90 %	İyi	P	Presiyometre Deneti
N	16 – 30	Çok Katı	V	Tamamen Ayrışmış	90 – 100 %	Çok İyi	K/C	Karot Örnek
N	> 30	Sert	VI	Kalıntı			BST	Basınçlı Su Deneyi
Sıkılık (İri Daneli)			**Dayanımlılık**		**Oranlar**		**Kırıklar / 30 cm.**	
N	0 – 4	Çok Gevşek	I	Çok Zayıf	0 – 10 %	Pek Az	< 1	Seyrek
N	5 – 10	Gevşek	II	Zayıf	10 – 20 %	Az	1 – 2	Orta
N	11 – 30	Orta Sıkı	III	Orta	20 – 35 %	Çok	2 – 10	Sık
N	31 – 50	Sıkı	IV	Dayanımlı	35 – 50 %	Ve	10 – 20	Çok Sık
N	> 50	Çok Sıkı	V	Çok Dayanımlı			> 20	Parçalı

SONDAJ LOGU

Yüklenici Firma	İSTANBUL ZEMİN SONDAJ MÜH. İNŞ. SAN. İÇ VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.					İşveren		
Proje Adı	Haydarpaşa Tren Garı Restorasyon Projesi							
İl	İstanbul	Sondaj Derinliği (m)	20.00			Sondaj No	SK5	
İlçe	Kadıköy	Başlama Tarihi	23.02.2019			Sayfa No	1	
Mahalle	Rasimpaşa	Bitiş Tarihi	23.02.2019			Sorumlu Jeoloji Müh.		
Pafta	54	Makine Tipi / Metodu	Portatif			Adı Soyadı / JMO Sicil No.		
Ada	240	SPT Şahmerdan Tipi				Aytaç ZİLEK / 7893		
Parsel	16	Delgi Çapı (mm)	76 mm					
Sondaj Kotu		Yeraltısuyu (m)	Derinlik	Tarih	Açıklama	Sondör Adı Soyadı / Belge No.		
Koordinatlar X	669813		-			Uslu ÜNLÜ		
ITRF (TUREF) Y	4540362					75801920150040373246		

Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu der.	Kuyu içi deneyler	Örnek derinliği (m)	Örnek türü ve no	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı 0 – 15	15 – 30	30 – 45	N	Presiyometre Deneyi Elastisite Modülü (kg/cm²)	Limit Basınç (kg/cm²)	Kaya Özellikleri TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı	Dayanım	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)
0.0																			0.0
0.5																		**Yapay Dolgu:** Beton bloklu - kiremit parçacıklı, çakıllı, kumlu, heterojen Dolgu.	0.5
1.0																			1.0
1.5																			1.5
2.0																			2.0
2.5																			2.5
3.0																			3.0
3.5																		2.80	3.5
4.0																			4.0
4.5																			4.5
5.0		SPT			1	-	-	1											5.0
5.5									1.98	1.92									5.5
6.0																			6.0
6.5		SPT			1	1	-	1											6.5
7.0																			7.0
7.5																			7.5
8.0		SPT			1	1	1	2											8.0
8.5									1.98	2.91								**Alüvyon:** koyu kahve – gri renkli, kumlu, siltli, **Kil.**	8.5
9.0																			9.0
9.5		SPT			2	2	1	3											9.5
10.0																			10.0
10.5																			10.5
11.0		SPT			9	6	8	14											11.0
11.5			✓	DS															11.5
12.0																			12.0
12.5		SPT			1	3	4	7	1.98	2.99									12.5
13.0																			13.0
13.5																			13.5
14.0		SPT			2	5	5	10											14.0
14.5																			14.5
15.0																			15.0

Kıvam (İnce Daneli)			Ayrışma		Kaya Kalitesi (RQD)		Açıklamalar	
N	0 – 2	Çok Yumuşak	I	Taze	0 – 25 %	Çok Kötü	UD	Örselenmemiş Örnek
N	3 – 4	Yumuşak	II	Az Ayrışmış	25 – 50 %	Kötü	DS	Örselenmiş Örnek
N	5 – 8	Orta Katı	III	Orta Ayrışmış	50 – 75 %	Orta	SPT	Standart Penetrasyon Testi
N	9 – 15	Katı	IV	Çok Ayrışmış	75 – 90 %	İyi	P	Presiyometre Deneti
N	16 – 30	Çok Katı	V	Tamamen Ayrışmış	90 – 100 %	Çok İyi	K/C	Karot Örnek
N	> 30	Sert	VI	Kalıntı			BST	Basınçlı Su Deneyi
Sıkılık (İri Daneli)			**Dayanımlılık**		**Oranlar**		**Kırıklar / 30 cm.**	
N	0 – 4	Çok Gevşek	I	Çok Zayıf	0 – 10 %	Pek Az	< 1	Seyrek
N	5 – 10	Gevşek	II	Zayıf	10 – 20 %	Az	1 – 2	Orta
N	11 – 30	Orta Sıkı	III	Orta	20 – 35 %	Çok	2 – 10	Sık
N	31 – 50	Sıkı	IV	Dayanımlı	35 – 50 %	Ve	10 – 20	Çok Sık
N	> 50	Çok Sıkı	V	Çok Dayanımlı			> 20	Parçalı

SONDAJ LOGU

Yüklenici Firma	İSTANBUL ZEMİN SONDAJ MÜH. İNŞ. SAN. İÇ VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.					İşveren		
Proje Adı	Haydarpaşa Tren Garı Restorasyon Projesi							
İl	İstanbul	Sondaj Derinliği (m)	20.00			Sondaj No	**SK6**	
İlçe	Kadıköy	Başlama Tarihi	23.02.2019			Sayfa No	1	
Mahalle	Rasimpaşa	Bitiş Tarihi	23.02.2019			Sorumlu Jeoloji Müh.		
Pafta	54	Makine Tipi / Metodu	Portatif			Adı Soyadı / JMO Sicil No.		
Ada	240	SPT Şahmerdan Tipi				Aytaç ZİLEK / 7893		
Parsel	16	Delgi Çapı (mm)	76 mm					
Sondaj Kotu		Yeraltısuyu (m)	Derinlik	Tarih	Açıklama	Sondör Adı Soyadı / Belge No.		
Koordinatlar X	669803		-			Uslu ÜNLÜ		
ITRF (TUREF) Y	4540344					75801920150040373246		

Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu der.	Kuyu içi deneyler	Örnek derinliği (m)	Örnek türü ve no	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı 0 – 15	15 – 30	30 – 45	N	Presiyometre Deneyi Elastisite Modülü (kg/cm²)	Limit Basınç (kg/cm²)	Kaya Özellikleri TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı	Dayanım	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)
0.0																		**Yapay Dolgu:** Beton bloklu - kiremit parçacıklı, çakıllı, kumlu, heterojen Dolgu.	0.0
0.5																			0.5
1.0																			1.0
1.5																			1.5
2.0																			2.0
2.5																			2.5
3.0																			3.0
3.5																		2.80	3.5
4.0																			4.0
4.5																			4.5
5.0		SPT			1	-	-	1											5.0
5.5																			5.5
6.0																			6.0
6.5		SPT			1	1	-	1											6.5
7.0																			7.0
7.5																			7.5
8.0		SPT			1	1	2	3											8.0
8.5			✓	DS														**Alüvyon:** koyu kahve – gri renkli, kumlu, siltli, **Kil.**	8.5
9.0																			9.0
9.5		SPT			2	2	2	4											9.5
10.0																			10.0
10.5																			10.5
11.0		SPT			2	2	3	5											11.0
11.5																			11.5
12.0																			12.0
12.5		SPT			7	11	8	19											12.5
13.0																			13.0
13.5																			13.5
14.0		SPT			2	3	3	6											14.0
14.5																			14.5
15.0																			15.0

Kıvam (İnce Daneli)			Ayrışma		Kaya Kalitesi (RQD)		Açıklamalar	
N	0 – 2	Çok Yumuşak	I	Taze	0 – 25 %	Çok Kötü	UD	Örselenmemiş Örnek
N	3 – 4	Yumuşak	II	Az Ayrışmış	25 – 50 %	Kötü	DS	Örselenmiş Örnek
N	5 – 8	Orta Katı	III	Orta Ayrışmış	50 – 75 %	Orta	SPT	Standart Penetrasyon Testi
N	9 – 15	Katı	IV	Çok Ayrışmış	75 – 90 %	İyi	P	Presiyometre Deneti
N	16 – 30	Çok Katı	V	Tamamen Ayrışmış	90 – 100 %	Çok İyi	K/C	Karot Örnek
N	> 30	Sert	VI	Kalıntı			BST	Basınçlı Su Deneyi
Sıkılık (İri Daneli)			**Dayanımlılık**		**Oranlar**		**Kırıklar / 30 cm.**	
N	0 – 4	Çok Gevşek	I	Çok Zayıf	0 – 10 %	Pek Az	< 1	Seyrek
N	5 – 10	Gevşek	II	Zayıf	10 – 20 %	Az	1 – 2	Orta
N	11 – 30	Orta Sıkı	III	Orta	20 – 35 %	Çok	2 – 10	Sık
N	31 – 50	Sıkı	IV	Dayanımlı	35 – 50 %	Ve	10 – 20	Çok Sık
N	> 50	Çok Sıkı	V	Çok Dayanımlı			> 20	Parçalı

EK 2: DEEPSOIL (2020) programında kullanılan zemin parametreleri

Çizelge Ek 1. DEEPSOIL (2020) programında kullanılan zemin parametreleri (Zemin Etüt Raporu, 2019)

	Tabaka	Derinlik, metre	Birim Ağırlık, (kN/m3)	Vs Min, m/s	Katman Kalınlığı, m	Kayma Dayanımı, kPa
1	Dolgu	0.5	13.24	90	0.5	49.76
2	Dolgu	1.1	13.24	119	0.6	49.76
3	Dolgu	1.7	13.24	111	0.6	49.76
4	Dolgu	2.3	13.24	104	0.6	49.76
5	Dolgu	3	13.24	179	0.7	49.76
6	Dolgu	3.7	13.24	173	0.7	49.76
7	Alüvyon	4.4	15.70	180	0.7	49.76
8	Alüvyon	5.2	15.70	203	0.8	49.76
9	Alüvyon	6	15.70	264	0.8	51.93
10	Alüvyon	6.8	15.70	287	0.8	51.93
11	Alüvyon	7.7	15.70	308	0.9	51.93
12	Alüvyon	8.6	15.70	334	0.9	51.93
13	Alüvyon	9.6	15.70	367	1	52.25
14	Alüvyon	10.6	15.70	392	1	52.25
15	Alüvyon	11.6	15.70	415	1	52.25
16	Alüvyon	12.7	15.70	432	1.1	52.25
17	Alüvyon	13.8	15.70	431	1.1	52.25
18	Alüvyon	15	15.70	426	1.2	52.25
19	Grovak	16.1	22.00	419	1.1	52.25
20	Grovak	17.4	22.00	420	1.3	52.25
21	Grovak	18.6	22.00	402	1.2	52.25
22	Grovak	19.9	22.00	392	1.3	52.25

EK 3: DEEPSOIL (2020) programında kullanılan depremlerin detayları

- **Mw= 5,5 (12.11.1999 Düzce Depremi) Detayları**

EVENT_NAME: 199911121718

EVENT_ID: 1021

EVENT_DATE_YYYYMMDD: 1999/11/12

EVENT_TIME_HHMMSS: 17:18:00.00

EVENT_LATITUDE_DEGREE: 40.752

EVENT_LONGITUDE_DEGREE: 31.084

EVENT_DEPTH_KM: 10.0

HYPOCENTER_REFERENCE: AFAD

NETWORK: TK

STATION_CODE: 1401

STATION_LATITUDE_DEGREE: 40.74567

STATION_LONGITUDE_DEGREE: 31.60732

STATION_ELEVATION_M: 746.0

LOCATION: BOLU_MERKEZ_BAYINDIRLIK_VE_ISKAN_MUDURLUGU

PGA_CM/S^2: 56.781

- **Mw=6,0 Orta Çankırı**

EVENT_NAME: 200006060241

EVENT_ID: 1472

EVENT_DATE_YYYYMMDD: 2000/06/06

EVENT_TIME_HHMMSS: 02:41:51.91

EVENT_LATITUDE_DEGREE: 40.7

EVENT_LONGITUDE_DEGREE: 32.982

EVENT_DEPTH_KM: 10.5

HYPOCENTER_REFERENCE: AFAD

NETWORK: TK

STATION_CODE: 1801

STATION_LATITUDE_DEGREE: 40.81486

STATION_LONGITUDE_DEGREE: 32.88337

STATION_ELEVATION_M: 1137.0

LOCATION: CANKIRI_CERKES_METEOROLOJI_ISTASYON_MUDURLUGU

PGA_CM/S^2: 62.884

- **Mw=6,6 Ege Denizi (İzmir Çeşme İstasyonu)**

EVENT_NAME: 202010301151

EVENT_ID: 10614

EVENT_DATE_YYYYMMDD: 2020/10/30

EVENT_TIME_HHMMSS: 11:51:24.00000

EVENT_LATITUDE_DEGREE: 37.879

EVENT_LONGITUDE_DEGREE: 26.703

EVENT_DEPTH_KM: 16.54

HYPOCENTER_REFERENCE: AFAD

NETWORK: TK

STATION_CODE: 3528

STATION_LATITUDE_DEGREE: 38.30393

STATION_LONGITUDE_DEGREE: 26.37256

STATION_ELEVATION_M: 17.0

PGA_CM/S^2: 149.308

- **Mw=7,1 Düzce (Düzce İstasyonu)**

EVENT_NAME: 199911121657

EVENT_ID: 997

EVENT_DATE_YYYYMMDD: 1999/11/12

EVENT_TIME_HHMMSS: 16:57:21.41

EVENT_LATITUDE_DEGREE: 40.806

EVENT_LONGITUDE_DEGREE: 31.187

EVENT_DEPTH_KM: 11.0

HYPOCENTER_REFERENCE: AFAD

NETWORK: TK

STATION_CODE: 8101

STATION_LATITUDE_DEGREE: 40.843923

STATION_LONGITUDE_DEGREE: 31.148112

STATION_ELEVATION_M: 145.0

LOCATION: DUZCE_MERKEZ_METEOROLOJI_ISTASYON_MUDURLUGU

PGA_CM/S^2: 512.945

- **Kocaeli DEEPSOIL (2020) Kayıtlı Deprem**

DEEPSOIL (2020) programında hazır olarak kayıtlı olan Kocaeli depremi kullanılmıştır.