

**T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN SAYISAL ANALİZ
YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ, VAKA ANALİZİ**

Barış ÇETİNKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM**

TUNCELİ – 2026

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN SAYISAL ANALİZ
YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ, VAKA ANALİZİ

Bariş ÇETİNKAYA
(230150027)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM

TUNCELİ – 2026

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN SAYISAL ANALİZ
YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ, VAKA ANALİZİ**

Barış ÇETİNKAYA
YÜKSEK LİSANS SEMİNERİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 05/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Aykut
ÖZPOLAT
(Fırat Üniversitesi)

BAŞKAN

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Özlem
ERDEM
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah
İÇEN
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu seminer, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
Enstitü Müdürü

NOT: Bu seminerde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

05/01/2026

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Barış ÇETİNKAYA

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle bana yol gösteren, akademik desteğini ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen **Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM**'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde değerli görüş ve katkılarıyla çalışmama önemli yönlendirmelerde bulunan **Doç. Dr. Nuray ALPASLAN**'a teşekkür ederim.

Mühendislik alanındaki bilgi ve deneyimleriyle çalışmama katkı sağlayan **İnşaat Yüksek Mühendisi Hüseyin DOĞAN**'a da teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sevgi, sabır ve destekleriyle beni daima motive eden **aileme** en derin şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın yürütülmesinde doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederim.

Barış ÇETİNKAYA
TUNCELİ- 2026

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
TABLolar LİSTESİ.....	VII
RESİMLER LİSTESİ.....	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
ÖZET.....	XIV
ABSTRACT	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL ve METOT	3
2.1. Sıvılaşma Kavramı	3
2.2. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler	3
2.2.1. Zemin özelliklerinin sıvılaşmaya etkisi	3
2.2.2. Jeolojik koşullar	4
2.2.3. Zeminlerin maruz kaldıkları gerilme koşulları	4
2.2.4. Zeminin bileşimi ve sıklığı	4
2.3. Sıvılaşmadan Kaynaklanan Hasar Türleri.....	5
2.3.1. Kum kaynaması	5
2.3.2. Akma göçmesi	7
2.3.3. Yanal yayılma	8
2.3.4. İstinat yapısı yenilmesi	9
2.3.5. Taşıma gücü kaybı	10
2.4. Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Analizi	12
2.4.1. Basitleştirilmiş sıvılaşma analizi	12
2.4.2. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre sıvılaşma analizi.....	12
2.4.2.1. Yerel zemin sınıflarının belirlenmesi	14
2.4.2.2. Standart Penetrasyon Testine (SPT) dayalı sıvılaşma analizi	15
2.4.2.3. Kayma dalga hızı (Vs) dayalı sıvılaşma analizi	19
2.4.2.4. Sıvılaşma güvenlik koşulu	22
2.4.3. Sıvılaşma şiddet parametreleri	24

2.4.3.1. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması (LS) yöntemi.....	24
2.4.3.2. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LI) yöntemi.....	25
2.5. Sayısal Analiz Yöntemi İle Sıvılaşma Analizi.....	26
2.5.1. Sonlu elemanlar yöntemi	26
2.5.2. PLAXIS sonlu elemanlar programı	26
2.5.2.1. Mohr-Coulomb modeli.....	27
2.5.2.2. UBC3D-PLM modelin SPT-N sayısına bağlı kalibrasyonu ve zemin parametrelerinin belirlenmesi.....	27
3. BULGULAR	30
3.1. Çalışma Sahası Hakkında Genel Bilgiler.....	30
3.2. Bölgenin Jeolojik Özellikleri	31
3.3. Çalışma Sahasında Yapılan Geoteknik Araştırmalar	32
3.4. Çalışma Sahasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e Göre Sıvılaşma Analizleri.....	33
3.4.1. Standart penetrasyon testine (SPT) dayalı sıvılaşma analizi	33
3.4.2. Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizi.....	46
3.4.3. Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksine (L_s) dayalı sıvılaşma analizi.....	64
3.5. İnceleme Alanında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis (2D) Programı Kullanılarak Yapılan Sıvılaşma Analizi.....	72
3.5.1. Model geometrisi	72
3.5.2. Tasarım spektrumu ile uyumlu ivme-zaman serilerinin seçimi.....	75
3.5.3. R_u değerinin değişimi.....	86
3.5.4. Boşluk suyu basıncı değişimleri	87
4. SONUÇ ve ÖNERİLER	89
5. KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Zemin tanecikleri arasında boşluk suyu basıncının bağıl olarak artması	3
Şekil 2. 2. Kum kaynaması	6
Şekil 2. 3. Akma göçmesi	7
Şekil 2. 4. Yanal yayılma oluşum biçimi	8
Şekil 2. 5. İstinat yapısı yenilme biçimi.....	9
Şekil 2. 6. Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi	10
Şekil 2. 7. Yatay elastik tasarım spektrumu.....	14
Şekil 2. 8. Standart penetrasyon deneyi aşamaları.....	16
Şekil 2. 9. $M_w = 7.5$ büyüklüğündeki deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı	18
Şekil 2. 10. Sismik kırılma yönteminin arazide uygulanışı	20
Şekil 2. 11. Çok- kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeneği.....	21
Şekil 2. 12. Büyüklüğü 7,5 deprem için temiz ve siltli kumlar için düzeltilmiş V_s - CSR Abağı	22
Şekil 2. 13. Magnitude scaling factor (MSF) ilişkileri	23
Şekil 2. 14. Zeminlerde Pekleşme (a), MC model davranışı(b), Yumuşama (killerde)(c).....	27
Şekil 3. 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası.....	31
Şekil 3. 2. İnceleme alanı ve yakın çevresi jeoloji haritası	32
Şekil 3. 3. SPT- N_{30} darbe sayılarının derinlikle değişimi.....	33
Şekil 3. 4. Çalışma sahasında açılan temel sondaj kuyularının SPT- N_{30} sonuçları a) SK-1 b) SK-2 c) SK-3 d) SK-4 e) SK-5 f) SK-6	34
Şekil 3. 5. İnceleme alanındaki ölçüm alınmış sismik profillerin Google Earth üzerinde gösterimi.....	46
Şekil 3. 6. a) Sismik serim-1 b) Sismik serim-2 için elde edilen S dalga hızının derinlikle değişimi	48
Şekil 3. 7. Statik durumlar için oluşturulan model geometrisi.....	74
Şekil 3. 8. Dinamik durumlar için oluşturulan model geometrisi.....	74
Şekil 3. 9. Model üzerinde seçilen noktalar	75
Şekil 3. 10. DD2 Deprem tehlike seviyesi için ölçeklendirilmemiş deprem kayıtlarına ait spektrum grafiği ile hedef-tasarım spektrum grafiği.....	77
Şekil 3. 11. DD2 Deprem tehlike seviyesi için ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarına ait	

spektrum grafiği ile hedef-tasarım spektrum grafiği	77
Şekil 3. 12. İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı	78
Şekil 3. 13. İrpinia -RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı	78
Şekil 3. 14. İrpinia -RSN292_ITALY_A-STU000 depremine ait ivme girdisi.....	79
Şekil 3. 15. Orijinal ivme-zaman grafiği.....	79
Şekil 3. 16. Uyuşumlu ivme-zaman grafiği	80
Şekil 3. 17. İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı orijinal ivme	80
Şekil 3. 18. İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı uyuşumlu ivme	81
Şekil 3. 19. a) $V_x(m/sn)$ -zaman(sn) b) $V_y(m/sn)$ -zaman(sn) grafikleri	82
Şekil 3. 20. a) $a_x(m/sn^2)$ -zaman(sn)b) $a_y(m/sn^2)$ -zaman(sn) grafikleri	83
Şekil 3. 21. a) $u_x(m)$ -zaman(sn)b) $u_y(m)$ -zaman(sn) grafikleri.....	84
Şekil 3. 22. Deforme olmuş ađ(Deformed mesh)	85
Şekil 3. 23. Toplam deformasyon	85
Şekil 3. 24. Oluşturulan modelde R_u değeri	87
Şekil 3. 25. Oluşturulan modelde aşırı boşluk suyu basıncı değışimleri	88

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_s)	14
Tablo 2. 2. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_1)	14
Tablo 2. 3. (TBDY, 2018)'e göre yerel zemin sınıfları	15
Tablo 2. 4. Standart Penetrasyon Testi (SPT) düzeltme faktörleri	19
Tablo 2. 5. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) ile Chen ve Juang (2003)'a göre sıvılaşma şiddeti (LS) sınıflandırması	25
Tablo 2. 6. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LI) değişim Çizelgesi	25
Tablo 2. 7. Plaxis UBC3D-PLM parametreleri	28
Tablo 3. 1. İnceleme alanında açılan sondaj kuyularının derinlikleri	33
Tablo 3. 2. Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularından elde edilen numunelerin laboratuvar deney sonuçları	35
Tablo 3. 3. Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre hesaplanmış $N_{1,60}$ verileri SK-1, SK-2, SK-3, SK-4, SK-5, SK-6	36
Tablo 3. 4. Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularının a) SK-1, b) SK-2, c) SK-3, d) SK-4, e) SK-5, f) SK-6 SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analiz parametreleri.....	36
Tablo 3. 5. Çalışma sahasında açılan SK-1 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 2.3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	40
Tablo 3. 6. Çalışma sahasında açılan SK-2 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	41
Tablo 3. 7. Çalışma sahasında açılan SK-3 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 3 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar42	
Tablo 3. 8. Çalışma sahasında açılan SK-4 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 0.4 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	43
Tablo 3. 9. Çalışma sahasında açılan SK-5 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 0 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar44	
Tablo 3. 10. Çalışma sahasında açılan SK-6 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 0.3 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	45

Tablo 3. 11. Sismik profil-1 ölçüm sonuçları	47
Tablo 3. 12. Sismik profil-2 ölçüm sonuçları	47
Tablo 3. 13. Kayma dalgası hızı ve (V_{s30}) verileri	49
Tablo 3. 14. Çalışma sahasında sismik profil-1 (MASW-1- SK-1) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	52
Tablo 3. 15. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-1) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	53
Tablo 3. 16. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-2) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	54
Tablo 3. 17. Çalışma sahasında sismik profil-2(MASW-2- SK-2) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	55
Tablo 3. 18. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-3) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	56
Tablo 3. 19. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-3) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	57
Tablo 3. 20. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-4) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	58
Tablo 3. 21. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-4) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	59
Tablo 3. 22. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-5) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	60
Tablo 3. 23. Çalışma sahasında sismik profil-2(MASW-2- SK-5) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	61
Tablo 3. 24. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-6) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	62
Tablo 3. 25. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-6) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar	63
Tablo 3. 26. SK-1 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri	66
Tablo 3. 27. SK-2 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri	67
Tablo 3. 28. SK-3 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS)	

analizleri	68
Tablo 3. 29. SK-4 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS)	
analizleri	69
Tablo 3. 30. SK-5 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS)	
analizleri	70
Tablo 3. 31. SK-6 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS)	
analizleri	71
Tablo 3. 32. Sayısal analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb modeli parametreleri	73
Tablo 3. 33. Sayısal analizlerde kullanılan Plaxis UBC3D-PLM parametreleri	73
Tablo 3. 34. DD2 Deprem Tehlike Sınıfına Uygun İvme Kayıtları	76



RESİMLER LİSTESİ

Resim 2. 1. ADYÜ Gölbaşı Meslek Yüksek Okulu bölgesinde gözlenen yatay ve düşey zemin deformasyonları.....	5
Resim 2. 2. Elâzığ Sivrice’de 24 Ocak 2020’de meydana gelen 6.8 M_w şiddetindeki deprem sonrası gözlemlenen kum kaynamaları görüntüsü	6
Resim 2. 3. Adıyaman Gölbaşı’nda gözlenen zemin fışkırması.....	7
Resim 2. 4. 1971 depreminden sonra The Lower San Fernando Barajında oluşan akma göçmesi.....	8
Resim 2. 5. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w= 7.7$) ve Elbistan ($M_w= 7.6$) depremleri ardından Adıyaman Gölbaşı ilçesinde gözlemlenen yanal yayılma ve sıvılaşma görüntüsü	9
Resim 2. 6. 1995 yılında Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi	10
Resim 2. 7. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w =7.7$) ve Elbistan ($M_w = 7.6$) depremleri sonrasında, Adıyaman Gölbaşı ilçesinde sıvılaşma nedeniyle oluşan oturma.....	11
Resim 2. 8. 1964 Niiagata depremi.....	11

SEMBOLLER LİSTESİ

a_{max}	: Maksimum yer ivmesi
c_u	: Drenajsız kayma dayanımı (kPa)
C_N	: Kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme düzeltme katsayısı
C_R	: T _{ij} boyu düzeltme katsayısı
C_S	: Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı
C_B	: Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı
C_E	: Enerji oranı düzeltme katsayısı
C_M	: Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı
$CRR_{7,5}$	: Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı
F_{SL}	: Güvenlik katsayısı
g	: Yer çekimi ivmesi (m/sn)
M_w	: Deprem büyüklüğü
$N_{1,60}$	: Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
$N_{1,60f}$	: İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
NP	: Plastik olmayan zemin
r_d	: Gerilme azaltma katsayısını
RR_{up}	: Fayın kırıldığı noktadan ölçüm istasyonuna olan en kısa mesafe
S_s	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_1	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
u	: Boşluk suyu basıncı (kN/m ²)
V_s	: Kayma dalgası hızı (m/s)
V_{s30}	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı (m/s)
W	: Doğal su içeriği (%)
α	: İnce dane oranı düzeltme katsayısı
β	: İnce dane oranı düzeltme katsayısı
γ	: Zeminin tabii birim hacim ağırlığı (kN/m ³)
$\gamma_{n,d}$	: Zeminin doğal ve suya doymun birim hacim ağırlıkları (kN/m ³)
K_σ	: Örtü basıncı düzeltme faktörü
K_s	: Düzeltme faktörü
σ	: Toplam düşey gerilme (kN/m ²)
σ_v'	: Düşey efektif gerilme (kN/m ²)
K^e_G	: Elastik kayma modülü
K^e_B	: Elastik hacim modülü
K^p_G	: Plastik kayma modülü
R_f	: Göçme oranı
ϕ_{cv}	: Sabit sürtünme açısı
ϕ_{pi}	: Pik sürtünme açısıdır.
m_e	: Elastik hacim modülü indisi
n_e	: Elastik kayma modülü indisi

n_p : Plastik kayma modülü indisi
 τ_R : Zeminin sıvılaşma direnci (kPa)
 τ_{deprem} : Zeminde depremde oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi (kPa)



KISALTMALAR LİSTESİ

CL	: Düşük plastisiteli kil
GM	: Siltli çakıl
GW	: İyi derecelenmiş çakıl
IDI	: İnce dane oranı
MASW	: Yüzey dalgası analiz yöntemi
NP	: Plastik olmayan zemin
PGA	: En büyük yer ivmesi (g)
PGV	: En büyük yer hızı (cm/sn)
PL	: Plastik limit (%)
PI	: Plastisite indisi (%)
TP	: P dalgalarının ölçüm istasyonuna ulaşma zamanı
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SPI	: Sıvılaşma potansiyel indeksi
SASW	: Yüzey dalgalarının spektral analizi
SaW	: İyi derecelenmiş kum
SPT-N	: Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı
SM	: Siltli kum
SC	: Killi kum
FC	: İnce dane oranı
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBEC)
UD	: Örselenmemiş zemin numunesi
YAS	: Yer altı suyu
YASS	: Yer altı suyu seviyesi

ÖZET

Türkiye'nin deprem kuşağında bulunması, zeminlerde taşıma gücünün azalması ve deformasyonlar gibi riskleri beraberinde getirmektedir. Bu risklerin en önemlilerinden ve en kompleks konularından biri deprem etkisiyle oluşan sıvılaşmadır. Özellikle 1999 depremiyle önemi anlaşılan sıvılaşma, gevşek kumlu, siltli zeminlerde ve sık yer altı suyu bulunan alanlarda deprem sırasında meydana gelir ve ciddi yapısal hasarlara yol açar.

Sıvılaşma mekanizması, deprem süresince sismik dalgaların drenajsız, suya doygun ve gevşek zeminlerde kayma kuvvetleri oluşturarak zemin partiküllerinin yer değiştirmesine neden olmasıyla açıklanır. Ani ve kısa süreli hareketler nedeniyle suyun drene olamaması, gözenek suyu basıncının aniden artmasına yol açar. Bu basınç artışı, partikülleri bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek zeminin dayanımını kaybetmesine ve bir sıvı gibi davranmasına neden olur.

Deprem sırasında zemin tabakalarındaki sıvılaşma, zeminin rijitliğini ve mukavemetini değiştirerek mühendislik yapıları üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratır. En önemli sonuçları; temellerin taşıma gücü kaybı, aşırı oturmalar, yanal akmlar ve şev göçmeleri gibi yapısal hasarlardır. Bu durum, sıvılaşmayı mühendislik açısından büyük öneme sahip bir risk haline getirir. Dolayısıyla, kumlu ve siltli zeminlerde deprem anındaki sıvılaşma potansiyelini saptayabilmek amacıyla arazi, laboratuvar ve sismik parametrelerden elde edilen deneysel formüller ve ampirik bağıntılar kullanılarak sıvılaşma hesaplarının yapılması hayati önem taşımaktadır.

Sıvılaşma tehlikesi analizleri, deprem büyüklüğü, merkeze uzaklık, zemin kompozisyonu ve sıklık durumu gibi koşulların incelenmesini gerektirir. Bu tezde, SPT (Standart Penetrasyon Test) ve kayma dalga hızı (V_s) yöntemleri kullanılarak sıvılaşma hesaplamaları yapılacak; ayrıca sıvılaşmaya maruz kalmış bir alanın statik ve dinamik davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle (Plaxis 2D programı) incelenerek zemin iyileştirmesi öncesi ve sonrası oturmalarındaki değişimler değerlendirilecektir.

Anahtar kelimeler: Sıvılaşma, plaxis, SPT, kayma dalga hızı (V_s), zemin davranışı

ABSTRACT

Investigation of Soil Liquefaction Potential Using Numerical Analysis Methods, A Case Study

Turkey's location within a significant earthquake belt entails risks such as reduced bearing capacity and deformations in soils. One of the most critical and complex of these risks is earthquake-induced liquefaction. The significance of liquefaction, particularly highlighted after the 1999 earthquake, occurs during seismic events in loose sandy, silty soils and areas with shallow groundwater, leading to severe structural damage.

The mechanism of liquefaction is explained by seismic waves generating shear forces in undrained, saturated, and loose soils during an earthquake, causing the displacement of soil particles. The inability of water to drain due to sudden and short-duration movements leads to an abrupt increase in pore water pressure. This pressure increase eliminates the contact forces holding the particles together, causing the soil to lose its strength and behave like a liquid.

Liquefaction in soil layers during an earthquake alters the soil's stiffness and strength, creating severe adverse effects on engineering structures. Its most significant consequences include structural damages such as loss of foundation bearing capacity, excessive settlements, lateral spreading, and slope failures. This situation makes liquefaction a risk of great importance from an engineering perspective. Consequently, it is of vital importance to perform liquefaction calculations using experimental formulas and empirical correlations derived from field, laboratory, and seismic parameters to determine the liquefaction potential in sandy and silty soils during an earthquake.

Liquefaction hazard analyses require the examination of conditions such as earthquake magnitude, distance from the epicenter, soil composition, and density state. In this thesis, liquefaction calculations will be performed using SPT (Standard Penetration Test) and Shear Wave Velocity (V_s) methods; furthermore, the static and dynamic behaviors of an area subjected to liquefaction will be analyzed using the finite element method (Plaxis 2D program) to evaluate the changes in settlements before and after ground improvement.

Keywords: Liquefaction, plaxis, SPT, shear wave velocity (V_s), soil behavior

1. GİRİŞ

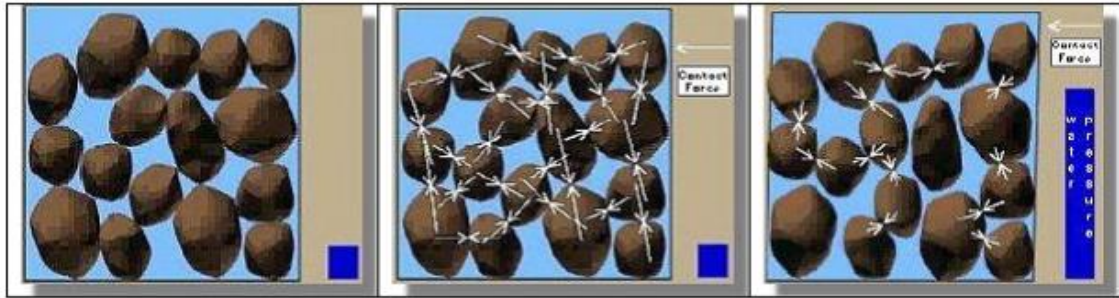
Türkiye'nin coğrafi konumu, deprem kuşağında yer alması nedeniyle ciddi bir risk oluşturmaktadır. Depremler, yalnızca yapılar üzerinde hasar yaratmakla kalmaz, aynı zamanda zeminlerin taşıma kapasitesinin azalmasına ve yüksek deformasyonların meydana gelmesine yol açar. Bu durum, güvenilir bir şekilde tasarlanıp inşa edilmiş olan yapıları bile olumsuz etkileyebilir. Depremin neden olduğu en büyük sorunlardan biri sıvılaşmadır. Deprem sırasında dinamik sismik gerilmeler, zemin yapısına bağlı olarak sıvılaşma ve yanal yayılmaya neden olur. Bu zemin hareketlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan yüzey deformasyonları, yapılar üzerinde ciddi bir risk faktörü oluşturur. Sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliği açısından en kritik ve karmaşık konulardan biri olarak dikkat çekmektedir. 17 Ağustos 1999'da gerçekleşen deprem, zeminlerde sıvılaşmanın önemini bir kez daha gözler önüne sermiştir. Deprem esnasında zemin hasarlarına neden olan en temel nedenlerden birisi de sıvılaşmadır. Sıvılaşmanın gerçekleştiği zemin, özellikle yerleşim alanlarında, zeminin yapısında çeşitli deformasyonlara neden olarak zeminde önemli hasarlar oluşturabilmektedir. Özellikle büyük depremlerden kaynaklanan hasarlarda sıvılaşma oldukça büyük bir role sahiptir. Zeminin sertliği ve dayanıklılığının düştüğü durumlarda sıvılaşma meydana gelir. Sıvılaşma, deprem sonrası çoğunlukla gevşek yapıda kumlu ve silt içeren zeminlerde, ayrıca sığ yer altı suyunun bulunduğu bölgelerde görülmektedir. Deprem sırasında, sismik dalgalar, özellikle kayma dalgaları, drenajsız ve suyla doygun gevşek zeminlerde yayılarak zemin partiküllerinin yer değiştirmesine yol açan kayma kuvvetleri oluşturur. Bu tür zeminlerde, partiküller birbirine yaklaşma eğilimi gösterir. Böyle bir durumda, partiküllerin temas noktalarındaki gerilim, çevredeki suya iletilir. Ancak depremin neden olduğu ani ve kısa süreli hareketler, zemin partikülleri arasındaki suyun drene olabilmesi için gerekli süreyi bulamadığı için gözenek suyu ortamdan uzaklaşamaz ve baskısı aniden artar. Bu ani basınç artışı, zemin partiküllerini bir arada tutan temas kuvvetlerini ortadan kaldırır, bu da partiküllerin birbirinden uzaklaşmasına ve zemin dayanımının kaybolmasına neden olur. Efektif gerilmenin sıfıra düştüğü durumlarda zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı davranışın aksine, sıvı gibi hareket eder. Bu süreçte zemin, su ile birlikte yüzeye yükselir ve yüzeyden fışkırmaya

başlar. Bu olaya, zeminin dinamik yükler altında sergilediği sıvılaşma denir. Ancak sıvılaşmanın her zemin tabakasında meydana gelmediği bilinmektedir. Bu sebeple, sıvılaşma tehlikesi analizleri yaparken öncelikle sıvılaşmanın oluşabilmesi için gerekli koşulların mevcut olup olmadığını incelemek büyük önem taşır. Bu koşullar arasında depremin büyüklüğü ve merkezine olan mesafe, zemin tabakasının bileşimi, jeolojik geçmişi, yerel gerilme durumu ve sıkılık durumu dikkate alınmalıdır. Depremler esnasında zemin katmanlarında ortaya çıkan sıvılaşma, zemin rijitliği ve mukavemetindeki değişimlerden kaynaklanan deformasyonlarla birleştiğinde, büyük bir tehdit oluşturur. Bu olumsuz etkiler gerek zemin üzerinde inşa edilen gerekse zemin içinde yer alan yapıların yanı sıra, toprak dolguları ve geniş çevre alanları kapsayan çok çeşitli zararlara yol açma potansiyeli taşır. Mühendislik açısından en kritik olumsuz etkiler arasında, zemin mukavemetinin ve rijitliğinin azalmasıyla birlikte aşırı deformasyonlar ve yer değiştirmeler yer almaktadır. Bu durumlar, temellerin taşıma gücünün düşmesine, aşırı oturmalara, yanal akmalara ve şev göçmelerine neden olabileceği gibi, zemin ve istinat yapılarında hasarlara, kazıklar üzerindeki ilave yüklenmelere ve yanal destek kaybına da yol açabilir. Ayrıca, gömülü yapılar üzerinde basınç ve kaldırma etkileri önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, sıvılaşma durumu, yapısal hasarlara ve zemin kaymalarına yol açabilen bir olgudur ve mühendislik alanında büyük bir öneme sahiptir. Deprem anında sıvılaşma potansiyelini belirlemek amacıyla, kum ve silt karışımlarından oluşan zemin tabakalarının, arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla elde edilen zemin ve sismik parametrelerle bir arada değerlendirilmesi gereken çeşitli kriterler, deneysel formüller ve ampirik bağıntılar mevcuttur. Tüm bu kriterlerin birlikte incelenmesi, sıvılaşma hesaplamalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi açısından son derece kritik bir öneme sahiptir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Sıvılaşma Kavramı

Sıvılaşma terimi, 1953 yılında Mogami ve Kubo tarafından ilk kez tanımlanmıştır (Kramer, 1996). Sıvılaşma, depremler veya benzeri ani ve büyük yüklemeler sonucunda zemin yapısının dayanım, sertlik ve sıkılığını kaybetmesi olayıdır. Bu durum özellikle daneli zeminlerde, özellikle de siltli ve kumlu bölgelerde gözlemlenmektedir. Yer altı su seviyesinin altında bulunan katmanların geçici olarak mukavemet kaybı yaşayarak, katı bir madde yerine viskoz bir sıvı gibi davranması durumuna zemin sıvılaşması denir (Şekil 2.1). Bu durum, genellikle kil içermeyen kum ve silt tabakalarında, bazen de çakıllarda sıvılaşma potansiyelinin var olduğunu göstermektedir. Deprem anında, özellikle kayma dalgalarının suya doymuş daneli tabakalardan geçişiyle zemin parçacıklarının yerleşim düzeni değişir. Bu, gevşek olan taneciklerin hareket ederek yeniden konumlanmasına ve sıkışmasına neden olur (Celep ve Kumbasar, 2000).



Şekil 2. 1. Zemin tanecikleri arasında boşluk suyu basıncının bağıl olarak artması (Anonymous, 2006a).

2.2. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Depremler sırasında zemin sıvılaşmasının oluşabilmesi için, jeolojik ve hidrojeolojik koşulların yanı sıra zemin bileşimi ve gerilme gibi bazı diğer koşulların da uygun olması gerekmektedir (Youd, 1984).

2.2.1. Zemin özelliklerinin sıvılaşmaya etkisi

Yeraltı su düzeyi, jeolojik birimler, tane boyutu ve SPT sayısı gibi faktörler, sıvılaşma için kritik koşulları oluşturur. Yeraltı su düzeyinin, genellikle ilk 3 metre içinde

ve 20 metreye kadar olan su seviyeleri açısından büyük bir önemi bulunmaktadır. Jeolojik birimler ise, ilk 15 metre ile 20 metre arasında bulunan ve düşük taşıma gücüne sahip olan suya doymuş kumlu, siltli kumlu ve killi kumlu tabakaları kapsamaktadır.

2.2.2. Jeolojik koşullar

Genel olarak, Holosen dönemine ait delta ve akarsu çökelleri, daha eski çökellere göre sıvılaşmaya daha fazla hassasiyet göstermektedir (Youd ve Perkins, 1978). Yeraltı suyu seviyesi yüzeyden 10 metre derinlikte olduğunda sıvılaşmanın meydana gelmesi oldukça nadirdir. Bununla birlikte, yer altı suyu seviyesinin 20 metre derinliğe ulaştığı durumlarda sıvılaşma beklenmemektedir (Youd, 1984).

2.2.3. Zeminlerin maruz kaldıkları gerilme koşulları

Gerilmeler altında zemin taneleri daha etkin bir şekilde çökelir ve bu durum, jeolojik süreçlerin etkisiyle çimentolanma meydana gelmesine yol açabilir. Böylece, zemin sıvılaşmaya karşı daha fazla direnç gösterir (Seed, 1976).

2.2.4. Zeminin bileşimi ve sıklığı

Çakıl tanelerinin boyutu ve miktarının fazla olması durumunda, zemin oldukça geçirgen bir hale gelir. Bu sayede, aşırı gözenek suyu basınçları oluşmadan, gözeneklerde bulunan su, ortamda oluşan dış etkilere bağlı olarak kolaylıkla yerinden uzaklaşabilir. Bununla birlikte, önemli miktarda çakıl (~%50) içeren kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyeli bulunur (Youd ve ark.,1985). Ayrıca, suya doymuş çakıllı zemin katmanlarının az geçirimli katmanlar tarafından kapatılması durumunda, gözenek suyu basıncındaki artış, etkisini gösteremediğinden zemin sıvılaşma sorunu ile karşılaşabilir. Resim 2.1’de; bunun en çarpıcı örneği olarak, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w = 7.7$) ve Elbistan ($M_w = 7.6$) depremleri sonrasında, Adıyaman Gölbaşı ilçesinde ADYÜ Gölbaşı Meslek Yüksek Okulu bölgesinde gözlenen yatay ve düşey zemin deformasyonları (TRT Haber, 2023) gösterilmiştir.

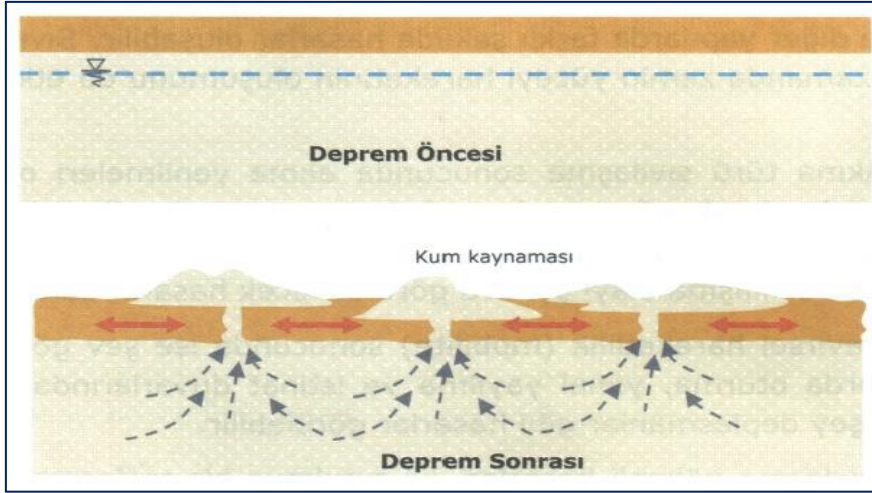


Resim 2. 1. ADYÜ Gölbaşı Meslek Yüksek Okulu bölgesinde gözlenen yatay ve düşey zemin deformasyonları (AA, 2023).

2.3. Sıvılaşmadan Kaynaklanan Hasar Türleri

2.3.1. Kum kaynaması

Bir zemin kütleğinde meydana gelen aşırı boşluk, suyun basıncı nedeniyle kum ve suyun borular aracılığıyla dışarı çıkmasını ifade etmektedir (Wang ve Law, 1994). Deprem sırasında oluşan boşluk, suyun basınç seviyesinin düşmesini zorunlu kılarak boşluk suyunun yukarı yönlü hareketine yol açar (Şekil 2. 2). Zemin taneciklerine uygulanan yukarı yönlü kuvvetler, bu hareketten kaynaklanır. Sonuç olarak, bazı partiküller su ile birlikte yüzeye taşınarak yüzeyde kum konileri oluşumuna sebep olur. Resim 2.2’de, 24 Ocak 2020 Elazığ Sivrice ($M_w = 6.8$) depremi ardından gözlemlenen kum kaynamaları (Çetin vd., 2020) ve Resim 2.3’de ise 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w = 7.7$) ve Elbistan ($M_w = 7.6$) depremleri ardından Adıyaman Gölbaşı ilçesinde oluşan kum kaynamaları görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Kum kaynaması (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).



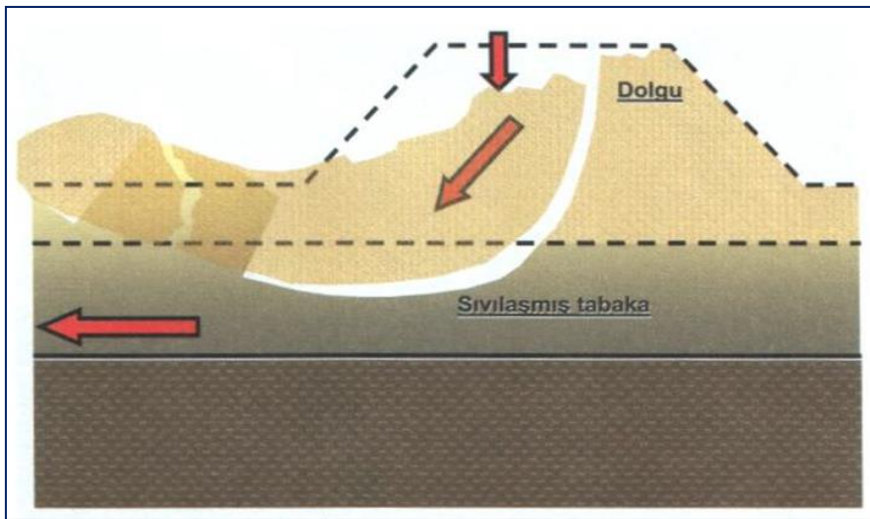
Resim 2. 2. Elâzığ Sivrice’de 24 Ocak 2020’de meydana gelen 6.8 M_w şiddetindeki deprem sonrası gözlemlenen kum kaynamaları görüntüsü (Çetin ve ark., 2020).



Resim 2. 3. Adıyaman Gölbaşı'nda gözlenen zemin fişkırması (ODTÜ DMAM, 2023, s.33).

2.3.2. Akma göçmesi

Çoğunlukla 3. dereceden daha dik eğimlerde akma göçmeleri oluşur (Şekil 2. 3). Sıvılaşmanın etkisiyle ortaya çıkan bu tür göçmeler, en yıkıcı olanlar arasında yer alır. Hızlıca ve aniden meydana gelen bu olaylar sıklıkla, geniş yapıya sahip zemin kütlelerinin aşağı doğru hareketine sebep olur.



Şekil 2. 3. Akma göçmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

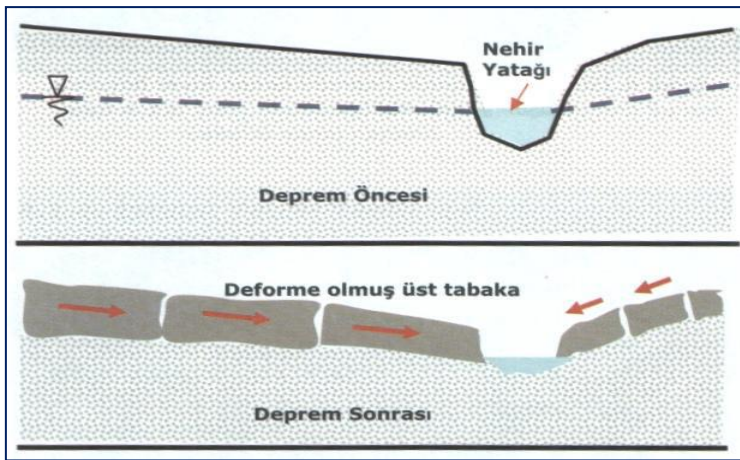


Resim 2. 4. 1971 depreminden sonra The Lower San Fernando Barajında oluşan akma göçmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Bu olaya örnek olarak, 1971'deki depremde The Lower San Fernando Barajında meydana gelen akma göçmesi Resim 2.4'te görülmektedir.

2.3.3. Yanal yayılma

Genellikle çok az eğimli ($0,3^{\circ}$ - 3°) yamaçlar veya su kütlelerine yakın düz arazilerde yerleşim gösterirler (Şekil 2. 4). Yanal yayılımlar, altındaki zeminin sıvılaşması ve yüzey sediment bloklarının yan yönlere hareket etmesiyle gerçekleşir. Bu tür yayılımlar genellikle birkaç metreyle sınırlı kalmaktadır. Bu hareketler, dolgu alanları, liman tesisleri, boru hatları, köprüler ve yüzey temellerine sahip diğer yapılar üzerinde önemli hasarlara yol açabilmektedir.



Şekil 2. 4. Yanal yayılma oluşum biçimi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006).

Resim 2.5'de 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w= 7.7$) ve Elbistan

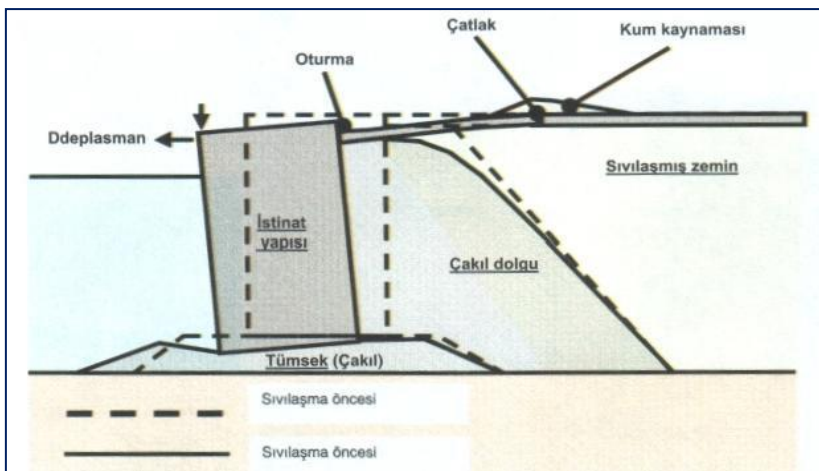
($M_w=7.6$) depremleri ardından Adıyaman Gölbaşı ilçesinde gözlemlenen yanal yayılma ve sıvılaşma görüntüsü oluşum biçimi verilmiştir.



Resim 2. 5. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w= 7.7$) ve Elbistan ($M_w= 7.6$) depremleri ardından Adıyaman Gölbaşı ilçesinde gözlemlenen yanal yayılma ve sıvılaşma görüntüsü

2.3.4. İstinat yapısı yenilmesi

Sıvılaşmış temel zemin, destek kaybı veya istinat yapısı arkasındaki sıvılaşmış zemin nedeniyle artan yanal yükler ile etkilenir. İstinat yapısı yenilme biçimi durumu Şekil 2.5’ te gösterilmiştir. Sonuç olarak, istinat yapısı düşey ve/veya yatay yönde yer değiştirmelere maruz kalmaktadır.



Şekil 2. 5. İstinat yapısı yenilme biçimi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006).

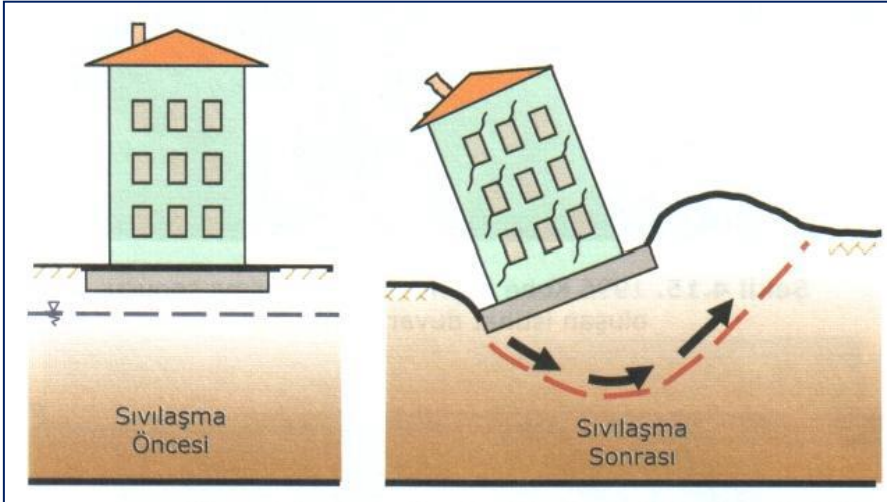
1995 yılında Kobe’de meydana gelen depremde, sıvılaşmadan dolayı istinat duvarının yenilmesi Resim 2.6’da gösterilmiştir.



Resim 2. 6. 1995 yılında Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006).

2.3.5. Taşıma gücü kaybı

Temel zemin, sıvılaşma sonucunda dayanımını kaybeder ve taşıma gücünü kaybeder. Bu durum, üzerindeki yapıların batmasına, dönmesine, yan yatmasına ya da devrilmesine neden olabilir (Şekil 2.6).



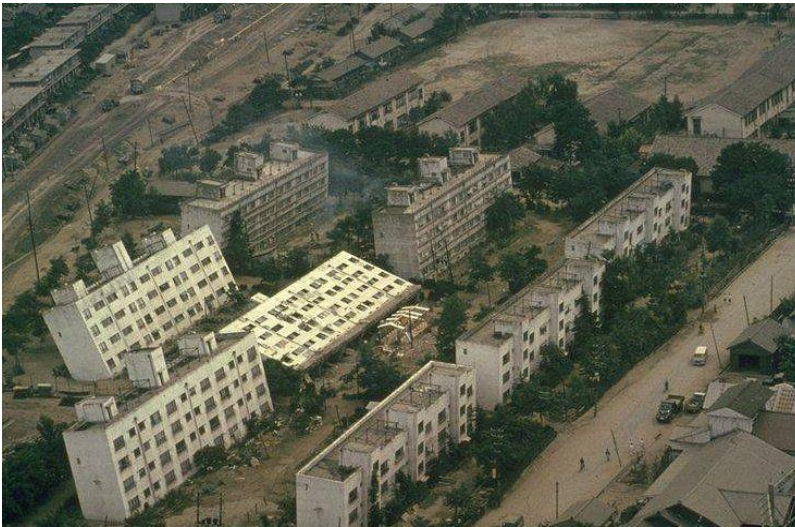
Şekil 2. 6. Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006)

Resim 2.7’de 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w = 7.7$) ve Elbistan ($M_w=7.6$) depremleri sonrasında, Adıyaman Gölbaşı ilçesinde sıvılaşma sonucu farklı oturmalar gösterilmiştir.



Resim 2. 7. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w = 7.7$) ve Elbistan ($M_w = 7.6$) depremleri sonrasında, Adıyaman Gölbaşı ilçesinde sıvılaşma nedeniyle oluşan oturma

Resim 2.8’de, 1964 yılında meydana gelen Niigata depremi sonucu sıvılaşma etkisiyle devrilen binalar gösterilmiştir (Youd, 1984). 1964 yılında Alaska ($M_w = 9.2$) ve Niigata ($M_w = 7.6$) depremlerinin meydana gelmesiyle birlikte zemin sıvılaşması, bu duruma bağlı olarak gerçekleşen oturmalar, taşıma gücü kayıpları, yanal toprak yayılması ve kaymalar gibi etkiler ortaya çıkmıştır. Bu depremler sonrasında sıvılaşma mekanizması ve hangi tür zeminlerin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu üzerine pek çok çalışma yapılmıştır.



Resim 2. 8. 1964 Niigata depremi (Youd, 1984).

2.4. Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Analizi

2.4.1. Basitleştirilmiş sıvılaşma analizi

Zeminlerin gerilme esasına dayalı sıvılaşma hassasiyetinin değerlendirilmesi için basitleştirilmiş bir prosedür geliştirme çalışmaları, ilk olarak Seed ve Idriss tarafından 1971 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, deprem anında zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenliği, zeminlerin çevrimsel direnç oranı (CRR) ve depremin etkisiyle oluşan çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile karşılaştırılmaktadır. Seed ve Idriss tarafından deprem esnasında meydana gelen tekrarlı gerilme oranı Denklem (2.1)'de tanımlanmıştır.

$$CSR = 0.65 * \frac{\sigma_v}{\sigma'_{vo}} * a_{max} * r_d \quad (2.1)$$

Burada;

g: yer çekimi ivmesi

σ_v : sıvılaşma değerlendirmesinin yapıldığı derinlikteki (z) toplam gerilme

σ'_{vo} : sıvılaşma değerlendirmesinin yapıldığı derinlikteki (z) efektif gerilme

r_d : gerilme azalım katsayısıdır.

Denklem (2.2a) ve Denklem (2.2b)'de verilen derinliğe bağlı ifadelerden belirlenmektedir (Liao ve Whitman 1986).

$$r_d = 1.0 - 0.00765 * z \quad z \leq 9.15 \text{ m} \quad (2.2a)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 * z \quad 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (2.2b)$$

2.4.2. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre sıvılaşma analizi

Deprem etkilerinin azaltılması amacıyla, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) 2019 itibarıyla uygulamaya konulmuştur. Bu yeni düzenleme, sadece Türkiye'de değil, uluslararası alanda da kabul gören yaklaşımlara uygun olarak sıvılaşma analizlerine özgü yöntemleri içermektedir. TBDY (2018) ile birlikte Türkiye'de deprem tehlikesinin tanımlanma değişime uğramıştır. Bu yönetmelik, daha önce kullanılan deprem bölgeleri yaklaşımını terk ederek yerine bölgesel tehlikenin daha hassas belirlendiği yeni bir yöntem benimsemiştir. Yeni düzenleme kapsamında, dört farklı yer hareketi düzeyi dikkate alınarak Deprem Tehlike Haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar, kısa periyotlar

için (S_S) ve 1.0 s periyodu için (S_1) olmak üzere iki adet boyutsuz spektral ivme katsayısı değeri sağlamaktadır (TBDY, 2018). Yatay Elastik Tasarım Spektrumu'nun oluşturulması için öncelikle yerel zemin sınıfı temel alınarak belirlenen yerel etki katsayılarının kullanılması gerekir. Bu katsayılar sayesinde, harita spektral ivme katsayıları (S_S ve S_1 gibi) Tasarım Spektral İvme Katsayılarına (S_{DS} ve S_{D1}) dönüştürülür (TBDY, 2018; Şekil 2.7). Birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen harita spektral ivme katsayıları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu [$(V_S)_{30} = 760$ m/s] esas alınarak % 5 sönüm oranı için harita spektral ivmeleri'nin yerçekimi ivmesine bölünmesi ile boyutsuz katsayılar olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan harita spektral ivme katsayıları S_S ve S_1 , Denklem (2.3) ve Denklem (2.4)'teki şekilde tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} 'e dönüştürülür.

Harita spektral ivme katsayıları, düşey eksenlere dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşılık gelir. Bu boyutsuz katsayılar, belirli bir deprem yer hareketi düzeyinde, referans zemin koşulu [$(V_S)_{30} = 760$ m/s] temel alınarak ve %5 sönüm oranı için hesaplanan harita spektral ivmelerinin yerçekimi ivmesine bölünmesiyle elde edilir (TBDY, 2018). Ardından, tanımlanan bu S_S ve S_1 değerleri, Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) kullanılarak tasarım spektral ivme katsayıları olan S_{DS} ve S_{D1} elde edilmektedir.

$$S_{DS} = S_S \cdot F_S \quad (2.3)$$

$$S_{D1} = S_1 \cdot F_1 \quad (2.4)$$

Denklem (3.3) ve Denklem (3.4)'de, S_S , kısa periyod spektral ivme değeri, F_S , kısa periyod bölgesi için yerel zemin etki katsayısıdır. S_{DS} ; Kısa periyot (0.2s) boyutsuz tasarım spektral ivme katsayısıdır. S_{DS} 'nin, S'si Spektral ivme, alt indis "D"si Design/tasarım, alt indis küçük "S" Short/kısa anlamına gelmektedir. F_S ve F_1 yerel zemin etki katsayıları Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de verilmiştir.

Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları Denklem (2.5) ile Denklem (2.6)'da verildiği şekilde T_A ve T_B ; S_{DS} ve S_{D1} 'e bağlı olarak tanımlanır. Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu $T_L = 6$ saniye (s) alınır.

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.5)$$

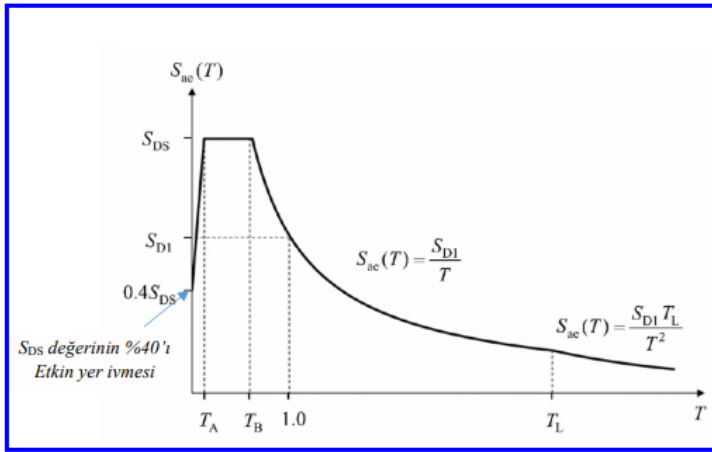
$$T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.6)$$

Tablo 2. 1. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_s) (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_s)					
	$S_s \ll 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \gg 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi					

Tablo 2. 2. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_1) (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı (F_1)					
	$S_s \ll 0.10$	$S_s = 0.20$	$S_s = 0.30$	$S_s = 0.40$	$S_s = 0.50$	$S_s \gg 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi					



Şekil 2. 7. Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY,2018).

2.4.2.1. Yerel zemin sınıflarının belirlenmesi

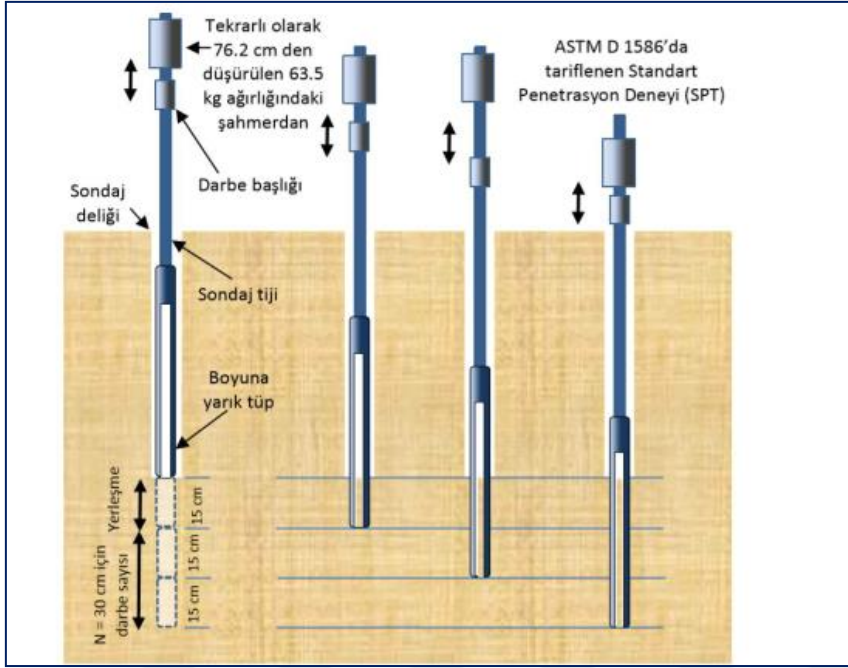
Zemin sınıflandırılmaları (TBDY, 2018)'e göre; jeofizik ölçümler (V_{s30}), SPT deneyleri ve drenajsız kayma mukavemeti (c_u) $_{30}$ parametreleri esas alınarak yapılmaktadır (Tablo 2.3).

Tablo 2. 3. (TBDY, 2018)’e göre yerel zemin sınıfları.

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cins	Üst 30 Metrede Ortalama		
		(Vs) ₃₀ (m/s)	(N ₆₀) ₃₀ (darbe/30 cm)	(cu ₃₀) (kPa)
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	>50	>250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya PI >20 ve w >% 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası cu	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killeri, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killeri, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI >50) killeri, 4) Çok kalın (>35 m) yumuşak veya orta katı killeri			

2.4.2.2. Standart Penetrasyon Testine (SPT) dayalı sıvılaşma analizi

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), yer altı mühendislik özelliklerini belirlemede dünya çapında kabul görmüş ve yaygın biçimde kullanılan bir arazi testidir. Zemin sınıflaması, kohezyonlu zeminlerin kıvamı ve kohezyonsuz zeminlerin sıklığı gibi temel özelliklerin yanı sıra, taşıma kapasitesi ve oturma tahminleri de dâhil olmak üzere temel zeminin geoteknik davranışını değerlendirmek için SPT verileri kullanılmaktadır. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) kavramı, kökenini 1947 yılında Terzaghi'nin öncülüğünde Teksas Zemin Mekaniği Konferansı'nda ortaya atılan 'örnek alıcı tüpün zemine çakılması' tanımından almaktadır (Clayton ve ark., 1995). Deney düzeneği, uç kısmında 'boyuna yarık tüp' adı verilen standart örnek alıcısının bulunduğu tijler üzerine kuruludur. Deney, 63.5 kg ağırlığındaki bir şahmerdanın 76.2 cm serbest düşme mesafesinden tekrarlı bir şekilde düşürülerek örnek alıcının zemine bırakılması prensibine dayanır. Bu işlem, kuyu tabanından toplamda 45 cm'lik bir itilme sağlanana kadar devam eder ve bu sürede gerekli olan darbe sayısı (SPT-N) değeri belirlenir. Örnek alıcısı ile alınan örnekler, laboratuvar deneylerinde örselenmiş halde kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de Standart Penetrasyon Deneyi'nin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2. 8. Standart penetrasyon deneyi aşamaları (FHWA, 2002b).

Deprem dalgaları, zeminin katmanları içinden geçerken depremin özelliklerini değiştirmenin ötesinde, bu katmanların özelliklerini de etkileyerek yumuşama ve mukavemet azalmasına neden olabilir. Sıvılaşma riski analizleri yapılırken, tekrarlı gerilmelere maruz kalan zemin katmanlarının davranışlarının tespit edilmesi önemlidir. Bu tespit, risk değerlendirme sürecinde kritik bir yere sahiptir. Gerilme esaslı SPT tabanlı sıvılaşma analizlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için çeşitli parametrelerin dikkate alınması gerekir. Bu parametreler arasında sismik veriler (deprem büyüklüğü ve pik yatay yer ivmesi), zemin verileri (zemin özellikleri, tane dağılımı ve (SPT-N) değeri) ile saha koşulları (yer altı su seviyesi, arazi koşulları ve kullanılan ekipman özellikleri) yer almaktadır. Özellikle iri daneli zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirlemede en sık başvurulan yöntem, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)'dir.

SPT uygulamaları sırasında, deney sonuçlarını etkileyen çeşitli fiziksel faktörler tespit edilmiştir. Bu sebeple, standart penetrasyon direnci verilerinin evrensel bir temelde değerlendirilmesini mümkün kılmak amacıyla, literatürde bu faktörlerin etkisini gidermeye yönelik düzeltmeler geliştirilmiştir. Standart penetrasyon deneyinde arazide ölçülen darbe sayısı (SPT-N); örtü basıncı, enerji oranı, sondaj kuyusu çapı, tij boyu ve numune alıcı türü gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, SPT'ye dayalı hesaplamalarda kullanılacak olan SPT-N değerlerinin öncelikle düzeltilmesi gerekmektedir (Tablo 2.3). 100 kPa'lık örtü basıncı ve % 60 enerji verimliliği için düzeltilmiş SPT-N değerleri, $N_{1,60}$ Denklem

(2.7)'den elde edilir.

$$(N_1)_{60} = N * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (2.7)$$

Denklemin sol tarafı düzeltilmiş SPT darbe sayısını, N belirli bir alanda ölçülen SPT darbe sayısını, C_N derinlik düzeltme faktörünü, C_E çekiç enerji oranı (ER) düzeltme faktörüne karşılık gelir, C_B sondaj çapı düzeltme faktörünü, C_R çubuk uzunluğu düzeltme faktörünü ve C_S ise astarlı veya astarsız örnekleyiciler için düzeltme faktörünü belirtir. İnce dane oranı %5'den az olan temiz kumlar ($FC \leq \%5$) için $M_w = 7.5$ büyüklüğündeki depremler için sıvılaşmanın gerçekleştiği ve gözlenmediği bölgeleri ayıran eğri, Youd ve ark. (2001), tarafından temiz kum eğrisi (Şekil 2.9) olarak tanımlanmakta ve bu durum için tekrarlı direnç oranı ($CRR_{7.5}$) Denklem (2.8)'deki gibi formüle edilir.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{(10 * (N_1)_{60,cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (2.8)$$

Kum içerisindeki ince dane miktarı artışı zeminin tekrarlı kayma direncini artırmaktadır. 100 kPa'lık örtü basıncı ve 7.5 büyüklüğündeki deprem için, ince dane oranının % 5'den fazla olması durumunda düzeltilmiş $(N_1)_{60}$ değerleri Denklem 2.9 kullanılarak eşdeğer temiz kum değerlerine $(N_1)_{60,cs}$ dönüştürülmektedir. Burada α ve β ifadeleri ince dane oranına bağlı olarak Denklem (2.10a), Denklem (2.10b) ve Denklem (2.10c)'de verilmiştir.

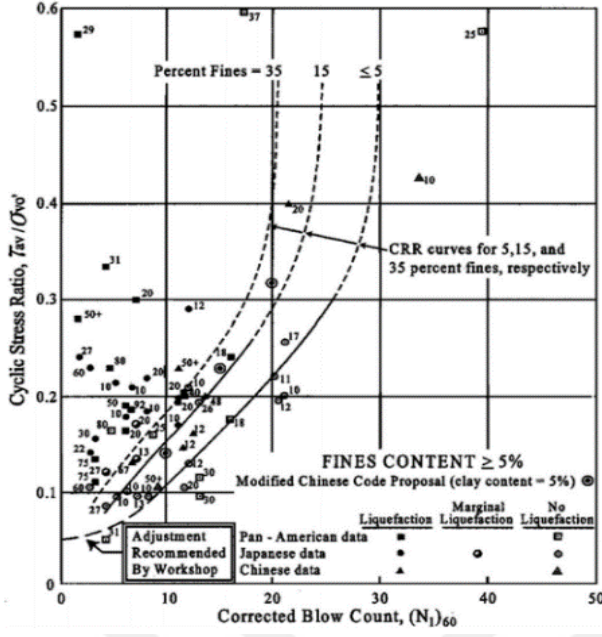
$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta * (N_1)_{60} \quad (2.9)$$

ve burada α ve β

$$\alpha = 0, \beta = 1 \quad F.C. \leq \%5 \quad (2.10a)$$

$$\alpha = \exp [1.76 - (190/FC^2)], \beta = 0.99 + FC^{1.5}/1000 \quad \%5 < F.C. < \%35 \quad (2.10b)$$

$$\alpha = 5, \beta = 1.2 \quad F.C. \geq \%35 \quad (2.10c)$$



Şekil 2. 9. $M_w = 7.5$ büyüklüğündeki deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı (Youd ve ark., 2001).

Tekrarlı direnç oranı (CRR), bazı özel durumlar altında Denklem (2.11) uyarınca genelleştirilmeye tabi tutulur. Bu durumlar arasında $M_w = 7.5$ üzerindeki veya altındaki deprem büyüklükleri, 100 kPa'dan yüksek örtü basınçları ve zeminin başlangıç statik kayma gerilmelerine maruziyeti bulunmaktadır.

Denklem (2.12)'de ise deprem magnitudü düzeltme faktörü ifade edilmiştir.

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{7.5} * C_M * K_\sigma * K_s \quad (2.11)$$

Burada;

C_M : Deprem magnitudü düzeltme faktörüdür.

$$C_M = (M_w/7.5)^{-2.56} \quad (2.12)$$

K_σ örtü basıncı düzeltme faktörü olup Denklem (2.13)'de verilmiştir. Denklem (2.13)'teki f ifadesi zeminin rölatif sıkılığına bağlı 0.6 ile 0.8 arasında bir değerdir (Youd ve ark., 2001). K_s düzeltme faktörü ise başlangıç statik kayma gerilmesinin etkisini hesaba katan bir parametre olup günümüzde genellikle ihmal edilmektedir.

$$K_\sigma = (\sigma'_v/100)^{f-1} \quad (2.13)$$

Güvenlik sayısının hesaplanması, Denklem (2.1) ve (2.8)'de sunulan gerilme

oranları dikkate alınarak Denklem (2.14) kullanılarak yapılır. Genellikle akademik çevrelerce kabul edilen 1.1 sınır değeri, sıvılaşma duyarlılığının varlığını belirlemek için kullanılır ve bu değer, yeni TBDY (2018) tarafından da herhangi bir değişiklik yapılmadan kabul görmüştür.

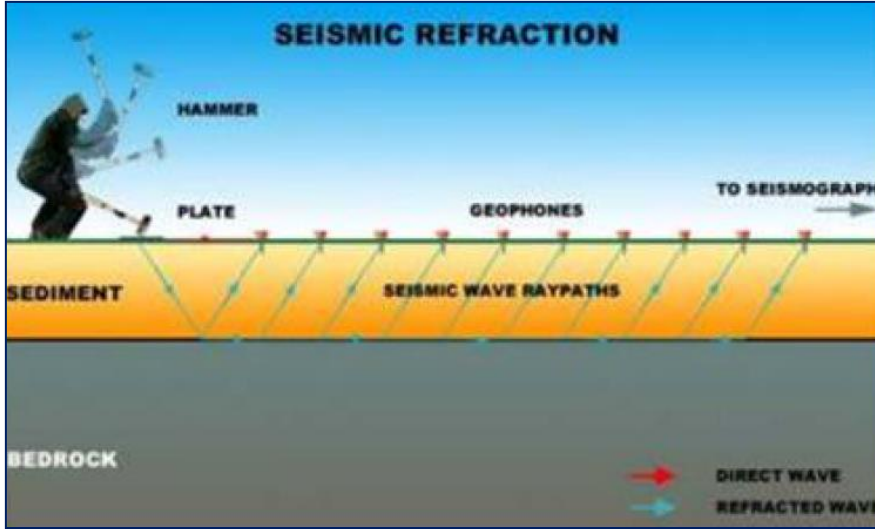
$$FS = \frac{CRR_{M,\sigma'_v}}{CSR} \quad (2.14)$$

Tablo 2. 4. Standart Penetrasyon Testi (SPT) düzeltme faktörleri (TBDY, 2018).

Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
C_N	$(1/\sigma'_{v0})^{1/9.78} \leq 1.7$	
C_R	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C_S	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_B	Çap 65 mm-115 mm arasında	1.00
	Çap 150 mm	1.05
	Çap 200 mm	1.15
C_E	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

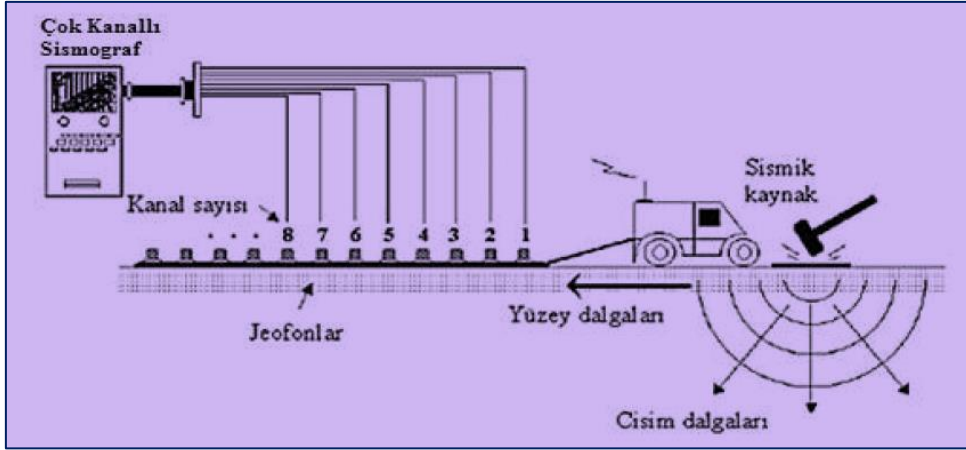
2.4.2.3. Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizi

Sismik Kırılma Yöntemi, yer altına gönderilen sismik dalgaların kırılarak jeofon alıcılarına ulaşması ile, dalgaların yer içinden geçiş süresinin ölçülmesine dayanır. Bu ölçümler, elastik dalgaların belirli mesafelerdeki alıcılara varış sürelerinin kaydedilmesiyle gerçekleştirilir ve bu sayede dalgaların ortam içindeki yayılma hızı belirlenir. Farklı ortamların sahip olduğu değişen dalga hızları, tabakaların kalınlık, derinlik ve yer altındaki yapılara dair bilgilerin elde edilmesinde kullanılır. Bu hız verileri, tabakaların dinamik elastik özelliklerini yansıtan parametrelerin hesaplanmasına olanak tanır. Ayrıca bu yöntem, sunduğu pratiklik, hız ve ekonomiklik sayesinde, veri toplama ve sonuç değerlendirme süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Tabakalı zeminlerde dalga yayılım hızının derinliğe bağlı olarak arttığı durumlarda, sismik kırılma yöntemi zemin tabakalarının hız ve derinliklerini güvenilir bir hassasiyetle belirler. Sismik kırılma tekniği için gerekli olan jeofon ve kaynakların saha yerleşim şeması, Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2. 10. Sismik kırılma yönteminin arazide uygulanaşı (USGS, 2025).

Yeraltı tabakalarının fiziksel özellikleri, makaslama modülü, elastisite modülü, sıkışmazlık modülü, doğal salınım periyodu, sismik büyütme, poisson oranı gibi parametreler, makaslama (S) hızı ile yakından ilişkilidir. Yer altı katmanlarındaki S hızı değişimlerinin tespiti, geoteknik mühendisliği uygulamaları için oldukça önemlidir. Yüzey dalgası analizine dayalı MASW tekniği, yerin sığ kesimlerinin sismik hız profillerini ortaya çıkarmada son dönemde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir (Park ve ark., 1999). Bu yöntem, sismik kırılma tekniği ile aynı dizilim geometrisini kullanarak, araştırmacıların daha geniş ve derin zemin katmanlarını incelemesine imkân verir. MASW gibi yüzey dalgası analiz yöntemleri, V_{s30} , değerini yüksek güvenilirlikle hesaplama yeteneği sunar. Zemin sınıflamasında merkezi bir rol oynayan V_{s30} , Eurocode-8 ve UBC gibi uluslararası yapı standartlarının önemli temel parametreleri arasında yer almaktadır. Yüzey dalgası analizinde, yer altındaki tabakalı yapıların derinlikle değişen kesme dalgası hızı (V_s), Rayleigh dalgasının dispersiyonunun ters çözüm tekniği kullanılarak hesaplanır; bu süreçte faz hızı frekansa bağlı olarak değişmektedir. Çok kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeneği Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2. 11. Çok- kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeneği (Park ve ark., 1998).

İnşaat ve geoteknik mühendisliği alanında, yüzeye yakın zemin tabakalarına ait kayma dalgası hızı V_s , kritik bir zemin karakteristiği olarak kabul görmektedir. Kayma dalgası hızı V_s , zeminlerin dinamik davranışını belirleyen kritik bir değerdir. Bu parametre hem sıvılaşma potansiyeli değerlendirmelerinde hem de genel dinamik zemin özelliklerinin tayininde aktif rol oynar. Kayma dalgası hızı (V_s) klasik jeofizik yöntemler olan sismik kırılma ve sismik yansıma tekniklerinin yanı sıra cross-hole, down-hole, sismik-CPT gibi kuyu jeofiziği teknikleri, çok kanallı yüzey analiz (MASW) yüzey dalgaları spektral analiz (SASW) gibi analiz yöntemleri ile belirlenebilmektedir. Sismik deneylerle elde edilen kayma dalgası hızına bağlı olarak sıvılaşma direncini Andrus and Stokoe (2000) tarafından Denklem (2.15)'deki gibi ifade edilir.

$$CRR_{7.5} = 0.022 * \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 * \left[\left(\frac{1}{215 - V_{S1}} \right) - \left(\frac{1}{215} \right) \right] \quad (2.15)$$

Bu yöntemde öncelikle, S-dalga hızının (V_{S1}) sıvılaşma hesaplarında kullanılmasında bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir (Şekil 2.12). Burada düşey gerilmeye göre kayma dalgası hızı için üst tabaka yükü, düzeltilmesi S-dalga hızı (V_{S1}), Denklem (2.16) kullanılarak ifade edilir.

$$C_v = (P_a / \sigma'_0)^{0.25}$$

$$V_{S1}^* = V_{S1} * (P_a / \sigma'_0)^{0.25} \quad (2.16)$$

Burada;

C_v : Kayma dalga hızı düzeltme katsayısı

P_a ; 100 kPa'a tekabül eden atmosferik basınç

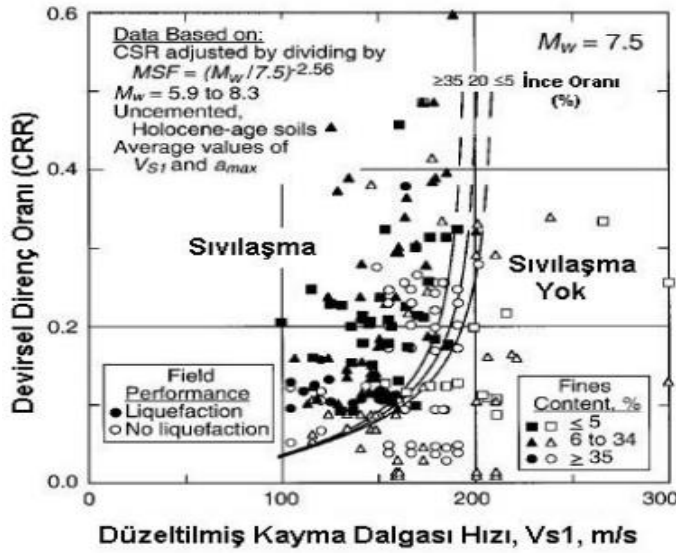
σ'_v ; düşey efektif gerilme (kPa)

V_{S1}^* ; ince dane oranına (FC) bağılı olarak sıvılaşmanın olduğu üst limit kayma dalgası hızıdır.

Kumlu zeminler için geliştirilen eşitlik için V_{S1} ;

$$CRR_{7.5} = 0.022 * \left(\frac{V_{S1}}{100}\right)^2 + 2.8 * \left[\left(\frac{1}{215-0.5(FC-5)-V_{S1}}\right) - \left(\frac{1}{215-0.5(FC-5)}\right)\right] \quad \%5 < F.C. < \%35 \quad (2.17)$$

$$CRR_{7.5} = 0.022 * \left(\frac{V_{S1}}{100}\right)^2 + 2.8 * \left[\left(\frac{1}{200-V_{S1}}\right) - \left(\frac{1}{200}\right)\right] \quad F.C. \gg 35 \quad (2.18)$$



Şekil 2. 12. Büyüklüğü 7,5 deprem için temiz ve siltli kumlar için düzeltilmiş Vs - CSR Abağı (Andrus ve Stokoe, 1999).

2.4.2.4. Sıvılaşma güvenlik koşulu

Zeminler, deprem sırasında titreşimli veya devirli yüklerin etkisiyle gerilmeye tepki verdiklerinde, normalde katı bir malzeme olarak işlev görürken sıvı gibi davranmaya başlarlar. Bu duruma “sıvılaşma” denir. Sıvılaşma olayı, depremin oluşturduğu tekrarlı yükleme ve zeminlerin sıvılaşma direnç özelliklerinin incelenmesiyle değerlendirilebilir. Bu bağlamda, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi, spesifik bir zemin profili için yükleme ve direnç arasındaki ilişkiyi kıyaslamaya yönelik bir çalışmadır.

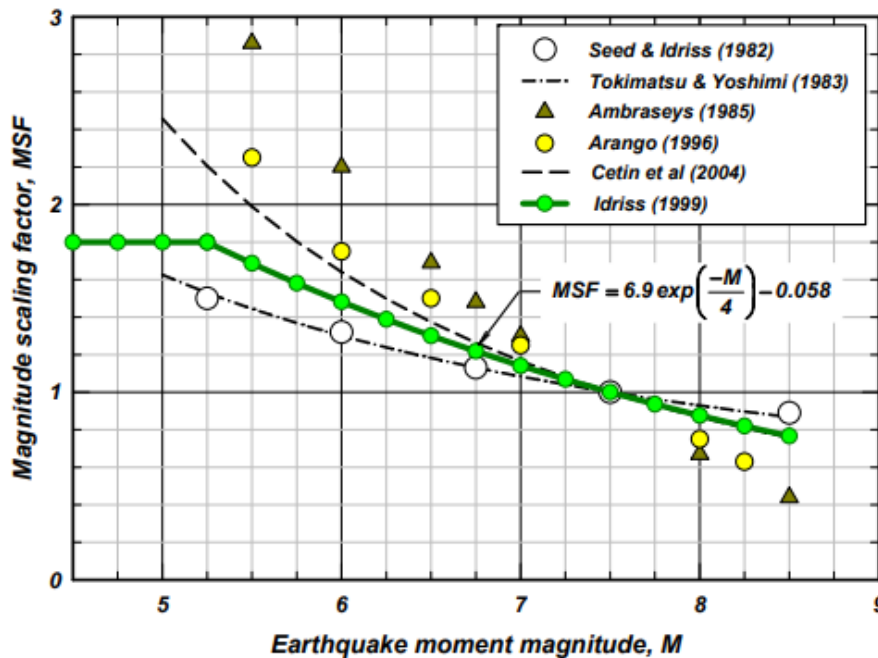
Sonuç olarak, zeminin sıvılaşmaya karşı gösterdiği devirsel direnç oranı (CRR) ile deprem kaynaklı devirsel kayma gerilmesi oranı (CSR) kullanılarak bir güvenlik faktörü hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada düzeltilmiş SPT-(N1)₆₀ değerleri dikkate alınmakta ve

Youd et al. (2001) ile Idriss ve Boulanger (2008) tarafından önerilen güvenlik katsayısı denklemi (Denklem 2.19) ile ifade edilir. Ayrıca, Denklem (2.20)'de, sıvılaşma karşısındaki güvenlik katsayısının Magnitüd Ölçekleme Faktörü (MSF) etkisi de dikkate alınmıştır.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} * MSF \quad (2.19)$$

Genel kural olarak güvenlik faktörü 1.2'den büyük olması durumunda sıvılaşma olmadığı, 1 ve 1.2 arasında potansiyel sıvılaşma olduğu ve 1'den küçük olması durumunda sıvılaşma olacağı tahmin edilmektedir (Seed ve Idriss, 1982). Deprem büyüklüklerine göre Magnitude scaling factor (MSF) ilişkileri Şekil 2.13'de gösterilmiştir (Idriss ve Boulanger 2010). MSF deprem büyüklük düzeltme faktörü olup Idriss (1999) tarafından geliştirilen Eşitlik (2.20) ile ifade edilir.

$$MSF = 6.9 \exp\left(\frac{-M_w}{4}\right) - 0.06 \quad M_w > 5.2 \quad (2.20)$$



Şekil 2. 13. Magnitude scaling factor (MSF) ilişkileri (Idriss ve Boulanger, 2010).

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY,2018)’e göre sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu Denklem 2.21 ile hesaplanacaktır. Denklem (2.21) ile verilen koşul sağlanmaz ise “*Sıvılaşma Olabilir*”, koşul sağlanır ise “*Sıvılaşma Yok*” olarak ifade edilir.

$$FS_L = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \gg 1.10 \quad (2.21)$$

Burada;

τ_R : sıvılaşma direnci

τ_{deprem} : zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesidir.

2.4.3. Sıvılaşma şiddet parametreleri

Sıvılaşmanın potansiyelini ve meydana gelmesi durumunda oluşabilecek hasar düzeyini belirlemek amacıyla, araştırmacılar çeşitli şiddet parametrelerinin hesaplanmasına yönelik ampirik denklemler geliştirmişlerdir. Bu ampirik denklemler aşağıda sunulmuştur.

2.4.3.1. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması (LS) yöntemi

Sıvılaşma potansiyel indeksi (LI) yönteminde, güvenlik sayısı değerinin (F_{SL}) 1.2 olması durumu, zeminin sıvılaşmayacağı şeklinde kabul edilmektedir. Bu değerlendirme kriteri, Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) ile Chen ve Juang (2003) tarafından geliştirilen ve Denklem (3.1)’de sunulan bağıntı ile verilmiştir. 15 metre derinlikte ve sıvılaşma şiddeti sınıflandırılması Denklem (2.22) ile ifade edilir. Denklem (2.22a) ve Denklem (2.22b)’de F_{SL} koşul durumlarına göre PL bağıntıları verilmiştir.

$$L_S = \int_0^{20} PL(z) * W(z) dz \quad (2.22)$$

$$F_{SL} \leq 1.411 \text{ için; } PL = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_{SL}}{0.96}\right)^{4.5}} \quad (2.22a)$$

$$F_{SL} > 1.411 \text{ için; } PL = 0 \quad (2.22b)$$

Tablo 2. 5. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) ile Chen ve Juang (2003)'a göre sıvılaşma şiddeti (LS) sınıflandırması.

Ls	Sıvılaşma Potansiyeli
85= $\leq$ Ls<100	Çok Yüksek
65= $\leq$ Ls<85	Yüksek
35= $\leq$ Ls<65	Orta
15= $\leq$ Ls<35	Az
0= $\leq$ Ls<15	Çok Az
Ls=0	Sıvılaşma Beklenmez

2.4.3.2. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LI) yöntemi

Literatürde Iwasaki ve ark. (1982) tarafından Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LI) metodu olarak tanımlanan ve araştırmacılar tarafından yaygın kullanılan bu yönteme ait, sıvılaşma potansiyeli için farklı risk seviyelerine karşılık gelen değerler Tablo 3.25'te özetlenmiştir.

Tablo 2. 6. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LI) değişim Çizelgesi

Sıvılaşma İndeksi (LI)	Sıvılaşma Potansiyeli
0< LI	Çok Düşük
0<LI $\leq$ 5	Düşük
5< LI $\leq$ 15	Yüksek
LI > 15	Çok Yüksek

15 metre derinlik için Denklem (2.23) eşitlik sıvılaşma potansiyel durumu ifade edilir.

$$LI = \int_0^{20} F(z)dz \quad (2.23)$$

Eşitlikte;

$$F=1-F_{SL} \quad F_{SL} \leq 1 \text{ için,}$$

$$F=0 \quad F_{SL} > 1 \text{ için}$$

Burada,

w(z)=10-0.5z: derinlik ağırlık faktörü

z: derinliktir.

2.5. Sayısal Analiz Yöntemi İle Sıvılaşıma Analizi

2.5.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, Zienkiewicz (1977) tarafından sürekli sistemlerin matematiksel ifadelerle genel çözümünü sağlamak amacıyla tanımlanmıştır. Bu yöntem, sürekli sistemleri matematiksel olarak modellemede kullanılan, bilim ve mühendislik alanında etkili bir çözüm tekniğidir. Karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için kabul edilebilir bir yaklaşım sunan sonlu elemanlar, sayısal bir çözüm yöntemi olarak dikkat çekmektedir. Yöntemin temelinde, fiziksel bir sistemin matematiksel ifadelerle betimlenmesi yatmaktadır. Başka bir deyişle, farklı ve karmaşık geometrilere sahip sistemler, daha basit geometrilere sahip parçacıklara ayrılarak analiz edilir ve bu parçacıkların her biri ayrı ayrı çözülür. Sonlu elemanlar yöntemi, yükleme anındaki deformasyon şekilleri ve gerilme dağılımını belirlemede son derece etkilidir; bu nedenle, sığ temeller ile çevreleyen zemin davranışını incelemek için oldukça uygun bir yöntemdir (Örnek ve ark., 2012).

2.5.2. PLAXIS sonlu elemanlar programı

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan PLAXIS yazılımı, çeşitli karmaşık geometrilere sahip sistemlerin statik ve dinamik yükler altındaki deformasyon ve stabilite analizlerini gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu programın geliştirilme süreci, (1987) yılında Hollanda'daki Delft Teknik Üniversitesi'nde başlamış olup, başlangıçtaki temel amacı yumuşak zeminler üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemiyle kolayca analiz edilmesini sağlamaktır.

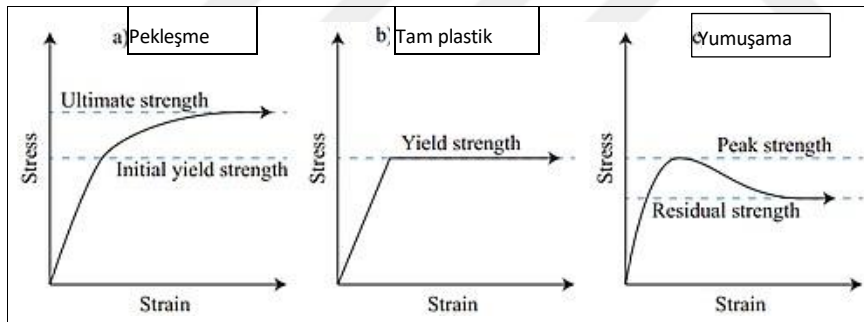
Geoteknik mühendisliği projelerinde PLAXIS yazılımı, zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı ve zemin dinamiği gibi çok çeşitli konuların incelenmesinde etkin rol oynamaktadır. Ayrıca, bu yazılım farklı malzeme özelliklerine sahip zemin durumlarını değerlendirmeye olanak tanır. Özellikle PLAXIS analizleri, tabakalı zeminlerdeki karmaşık geometrilere sahip sistemler üzerinde uygulanan farklı yönlerdeki yüklemeleri ve statik boşluk suyu basınçlarını başarılı bir şekilde hesaplayabilmektedir.

PLAXIS yazılımı, veri girişi ve modelleme (Input), hesaplama süreçleri (Calculation), elde edilen sonuçların sunumu (Output) ve sonuç grafiklerinin oluşturulması

(Curves) olmak üzere dört temel modülden meydana gelmektedir. Programın desteklediği zemin davranışı yaklaşımları arasında ise Lineer Elastik Model, Mohr-Coulomb Zemin Modeli ve Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model) gibi yaygın modeller bulunmaktadır.

2.5.2.1. Mohr-Coulomb modeli

Mohr-Coulomb Modeli zeminin gerilme şekil değiştirme eğrisinin birinci bölgesinde elastik, ikinci bölgesinde ise mükemmel plastik bir malzeme olduğu varsayımına dayanır (Şekil 2.14). Bu modelde gerilme durumları zeminin göçme kriteri anındaki değerlerle ifade edildiğinden zemindeki davranışın birinci derece yaklaşımı temsil eder. Bu sebeple sistemlerin ön analizlerinde kullanımları uygundur. Bu model zemin katmanlarının rijitliklerini derinlikle değişmediğini kabul edip, ortalama bir rijitlik parametresi kullanarak ifade eder, bu sebeple deformasyon değerleri gerçekçi değildir. Ancak analizler nispeten hızlı gerçekleşir.



Şekil 2. 14. Zeminlerde Pekleşme (a), MC model davranışı(b), Yumuşama (killerde)(c)

2.5.2.2. UBC3D-PLM modelin SPT-N sayısına bağlı kalibrasyonu ve zemin parametrelerinin belirlenmesi

Doğrudan arazi veya laboratuvar deneyleriyle belirlenemeyen model parametrelerinin tespitinde, kullanılan bünye modelinin kullanım kılavuzunda çeşitli korelasyonlar önerilmektedir. Tablo 2.7’de, UBC3DPLM sayısal modelinde kullanılan malzeme parametreleri verilmiştir.

Tablo 2. 7. Plaxis UBC3D-PLM parametreleri

ϕ_{cv}	Sabit sürtünme açısı
ϕ_p	pik sürtünme açısı
c	Kohezyon
k^e_B	PA=100kPa referans seviyesindeki zemin elastik hacim modülü
k^e_G	PA=100kPa referans seviyesindeki zemin elastik kayma modülü
k^p_G	Drenajlı plastik kayma modülü
m_e	Elastik hacim modülü üssü
n_e	Elastik kayma modülü üssü
n_p	Plastik kayma modülü üssü
R_f	Göçme oranı
f_{achard}	Pekleşme faktörü
$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş SPT değeri
f_{acpost}	Rijitlik azalma sırasında kayma modülünün değerinin minimum şiddetinin belirlenmesi faktörü

Model parametreleri SPT darbe sayısı $(N_1)_{60}$ değerine dayanmaktadır. Kalibrasyon için Denklem (2.24), Denklem (2.25), Denklem (2.26) Denklem (2.27) önerilmektedir.

$$K_G^e = 21.7 * 20 * (N_1)_{60}^{0.333} \quad (2.24)$$

$$K_B^e = K_G^e * 0.7 \quad (2.25)$$

$$K_G^p = K_G^e * (N_1)_{60}^2 * 0.003 + 100 \quad (2.26)$$

$$\phi_{pi} = \phi_{cv} + \frac{(N_1)_{60}}{10} \quad (2.27)$$

$(N_1)_{60} = 15$ 'ten daha büyük değerleri için pik sürtünme açısı Denklem (2.28)'e bağlı olarak artırılır.

$$\phi_p = \phi_{pi} + \max \left(0.0, \frac{(N_1)_{60} - 15}{5} \right) \quad (2.28)$$

Burada,

k^e_G , k^e_B , k^p_G : elastik kayma, hacim modülü ve plastik kayma modülü sayıları,

A:15-20 arasında değer alan sabit katsayı,

α : 0.7-1.3 arasında sabit katsayı, $(N_1)_{60}$: Düzeltilmiş SPT darbe sayısı

ϕ_{cv} : Sabit sürtünme açısı

ϕ_{pi} : Pik sürtünme açısıdır.

m_e , n_e için 0.5 sabit değeri, n_p için ise 0.4 değerleri kullanılması önerilir. Göçme oranı R_f ise Denklem (2.29) ile ifade edilir.

$$R_f = 1.1 * (N_1)_{60}^{-0,15} \quad (2.29)$$

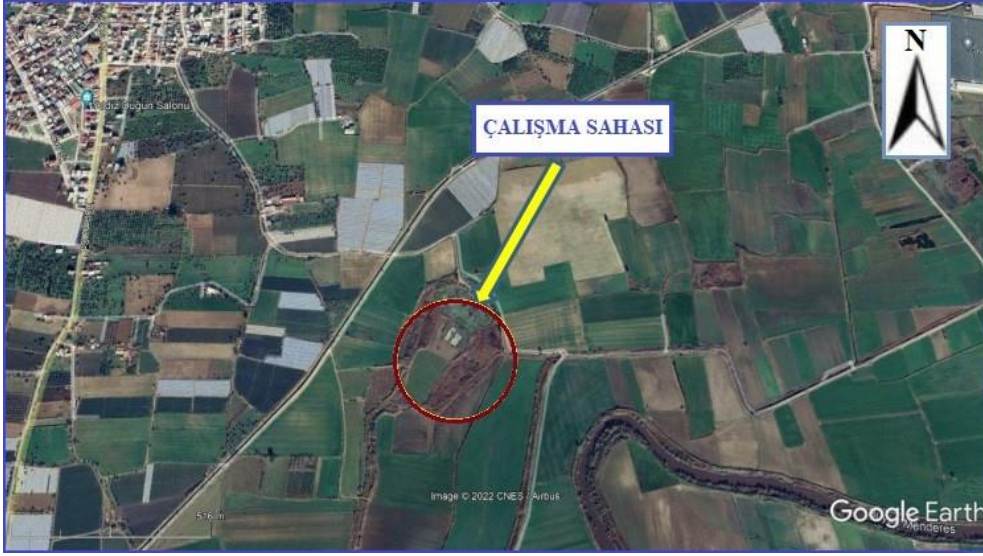


3. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında; Aydın ili Köşk İlçesi, Azmak mahallesi Atıksu Arıtma Tesis projesi kapsamında yapılacak, yerel zemin koşullarında inşası düşünülen mimari olarak bodrumsuz 1 ve 2 katlı yapılar ile, gömülü atıksu tesisi ünitelerinin deprem sırasında dinamik yükler altında meydana gelebilecek zemin sıvılaşması analizi Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY,2018)'e göre değerlendirilip yorumlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Aydın İli, Köşk İlçesi Atıksu Arıtma tesisi temelinin yerleşim alanındaki jeolojik formasyonların fiziksel özelliklerini ve yer altı yapısını belirlemek amacıyla kapsamlı jeofizik, jeolojik ve geoteknik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara dayanarak, zemin davranışını incelemek üzere statik ve dinamik durumlar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Plaxis (2D) modelleri oluşturulmuş ve sunulmuştur. Sahada dört noktada sismik ölçümler (MASW) ile birlikte, 15 metre derinliğinde toplamda 90 metre olmak üzere altı lokasyonda temel sondaj kuyusu çalışmaları yapılmıştır. Gerçekleştirilen saha jeolojisi ve jeofizik verilerinin korelasyonu sonucunda, inceleme alanının yer altı jeolojik yapısı ve geoteknik durumu detaylı analizlerle değerlendirilmiştir.

3.1. Çalışma Sahası Hakkında Genel Bilgiler

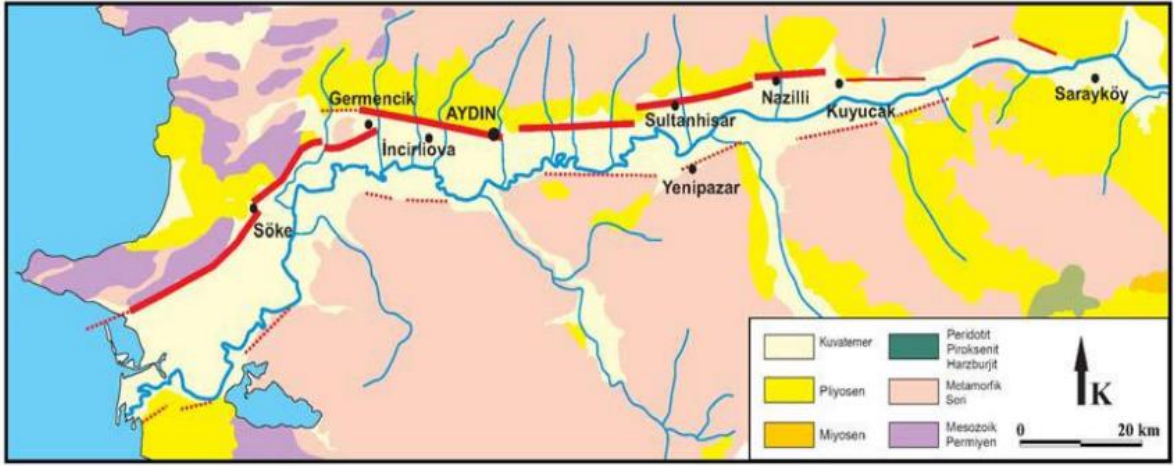
Çalışma sahasının yer aldığı Aydın ili, Ege Bölgesi'nin batı kesiminde konumlanmıştır ve coğrafi sınırları $37^{\circ} 30'$ ve $38^{\circ} 30'$ kuzey enlemleri ile $27^{\circ} 00'$ ve $28^{\circ} 57'$ doğu boylamları arasındadır. Ege Denizi'ne kıyısı bulunan üç ilden biri olan Aydın, batıda Ege Denizi, kuzeyde İzmir ve Manisa, doğuda Denizli ve güneyde Muğla illeriyle çevrilidir. Çalışma sahası Aydın İli, Köşk İlçesi'nin güneydoğusunda ve merkezine kuş uçuşu 1725 m kadar mesafededir (Şekil 3.1). Arazi düz veya düze yakın olup eğim yüzdesi %0-5 aralığındadır. Tesislerin yapılacağı saha ise en yüksek 42.20 m, en düşük 39.50 m kotlarına sahiptir. Saha ve yakın çevresinde topografik eğimler kuzey ve kuzeydoğudan, güney ve güneybatıya doğru çok az bir eğimle düşüş gösterir. Topografik eğimlerin çok düşük olması ve yer altı suyu ve yağış sularının kontrol edilmesi amacıyla bölgede kuzeyden güneye doğru oluşturulmuş drenaj kanalları mevcuttur.



Şekil 3. 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası(Google Earth,2022).

3.2. Bölgenin Jeolojik Özellikleri

İnceleme alanı Büyük Menderes grabeni sınırları içerisinde kalmaktadır. Menderes masifi ve üstündeki örtünün jeolojisi, değişik zamanlarda bilim adamlarınca (Pamir,1974, Angelier ve ark., 1981) ve MTA enstitüsü uzmanlarınca araştırılmış ve bu çalışmalara göre inceleme alanı ve tabanındaki birimler yaşlıdan gence doğru; Paleozoyik yaşlı şist ve mermer (Metamorfik kayalar), Neojen yaşlı kilit taşı, silt taşı, marn, kireç taşı, kum taşı, çakıl taşı, Kuvaterner yaşlı alüvyon ve birikinti konisi şeklinde gözlenmiştir. Aydın ili, Türkiye jeoloji literatüründe MM (Menderes Masifi) olarak adlandırılan saha sınırları içerisinde bulunmaktadır. Bölgenin temelini, Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalar oluşturmaktadır. Bu temel kayacın üzerine, tektonik bir dokanakla neojen yaşlı görsel kayalar yerleşmiş olup, en üstte ise kuvaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu birimleri bulunmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2. İnceleme alanı ve yakın çevresi jeoloji haritası(<http://deprem.afad.gov.tr>.2021)

3.3. Çalışma Sahasında Yapılan Geoteknik Araştırmalar

İnceleme alanındaki zeminin litolojik ve jeolojik durumu ile mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla altı (6) adet karotlu mühendislik sondajı yapılmıştır. Tüm sondajlar 15 metre derinliğe ulaşmıştır. Yeraltı suyu 0-3.00 m arasında elde edilmiş olup, 4 metreye varan çöp dolgusu sonrasında, sondaj sonuna kadar siltli kum birimler hakimdir. Çalışma sahasında düşey yöndeki zemin kesitinde 0.0–5.0 m aralıklarında katı atıklardan oluşmuş güncel dolgu, 2.5/5.0-15.0 m aralıklarında siltli kumlar ve çakıllı kumlar hakimdir. Açılan sondaj kuyularında, geçilen zemin tabakalarının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla Standart Penetrasyon Testi (SPT) uygulanmış ve örselenmemiş (UD) numuneler alınmıştır. Numune alma ve sondaj çalışmalarına ek olarak, jeofizik araştırmalar kapsamında 2 adet Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) ve 2 adet sismik (P ve S dalgası) serim çalışması gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sahasının zemin sınıfı Standart Penetrasyon Testine (SPT) göre ZD, Kayma dalga hızı (V_s)₃₀'na göre ise ZE olarak belirlenmiştir.

Ancak geçmiş deprem büyüklükleri ve yıkıcı etkileri göz önünde bulundurularak sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Mevcut zemin koşulları ve yapılan geoteknik analizler kapsamında inceleme alanı sıvılaşabilir kohezyonsuz kum/silt tabakaları içerdiği için zemin sınıfı ZF olarak belirlenmiştir.

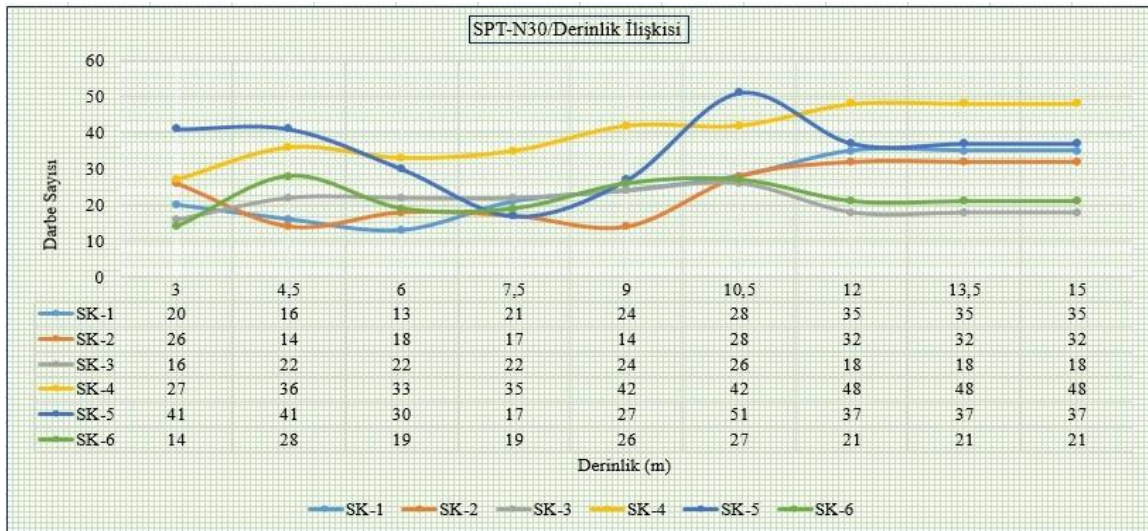
3.4. Çalışma Sahasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e Göre Sıvılaşma Analizleri

3.4.1. Standart penetrasyon testine (SPT) dayalı sıvılaşma analizi

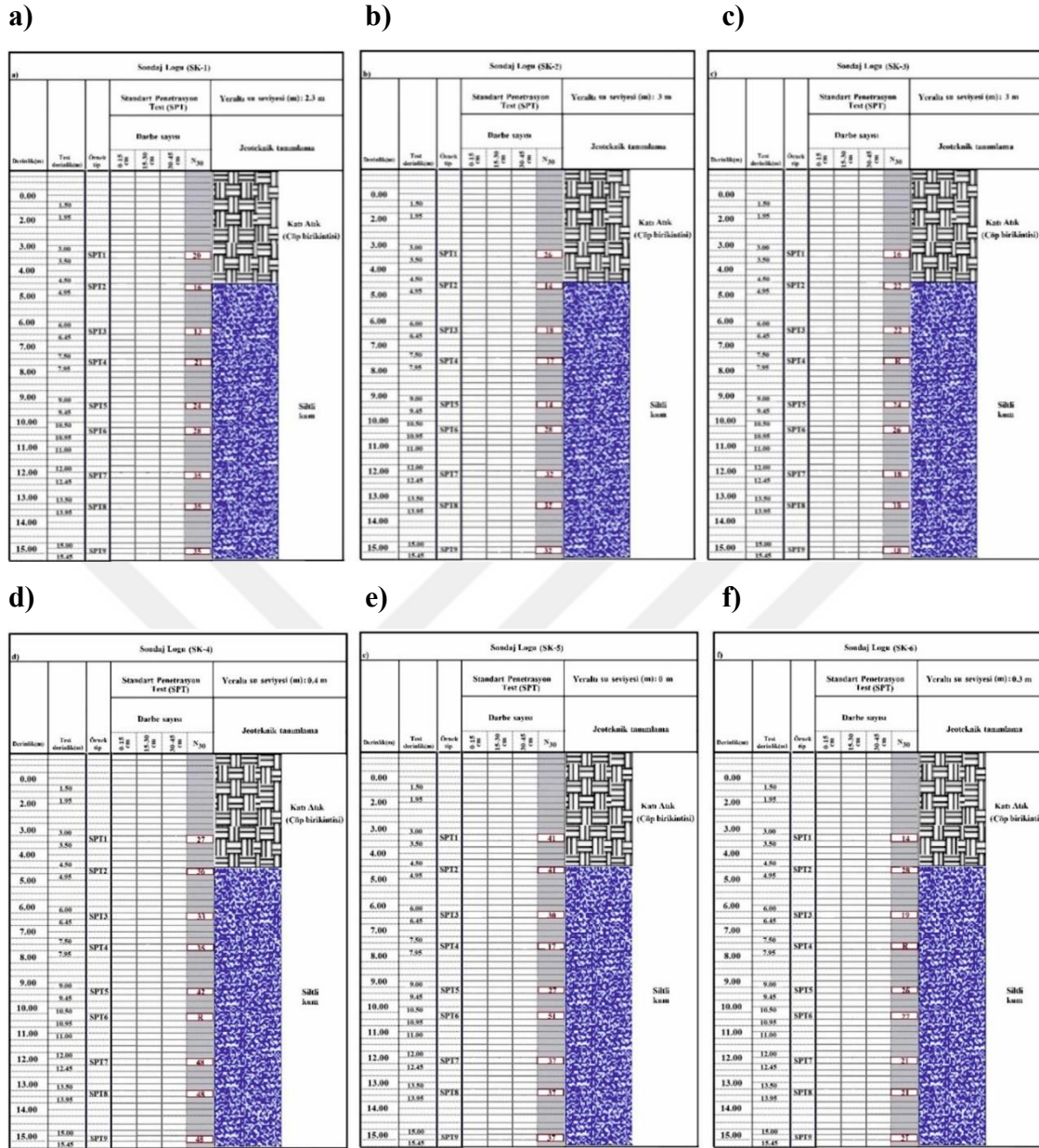
İnceleme alanında açılan altı adet sondaj kuyusunun (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4, SK-5, SK-6) derinlik değişim değerleri Tablo 3.1'de sunulmuştur. Bu kuyulardan elde edilen SPT-N₃₀ darbe sayılarının derinlikle değişimi grafiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Ayrıca, her bir sondaj kuyusuna ait (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4, SK-5, SK-6) bireysel SPT-N₃₀ sonuçları ise sırasıyla Şekil 3.4a, Şekil 3.4b, Şekil 3.4c, Şekil 3.4d, Şekil 3.4e ve Şekil 3.4f' ye kadar sunulmaktadır.

Tablo 3. 1. İnceleme alanında açılan sondaj kuyularının derinlikleri

Derinlik (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6
1.50	-	-	-	-	-	-
3.00	20.00	26.00	16.00	27.00	41.00	14.00
4.50	16.00	14.00	22.00	36.00	41.00	28.00
6.00	13.00	18.00	22.00	33.00	30.00	19.00
7.50	21.00	17.00	-	35.00	17.00	
9.00	24.00	14.00	24.00	42.00	27.00	26.00
10.50	28.00	28.00	26.00	-	51.00	27.00
12.00	35.00	32.00	18.00	48.00	37.00	21.00



Şekil 3. 3. SPT- N₃₀ darbe sayılarının derinlikle değişimi



Şekil 3. 4. Çalışma sahasında açılan temel sondaj kuyularının SPT-N₃₀ sonuçları a) SK-1 b) SK-2 c) SK-3 d) SK-4 e) SK-5 f) SK-6

Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularından alınan örselenmiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına (Tablo 3.2) göre; siltli kum ve çakıllı kumların su içerikleri % 9.13 – % 31.6 doğal birim hacim ağırlıkları (kN/m²) 18.51 – 18.79, kohezyon (kPa) 5.35 – 9.22 ve içsel sürtünme açısı, ϕ (°) 21 – 26 aralıklarında hesaplanmıştır.

Tablo 3. 2. Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularından elde edilen numunelerin laboratuvar deney sonuçları

Sondaj No.	Numune No	Derinlik (m)	Su İçeriği (%)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Hidrometre	Elek Analizi		Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı	Direk Kesme Deneyi (UU)	
							No 4 Kalan (%)	No 200 Geçen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)		c (kPa)	ϕ
SA-1	SPT	3,00-3,45	19,50	18,67	15,62	-	0,0	12,8		NP		SM	7,83	22
SA-1	SPT	7,50-7,95	19,70	-	-	-	0,0	19,0		NP		SM	-	-
SA-1	SPT	12,00-12,45	9,13	-	-	-	0,3	15,9		NP		SM	-	-
SA-2	SPT	4,50-4,95	17,40	18,51	15,77	-	0,0	20,6		NP		SM	7,96	21
SA-2	SPT	9,00-9,45	11,30	-	-	-	0,0	21,7		NP		SM	-	-
SA-2	SPT	15,00-15,45	21,40	-	-	-	0,6	13,7		NP		SM	-	-
SA-3	SPT	3,00-3,45	22,90	-	-	✓	0,0	13,3		NP		SM	-	-
SA-3	SPT	6,00-6,45	31,60	18,79	14,28	✓	0,9	11,8		NP		SP-SM	5,58	34
SA-3	SPT	9,00-9,45	24,50	-	-	-	2,0	7,0		NP		SP-SM	-	-
SA-3	SPT	12,00-12,45	21,00	-	-	-	1,0	7,2		NP		SP-SM	-	-
SA-4	SPT	3,00-3,45	24,90	18,63	14,92	-	0,0	11,2		NP		SW-SM	5,35	26
SA-4	SPT	7,50-7,95	25,10	-	-	-	0,0	8,5		NP		SW-SM	-	-
SA-4	SPT	15,00-15,45	24,00	-	-	-	0,0	15,2		NP		SM	-	-
SA-5	SPT	4,50-4,95	26,70	18,52	14,62	-	1,9	21,5		NP		SM	6,09	23
SA-5	SPT	9,00-9,45	25,10	-	-	-	3,1	22,6		NP		SM	-	-
SA-5	SPT	12,00-12,45	28,10	-	-	-	1,6	24,2		NP		SM	-	-
SA-6	SPT	3,00-3,45	13,40	-	-	✓	2,4	23,6		NP		SM	-	-
SA-6	SPT	6,00-6,45	15,00	18,70	16,26	✓	0,0	25,9		NP		SM	9,22	21
SA-6	SPT	9,00-9,45	13,90	18,60	16,33	✓	0,0	23,6		NP		SM	8,58	22
SA-6	SPT	12,00-12,45	27,90	-	-	-	0,0	5,8		NP		SP-SM	-	-

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında, sondaj sırasında yapılan standart penetrasyon deneyi (SPT) üzerine yapılan analizlerde, muhtemel sivilaşma beklenen çalışma sahasında tasarım deprem büyüklüğü 7.5, kısa periyot (0.2s) boyutsuz tasarım spektral ivme katsayısı (S_{Ds}) 1.192 ve maksimum yüzey ivmesi 0.597 g alınarak sivilaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Temel altı seviyesinde Standart Penetrasyon

Testine (SPT) göre düzeltilmiş ($N_{1,60}$) SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi Tablo 3.3’de ve yapılan analizlerde kullanılan diğer parametreler Tablo 3.4’de sunulmuştur. Bununla birlikte Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, zeminin kayma gerilmesi (τ_r) ve deprem kayma gerilmesi (τ_{deprem}) oranlanmasıyla Güvenlik Katsayıları (F_{SL}) elde edilmiştir.

Tablo 3. 3. Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre hesaplanmış $N_{1,60}$ verileri SK-1, SK-2, SK-3, SK-4, SK-5, SK-6

Derinlik(m)	SK-1	$N_{1,60}$	SK-2	$N_{1,60}$	SK-3	$N_{1,60}$	SK-4	$N_{1,60}$	SK-5	$N_{1,60}$	SK-6	$N_{1,60}$
3	20	23	26	28	16	17	27	34	41	52	14	18
4.5	16	18	14	15	22	24	36	46	41	54	28	36
6	13	13	18	20	22	24	33	41	30	38	19	24
7.5	21	19	17	17	22	22	35	39	17	19	19	21
9	24	19	14	13	24	22	42	43	27	28	26	27
10.5	28	21	28	26	26	24	42	42	51	52	27	27
12	35	25	32	28	18	16	48	45	37	35	21	20
13.5	35	23	32	27	18	15	48	43	37	33	21	19
15	35	22	32	25	18	14	48	40	37	31	21	18
Zemin sınıfı	ZD	21.87	ZD	22.78	ZD	21.12	ZD	45.84	ZD	38.36	ZD	24.54

Tablo 3. 4. Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularının a) SK-1, b) SK-2, c) SK-3, d) SK-4, e) SK-5, f) SK-6 SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analiz parametreleri

YASS 2.3m (a)											
ARAZİ DENEYLERİ											
Derinlik(m)	SK-1	$N_{1,60}$	C_N	C_R	C_S	C_B	C_E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	σ_{vo}'
3	20	23	1,52	0,75	1	1	1	15,3	18,65	48,2	41,4
4.5	16	18	1,34	0,85	1	1	1	15,3	18,65	76,2	53,7
6	13	13	1,08	0,95	1	1	1	15,3	18,65	104,2	81,6
7.5	21	19	0,93	0,95	1	1	1	15,3	18,65	132,2	109,6
9	24	19	0,83	0,95	1	1	1	15,3	18,65	160,1	137,6
10.5	28	21	0,76	1	1	1	1	15,3	18,65	188,1	165,6
12	35	25	0,70	1	1	1	1	15,3	18,65	216,1	193,5
13.5	35	23	0,66	1	1	1	1	15,3	18,65	244,1	221,5
15	35	22	0,62	1	1	1	1	15,3	18,65	272,0	249,5
YASS 3m (b)											
ARAZİ DENEYLERİ											
Derinlik(m)	SK-2	$N_{1,60}$	C_N	C_R	C_S	C_B	C_E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	σ_{vo}'
3	26	28	1,44	0,75	1	1	1	15,3	18,65	45,9	45,9
4.5	14	15	1,27	0,85	1	1	1	15,3	18,65	73,9	59,2
6	18	20	1,15	0,95	1	1	1	15,3	18,65	101,9	72,4
7.5	17	17	1,06	0,95	1	1	1	15,3	18,65	129,8	85,7
9	14	13	0,98	0,95	1	1	1	15,3	18,65	157,8	98,9
10.5	28	26	0,92	1	1	1	1	15,3	18,65	185,8	112,2
12	32	28	0,87	1	1	1	1	15,3	18,65	213,8	125,5
13.5	32	27	0,83	1	1	1	1	15,3	18,65	241,7	138,7
15	32	25	0,79	1	1	1	1	15,3	18,65	269,7	152,0

Tablo 3. 4. (devamı) Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularının a) SK-1, b) SK-2, c) SK-3, d) SK-4, e) SK-5, f) SK-6 SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analiz parametreleri

YASS 3m (c)											
ARAZİ DENEYLERİ											
Derinlik(m)	SK-3	N _{1,60}	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ _k	γ _d	σ _{vo}	σ _{vo'}
3	16	17	1,44	0,75	1	1	1	15,3	18,65	45,9	45,9
4.5	22	24	1,27	0,85	1	1	1	15,3	18,65	73,9	59,2
6	22	24	1,15	0,95	1	1	1	15,3	18,65	101,9	72,4
7.5	22	22	1,06	0,95	1	1	1	15,3	18,65	129,8	85,7
9	24	22	0,98	0,95	1	1	1	15,3	18,65	157,8	98,9
10.5	26	24	0,92	1	1	1	1	15,3	18,65	185,8	112,2
12	18	16	0,87	1	1	1	1	15,3	18,65	213,8	125,5
13.5	18	15	0,83	1	1	1	1	15,3	18,65	241,7	138,7
15	18	14	0,79	1	1	1	1	15,3	18,65	269,7	152,0

YASS 0.4m (d)											
ARAZİ DENEYLERİ											
Derinlik(m)	SK-4	N _{1,60}	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ _k	γ _d	σ _{vo}	σ _{vo'}
3	27	34	1,70	0,75	1	1	1	15,3	18,65	54,6	29,1
4.5	36	46	1,50	0,85	1	1	1	15,3	18,65	82,6	42,4
6	33	41	1,31	0,95	1	1	1	15,3	18,65	110,6	55,6
7.5	35	39	1,18	0,95	1	1	1	15,3	18,65	138,5	68,9
9	42	43	1,08	0,95	1	1	1	15,3	18,65	166,5	82,1
10.5	42	42	1,00	1	1	1	1	15,3	18,65	194,5	95,4
12	48	45	0,94	1	1	1	1	15,3	18,65	222,5	108,7
13.5	48	43	0,89	1	1	1	1	15,3	18,65	250,4	121,9
15	48	40	0,84	1	1	1	1	15,3	18,65	278,4	135,2

YASS 0 m (e)											
ARAZİ DENEYLERİ											
Derinlik(m)	SK-5	N _{1,60}	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ _k	γ _d	σ _{vo}	σ _{vo'}
3	41	52	1,70	0,75	1	1	1	15,3	18,65	56,0	26,5
4.5	41	54	1,55	0,85	1	1	1	15,3	18,65	83,9	39,8
6	30	38	1,34	0,95	1	1	1	15,3	18,65	111,9	53,0
7.5	17	19	1,20	0,95	1	1	1	15,3	18,65	139,9	66,3
9	27	28	1,10	0,95	1	1	1	15,3	18,65	167,9	79,6
10.5	51	52	1,02	1	1	1	1	15,3	18,65	195,8	92,8
12	37	35	0,95	1	1	1	1	15,3	18,65	223,8	106,1
13.5	37	33	0,90	1	1	1	1	15,3	18,65	251,8	119,3
15	37	31	0,85	1	1	1	1	15,3	18,65	279,8	132,6

Tablo 3. 4. (devamı) Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularının a) SK-1, b) SK-2, c) SK-3, d) SK-4, e) SK-5, f) SK-6 SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analiz parametreleri

YASS 0.3m (f)											
ARAZİ DENEYLERİ											
Derinlik(m)	SK-6	N _{1,60}	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	Y _k	Y _d	σ _{vo}	σ _{vo'}
3	14	18	1,70	0,75	1	1	1	15,3	18,65	54,9	28,5
4.5	28	36	1,51	0,85	1	1	1	15,3	18,65	82,9	41,7
6	19	24	1,32	0,95	1	1	1	15,3	18,65	110,9	55,0
7.5	19	21	1,18	0,95	1	1	1	15,3	18,65	138,9	68,2
9	26	27	1,08	0,95	1	1	1	15,3	18,65	166,8	81,5
10.5	27	27	1,00	1	1	1	1	15,3	18,65	194,8	94,8
12	21	20	0,94	1	1	1	1	15,3	18,65	222,8	108,0
13.5	21	19	0,89	1	1	1	1	15,3	18,65	250,8	121,3
15	21	18	0,84	1	1	1	1	15,3	18,65	278,7	134,5

Çalışma sahasında SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.43-1.06 aralıklarında (Tablo 3.5) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 4.50-10.5 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.43-1.06 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 4.50-9.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.40-0.56 aralıklarında (Tablo 3.6) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte yapılan analizlerde, bu alandaki zeminin Standart Penetrasyon Test SPT(N) direncinin 15-30 aralığında ve çok katı özellikte olması, alanda meydana gelebilecek 7.5 büyüklüğünde ve 0.597 g'lik bir depremde sıvılaşma riski olmayacağını göstermektedir.

Çalışma sahasında SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.30-0.79 aralıklarında (Tablo 3.8) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu derinliklerde sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. $N_{1,60f}$ değeri 30'dan büyük olduğundan sıvılaşma beklenmez.

Çalışma sahasında SK-5 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 4.50-7.50 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.41-0.68 aralıklarında, yaklaşık 10.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.12-0.70 aralıklarında (Tablo 3.9) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-5 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu derinliklerde sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında SK-6 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.00-7.50 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.55-0.71 aralıklarında, yaklaşık 12.00-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.51-0.53 aralıklarında, (Tablo 3.10) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-6 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 3. 5. Çalışma sahasında açılan SK-1 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 2.3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI			Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $F_{SL} = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$	
Derinlik(m)	SK-1	N _{1,60}	N _{1,60f}	α	β	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ _k	γ _d	σ _{vo}	σ _{vo'}	CRR _{M=7,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	16	18	22	2.74	1.05	16	1.32	0.85	1	1	1	15.3	18.65	76.2	54.6	0.24	1.0	12.98	0.97	22.81	0.57	Sıvılaşma Beklenir
6	13	15	18	2.74	1.05	16	1.19	0.95	1	1	1	15.3	18.65	104.2	67.9	0.19	1.0	13.16	0.95	30.81	0.43	Sıvılaşma Beklenir
7.5	21	22	26	2.74	1.05	16	1.09	0.95	1	1	1	15.3	18.65	132.2	81.2	0.30	1.0	24.60	0.94	38.61	0.64	Sıvılaşma Beklenir
9	24	23	27	2.74	1.05	16	1.01	0.95	1	1	1	15.3	18.65	160.1	94.4	0.34	1.0	31.71	0.93	46.21	0.69	Sıvılaşma Beklenir
10.5	28	26	31	2.74	1.05	16	0.94	1	1	1	1	15.3	18.65	188.1	107.7	0.51	1.0	54.97	0.89	52.10	1.06	Sıvılaşma Beklenir
12	35	31	36	2.74	1.05	16	0.89	1	1	1	1	15.3	18.65	216.1	120.9	-	1.0	--	-	-	-	Sıvılaşma Yok
13.5	35	30	34	2.74	1.05	16	0.84	1	1	1	1	15.3	18.65	244.1	134.2	7.80	1.0	1.046.61	0.81	61.54	17.01	Sıvılaşma Yok
15	35	28	32	2.74	1.05	16	0.81	1	1	1	1	15.3	18.65	272.0	147.5	0.87	1.0	128.93	0.77	65.22	1.98	Sıvılaşma Yok

Tablo 3. 6. Çalışma sahasında açılan SK-2 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI			Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $F_{SL} = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$	
Derinlik(m)	SK-2	N _{1,60}	N _{1,60f}	α	β	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	σ_{vo}'	CRR _{M=7,5}	C _M	τ_R	r_d	τ_{deprem}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	14	15	20	3.37	1.07	19	1.27	0.85	1	1	1	15.3	18.65	73.9	59.2	0.21	1.0	12.43	0.97	22.11	0.56	Sıvılaşma Beklenir
6	18	20	24	3.37	1.07	19	1.15	0.95	1	1	1	15.3	18.65	101.9	72.4	0.28	1.0	20.32	0.95	30.12	0.67	Sıvılaşma Beklenir
7.5	17	17	22	3.37	1.07	19	1.06	0.95	1	1	1	15.3	18.65	129.8	85.7	0.24	1.0	20.29	0.94	37.93	0.54	Sıvılaşma Beklenir
9	14	13	17	3.37	1.07	19	0.98	0.95	1	1	1	15.3	18.65	157.8	98.9	0.18	1.0	18.28	0.93	45.54	0.40	Sıvılaşma Beklenir
10.5	28	26	31	3.37	1.07	19	0.92	1	1	1	1	15.3	18.65	185.8	112.2	0.56	1.0	63.28	0.89	51.45	1.23	Sıvılaşma Yok
12	32	28	33	3.37	1.07	19	0.87	1	1	1	1	15.3	18.65	213.8	125.5	1.64	1.0	205.49	0.85	56.55	3.63	Sıvılaşma Yok
13.5	32	27	32	3.37	1.07	19	0.83	1	1	1	1	15.3	18.65	241.7	138.7	0.69	1.0	95.60	0.81	60.95	1.57	Sıvılaşma Yok
15	32	25	31	3.37	1.07	19	0.79	1	1	1	1	15.3	18.65	269.7	152.0	0.51	1.0	77.70	0.77	64.65	1.20	Sıvılaşma Yok

Tablo 3. 7. Çalışma sahasında açılan SK-3 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 3 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI			Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $F_{FSL} = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$	
Derinlik(m)	SK-3	N _{1,60}	N _{1,60f}	α	β	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	$\sigma_{vo'}$	CRR _{M=7,5}	C _M	τ_R	r_d	τ_{deprem}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	22	24	25	0.81	1.02	10	1.27	0.85	1	1	1	15.3	18.65	73.9	59.2	0.29	1.0	17.36	0.97	22.11	0.79	Sıvılaşma Beklenir
6	22	24	25	0.81	1.02	10	1.15	0.95	1	1	1	15.3	18.65	101.9	72.4	0.30	1.0	21.61	0.95	30.12	0.72	Sıvılaşma Beklenir
7.5	22	22	23	0.81	1.02	10	1.06	0.95	1	1	1	15.3	18.65	129.8	85.7	0.26	1.0	22.49	0.94	37.93	0.59	Sıvılaşma Beklenir
9	24	22	24	0.81	1.02	10	0.98	0.95	1	1	1	15.3	18.65	157.8	98.9	0.27	1.0	26.53	0.93	45.54	0.58	Sıvılaşma Beklenir
10.5	26	24	25	0.81	1.02	10	0.92	1	1	1	1	15.3	18.65	185.8	112.2	0.30	1.0	33.45	0.89	51.45	0.65	Sıvılaşma Beklenir
12	18	16	17	0.81	1.02	10	0.87	1	1	1	1	15.3	18.65	213.8	125.5	0.18	1.0	22.48	0.85	56.55	0.40	Sıvılaşma Beklenir
13.5	18	15	16	0.81	1.02	10	0.83	1	1	1	1	15.3	18.65	241.7	138.7	0.17	1.0	23.71	0.81	60.95	0.39	Sıvılaşma Beklenir
15	18	14	15	0.81	1.02	10	0.79	1	1	1	1	15.3	18.65	269.7	152.0	0.16	1.0	24.91	0.77	64.65	0.39	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 8. Çalışma sahasında açılan SK-4 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 0.4 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI			Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $F_{SL} = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$	
Derinlik(m)	SK-4	N _{1,60}	N _{1,60f}	α	β	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	$\sigma_{vo'}$	CRR _{M=7,5}	C _M	τ_R	r_d	τ_{deprem}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	36	46	49	1.43	1.03	12	1.50	0.85	1	1	1	15.3	18.65	82.6	42.4	0.29	1.0	12.23	0.97	24.71	0.49	Sıvılaşma Beklenir
6	33	41	44	1.43	1.03	12	1.31	0.95	1	1	1	15.3	18.65	110.6	55.6	0.22	1.0	12.06	0.95	32.69	0.37	Sıvılaşma Beklenir
7.5	35	39	42	1.43	1.03	12	1.18	0.95	1	1	1	15.3	18.65	138.5	68.9	0.18	1.0	12.12	0.94	40.47	0.30	Sıvılaşma Beklenir
9	42	43	46	1.43	1.03	12	1.08	0.95	1	1	1	15.3	18.65	166.5	82.1	0.25	1.0	20.46	0.93	48.05	0.43	Sıvılaşma Beklenir
10.5	42	42	45	1.43	1.03	12	1.00	1	1	1	1	15.3	18.65	194.5	95.4	0.23	1.0	22.25	0.89	53.86	0.41	Sıvılaşma Beklenir
12	48	45	48	1.43	1.03	12	0.94	1	1	1	1	15.3	18.65	222.5	108.7	0.28	1.0	30.06	0.85	58.85	0.51	Sıvılaşma Beklenir
13.5	48	43	45	1.43	1.03	12	0.89	1	1	1	1	15.3	18.65	250.4	121.9	0.24	1.0	29.35	0.81	63.14	0.46	Sıvılaşma Beklenir
15	48	40	43	1.43	1.03	12	0.84	1	1	1	1	15.3	18.65	278.4	135.2	0.20	1.0	27.39	0.77	66.74	0.41	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 9. Çalışma sahasında açılan SK-5 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 0 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI			Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $F_{SL} = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$	
Derinlik(m)	SK-5	N _{1,60}	N _{1,60f}	α	β	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	$\sigma_{vo'}$	CRR _{M=7,5}	C _M	τ_R	r_d	τ_{deprem}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	41	54	63	4.03	1.10	23	1.55	0.85	1	1	1	15.3	18.65	83.9	39.8	0.43	1.0	17.13	0.97	25.11	0.68	Sıvılaşma Beklenir
6	30	38	46	4.03	1.10	23	1.34	0.95	1	1	1	15.3	18.65	111.9	53.0	0.25	1.0	13.45	0.95	33.09	0.41	Sıvılaşma Beklenir
7.5	17	19	25	4.03	1.10	23	1.20	0.95	1	1	1	15.3	18.65	139.9	66.3	0.30	1.0	19.80	0.94	40.86	0.48	Sıvılaşma Beklenir
9	27	28	35	4.03	1.10	23	1.10	0.95	1	1	1	15.3	18.65	167.9	79.6	-0.83	1.0	-	0.93	48.44	-	Sıvılaşma Yok
10.5	51	52	61	4.03	1.10	23	1.02	1	1	1	1	15.3	18.65	195.8	92.8	0.41	1.0	37.96	0.89	54.24	0.70	Sıvılaşma Beklenir
12	37	35	43	4.03	1.10	23	0.95	1	1	1	1	15.3	18.65	223.8	106.1	0.20	1.0	20.69	0.85	59.21	0.35	Sıvılaşma Beklenir
13.5	37	33	40	4.03	1.10	23	0.90	1	1	1	1	15.3	18.65	251.8	119.3	0.14	1.0	16.57	0.81	63.48	0.26	Sıvılaşma Beklenir
15	37	31	39	4.03	1.10	23	0.85	1	1	1	1	15.3	18.65	279.8	132.6	0.06	1.0	8.11	0.77	67.06	0.12	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 10. Çalışma sahasında açılan SK-6 sondaj kuyusu için, yer altı su seviyesi (YASS) 0.3 metrede SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI			Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $F_{SL} = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$	
Derinlik(m)	SK-6	N _{1,60}	N _{1,60f}	α	β	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	γ_k	γ_d	σ_{vo}	$\sigma_{vo'}$	CRR _{M=7,5}	C _M	τ_R	r_d	τ_{deprem}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	28	36	42	3.57	1.08	20	1.51	0.85	1	1	1	15.3	18.65	82.9	41.7	0.19	1.0	7.93	0.97	24.81	0.32	Sıvılaşma Yok
6	19	24	29	3.57	1.08	20	1.32	0.95	1	1	1	15.3	18.65	110.9	55.0	0.42	1.0	23.15	0.95	32.79	0.71	Sıvılaşma Beklenir
7.5	19	21	27	3.57	1.08	20	1.18	0.95	1	1	1	15.3	18.65	138.9	68.2	0.33	1.0	22.34	0.94	40.57	0.55	Sıvılaşma Beklenir
9	26	27	32	3.57	1.08	20	1.08	0.95	1	1	1	15.3	18.65	166.8	81.5	0.86	1.0	70.15	0.93	48.15	1.46	Sıvılaşma Yok
10.5	27	27	33	3.57	1.08	20	1.00	1	1	1	1	15.3	18.65	194.8	94.8	1.07	1.0	101.41	0.89	53.96	1.88	Sıvılaşma Yok
12	21	20	25	3.57	1.08	20	0.94	1	1	1	1	15.3	18.65	222.8	108.0	0.29	1.0	31.22	0.85	58.94	0.53	Sıvılaşma Beklenir
13.5	21	19	24	3.57	1.08	20	0.89	1	1	1	1	15.3	18.65	250.8	121.3	0.27	1.0	32.45	0.81	63.23	0.51	Sıvılaşma Beklenir
15	21	18	23	3.57	1.08	20	0.84	1	1	1	1	15.3	18.65	278.7	134.5	0.25	1.0	33.83	0.77	66.82	0.51	Sıvılaşma Beklenir

3.4.2. Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizi

İnceleme alanında uygulanan sismik ölçüler, sahayı en iyi yansıtacak şekilde ve arazi topografyasına uygun serim yönleri seçilerek eğime paralel olarak uygulanmıştır. Sismik serim noktaları profil doğrultuları Şekil 3.5’de verilmiştir. Arazi çalışmasında, jeofon (alıcı) aralıkları 2 adet 3 metre olarak ve offset uzaklığı -3.6 ve 36.42 metre uzak atışlar yapılarak toplam serim uzunlukları 36 ve 42 metre olarak uygulanmıştır. Böylece, ortalama 8 ve 18 metreye kadar olan derinliklerin araştırılması hedeflenmiştir. Sismik ölçüler, karşılıklı atış şeklinde uygulanarak, hem P ve hem de S dalgaları ayrı ayrı ölçülmüştür. Şekil 3.6a Şekil 3.6b’de Sismik serim-1 (MASW-1) Şekil 3.7b’de (MASW-2) Sismik Serim-2 için elde edilen S dalga hızının derinlikle değişimi gösterilmiştir. Tablo 3.11 ve Tablo 3.12’de ise sismik P ve S hızlarından hesaplanan parametrelerin ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 3. 5. İnceleme alanındaki ölçüm alınmış sismik profillerin Google Earth üzerinde gösterimi

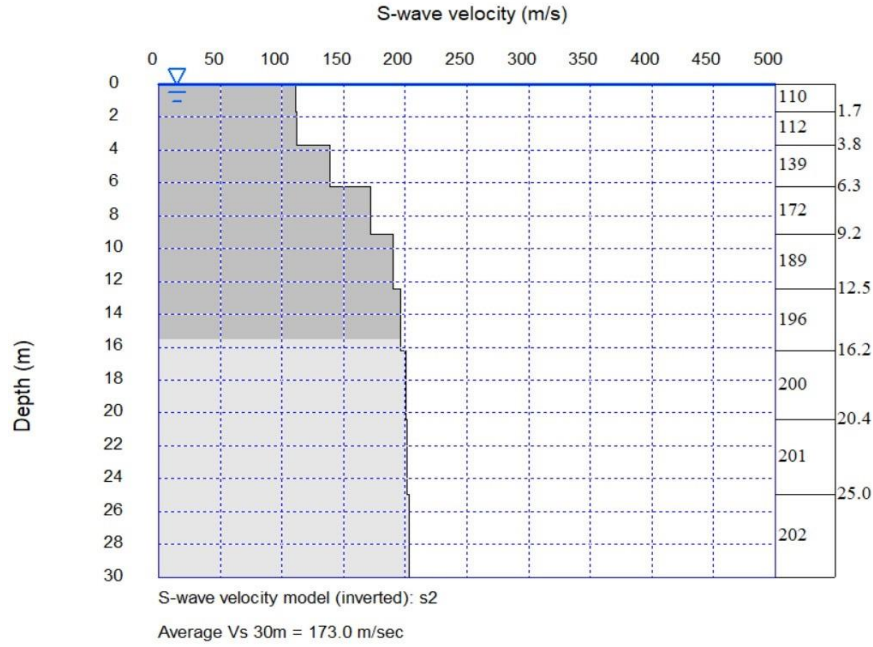
Tablo 3. 11. Sismik profil-1 ölçüm sonuçları

PARAMETRELER	1. TABAKA	2. TABAKA
Hız (V_p) (m/sn)	560	623
Hız (V_s) (m/sn)	118	170
Kalınlık (H) (m)	5.38	-
Hız Oranı	4.75	3.66
Poisson Oranı	0.48	0.46
Yoğunluk (gr/cm^3)	1.71	1.72
Kayma Modülü (kg/cm^2)	238.38	498.41
Elastisite Modülü (kg/cm^2)	704.06	1455.13
Sıkışmazlık (kg/cm^2)	5050.99	6029.13
Sökülebilirlik Derecesi	Çok kolay	Çok kolay
Yatak Katsayısı (ton/m^3)	623.99	1172.73
V_{s30} (m/sn)	157.55	

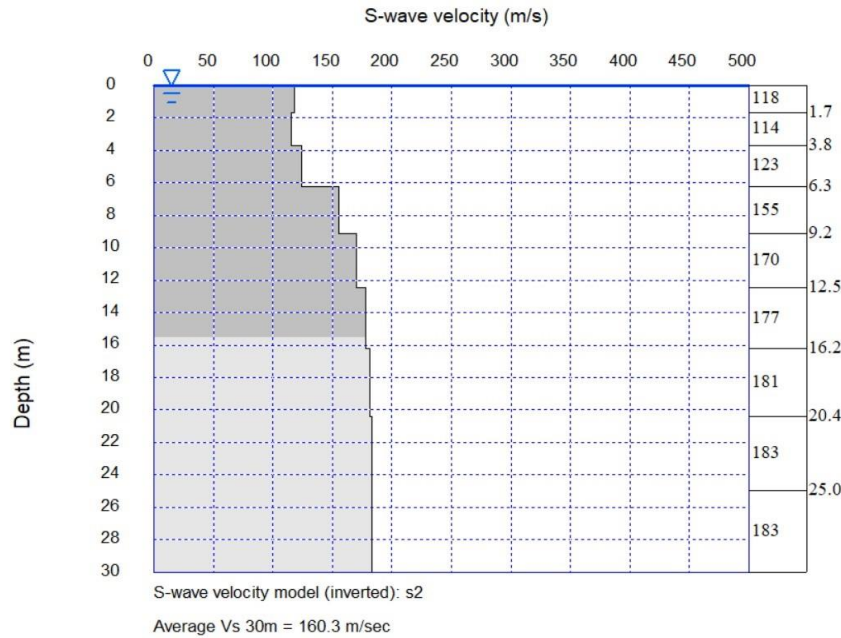
Tablo 3. 12. Sismik profil-2 ölçüm sonuçları

PARAMETRELER	1. TABAKA	2. TABAKA
Hız (V_p) (m/sn)	549	636
Hız (V_s) (m/sn)	110	196
Kalınlık (H) (m)	5.96	-
Hız Oranı	4.99	3.24
Poisson Oranı	0.48	0.45
Yoğunluk (gr/cm^3)	1.71	1.73
Kayma Modülü (kg/cm^2)	206.89	663.52
Elastisite Modülü (kg/cm^2)	612.00	1920.93
Sıkışmazlık (kg/cm^2)	4877.51	6101.76
Sökülebilirlik Derecesi	Çok kolay	Çok kolay
Yatak Katsayısı (ton/m^3)	489.12	1354.12
V_{s30} (m/sn)	169.65	

Değerlendirmelerden elde edilen sismik hızlar (Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b) P dalga hızı (V_p) 549-560 m/sn, S dalga hızı (V_s) ise 110-118 m/sn aralığındadır. Derinlere inildikçe elde edilen hız değerlerine göre ortam daha da sıkılaştığı tespit edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. 6. a) Sismik serim-1 b) Sismik serim-2 için elde edilen S dalga hızının derinlikle değişimi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY,2018) kapsamında, kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan analizlerde, muhtemel sıvılaşma beklenen çalışma sahasında 7.5 deprem büyüklüğü ve maksimum yüzey ivmesi 0.597 g alınarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kayma dalga hızı (V_s)'ye göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, zeminin sıvılaşmaya karşı devirsel direnç oranı (CRR) ile depremden kaynaklanan devirsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ve Güvenlik Koşulu (F_{SL}) hesaplanmıştır. Tablo 3.13'de görüldüğü üzere; inceleme alanında yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen (V_s)₃₀ değerleri 159.7-172.4 m/sn olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. 13. Kayma dalgası hızı ve (V_{s30}) verileri

MASW-1				MASW-2			
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	$V_{s,i}(m/sn)$	$h_i/V_{s,i}(m/sn)$	Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	$V_{s,i}(m/sn)$	$h_i/V_{s,i}(m/sn)$
0	1.7	118	0.0144	0	1.7	110	0.0155
1.7	2.1	114	0.0184	1.7	2.1	112	0.0188
3.8	2.5	123	0.0203	3.8	2.5	139	0.0180
6.3	2.9	155	0.0187	6.3	2.9	172	0.0169
9.2	3.3	170	0.0194	9.2	3.3	189	0.0175
12.5	3.7	177	0.0209	12.5	3.7	196	0.0189
16.2	4.2	181	0.0232	16.2	4.2	200	0.0210
20.4	4.6	183	0.0251	20.4	4.6	201	0.0229
25	5	183	0.0273	25	5	202	0.0248
30				30			
$\sum h_i/V_{s,i}(m/sn)$			0.1878	$\sum h_i/V_{s,i}(m/sn)$			0.1740
Zemin Sınıfı	ZE	(V_s) ₃₀	159.7	Zemin Sınıfı	ZE	(V_s) ₃₀	172.4

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-1 (MASW-1-SK-1) için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.17-0.20 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.14). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2 (MASW-2-SK-1) için yaklaşık 4.5-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.24-0.35 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.15). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-1(MASW-1-SK-2) için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.18-0.21 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.16).

Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2(MASW-2-SK-2) için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.26-0.34 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.17). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-1 (MASW-1-SK-3) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.17-0.20 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.18). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2(MASW-2-SK-3) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0,24-0,31 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.19). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-1(MASW-1-SK-4) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) 0.14-0.19 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.20). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2(MASW-2-SK-4) için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.22-0.36 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.21). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2(MASW-2-SK-4) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.15-0.21 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.22). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2(MASW-2-SK-5) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.26-0.60 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.23). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-1(MASW-1-SK-6) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.15-0.21 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.24). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2 (MASW-2-SK-6) için yaklaşık 4.50-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.26-0.55 aralığında hesaplanmıştır (Tablo 3.25). Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 3. 14. Çalışma sahasında sismik profil-1 (MASW-1- SK-1) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-1																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r _d	PA (kPa)	SK-1 (σ _{vo})	SK-1 (σ _{vo'})	σ _{vo} /σ _{vo'}	V _{S,i} (m/sn)	CV (P _A /σ _{vo'}) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS ₁ * (m/sn)	CSR (0,65.(σ _{vo} /σ _{vo'}). PGA _(g) /g.r _d	CRR _{M=7,5}	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	16	0.97	100	76.22	54.638	1.39	131.96	1.16	153.49	209.55	0.52	0.09	0.17	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	16	0.95	100	104.20	67.898	1.53	151.16	1.10	166.52	209.55	0.57	0.11	0.20	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	16	0.94	100	132.17	81.158	1.63	161.20	1.05	169.84	209.55	0.60	0.12	0.20	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	16	0.93	100	160.15	94.418	1.70	168.96	1.01	171.40	209.55	0.61	0.12	0.20	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	16	0.89	100	188.12	107.678	1.75	172.75	0.98	169.58	209.55	0.61	0.12	0.20	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	16	0.85	100	216.10	120.938	1.79	175.94	0.95	167.77	209.55	0.59	0.12	0.20	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	16	0.81	100	244.07	134.198	1.82	175.94	0.93	163.47	209.55	0.57	0.11	0.18	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	16	0.77	100	272.05	147.458	1.84	175.94	0.91	159.66	209.55	0.55	0.10	0.18	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 15. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-1) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-2																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r _d	PA (kPa)	SK-1 (σ _{vo})	SK-1 (σ _{vo'})	σ _{vo} /σ _{vo'}	V _{S,i} (m/sn)	CV (P _A /σ _{vo'}) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS ₁ * (m/sn)	CSR (0,65.(σ _{vo} /σ _{vo'}). PGA _(g) /g.r _d	CRR M=7,5	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	16	0.97	100	76.22	54.638	1.39	148.24	1.16	172.42	209.55	0.52	0.13	0.24	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	16	0.95	100	104.20	67.898	1.53	168.04	1.10	185.12	209.55	0.57	0.18	0.31	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	16	0.94	100	132.17	81.158	1.63	179.03	1.05	188.62	209.55	0.60	0.20	0.33	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	16	0.93	100	160.15	94.418	1.70	187.83	1.01	190.55	209.55	0.61	0.21	0.35	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	16	0.89	100	188.12	107.678	1.75	191.76	0.98	188.25	209.55	0.61	0.20	0.32	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	16	0.85	100	216.10	120.938	1.79	195.05	0.95	186.00	209.55	0.59	0.18	0.31	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	16	0.81	100	244.07	134.198	1.82	195.05	0.93	181.22	209.55	0.57	0.16	0.27	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	16	0.77	100	272.05	147.458	1.84	195.05	0.91	177.00	209.55	0.55	0.14	0.26	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 16. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-2) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-2 (σ_{vo})	SK-2 (σ_{vo}')	σ_{vo}/σ_{vo}'	$V_{s,i}(m/sn)$	CV (P_A/σ_{vo}') ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR (0,65.(σ_{vo}/σ_{vo}'). PGA(g)/g. r_d	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	19	0.97	100	73.88	59.16	1.25	131.96	1.14	150.46	208.17	0.47	0.08	0.18	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	19	0.95	100	101.85	72.42	1.41	151.16	1.08	163.86	208.17	0.52	0.11	0.21	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	19	0.94	100	129.83	85.68	1.52	161.20	1.04	167.55	208.17	0.55	0.12	0.21	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	19	0.93	100	157.80	98.94	1.59	168.96	1.00	169.41	208.17	0.58	0.12	0.21	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	19	0.89	100	185.78	112.2	1.66	172.75	0.97	167.85	208.17	0.57	0.12	0.21	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	19	0.85	100	213.75	125.46	1.70	175.94	0.94	166.24	208.17	0.56	0.11	0.20	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	19	0.81	100	241.73	138.72	1.74	175.94	0.92	162.12	208.17	0.55	0.11	0.19	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	19	0.77	100	269.70	151.98	1.77	175.94	0.90	158.46	208.17	0.53	0.10	0.18	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 17. Çalışma sahasında sismik profil-2(MASW-2- SK-2) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-2																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-2 (σ_{vo})	SK-2 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{s,i}$ (m/sn)	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR ($0,65 \cdot (\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}) \cdot$ $PGA(g)/g \cdot r_d$	CRR_M =7,5	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	19	0.97	100	73.88	59.16	1.25	148.24	1.14	169.03	208.17	0.47	0.12	0.26	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	19	0.95	100	101.85	72.42	1.41	168.04	1.08	182.16	208.17	0.52	0.17	0.32	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	19	0.94	100	129.83	85.68	1.52	179.03	1.04	186.08	208.17	0.55	0.19	0.34	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	19	0.93	100	157.80	98.94	1.59	187.83	1.00	188.33	208.17	0.58	0.21	0.36	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	19	0.89	100	185.78	112.2	1.66	191.76	0.97	186.32	208.17	0.57	0.19	0.33	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	19	0.85	100	213.75	125.46	1.70	195.05	0.94	184.30	208.17	0.56	0.18	0.32	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	19	0.81	100	241.73	138.72	1.74	195.05	0.92	179.73	208.17	0.55	0.16	0.28	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	19	0.77	100	269.70	151.98	1.77	195.05	0.90	175.67	208.17	0.53	0.14	0.26	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 18. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-3) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-1																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-3 (σ_{vo})	SK-3 (σ_{vo}')	σ_{vo}/σ_{vo}'	$V_{S,i}$ (m/sn)	CV (PA/σ_{vo}') ^{0.25}	VS_i (m/sn)	VS_i^* (m/sn)	CSR ($0,65 \cdot (\sigma_{vo}/\sigma_{vo}') \cdot$ $PGA(g)/g \cdot r_d$)	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	10	0.97	100	73.88	59.16	1.25	131.96	1.14	150.46	212.59	0.47	0.08	0.17	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	10	0.95	100	101.85	72.42	1.41	151.16	1.08	163.86	212.59	0.52	0.10	0.20	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	10	0.94	100	129.83	85.68	1.52	161.20	1.04	167.55	212.59	0.55	0.11	0.20	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	10	0.93	100	157.80	98.94	1.59	168.96	1.00	169.41	212.59	0.58	0.11	0.20	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	10	0.89	100	185.78	112.2	1.66	172.75	0.97	167.85	212.59	0.57	0.11	0.19	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	10	0.85	100	213.75	125.5	1.70	175.94	0.94	166.24	212.59	0.56	0.11	0.19	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	10	0.81	100	241.73	138.7	1.74	175.94	0.92	162.12	212.59	0.55	0.10	0.18	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	10	0.77	100	269.70	152	1.77	175.94	0.90	158.46	212.59	0.53	0.09	0.18	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 19. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-3) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-2																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-3 (σ_{vo})	SK-3 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{s,i}$ (m/sn)	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR (0,65.($\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$). PGA(g)/g. r_d	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	10	0.97	100	73.88	59.16	1.25	148.24	1.14	169.03	212.59	0.47	0.11	0.24	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	10	0.95	100	101.85	72.42	1.41	168.04	1.08	182.16	212.59	0.52	0.15	0.29	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	10	0.94	100	129.83	85.68	1.52	179.03	1.04	186.08	212.59	0.55	0.17	0.30	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	10	0.93	100	157.80	98.94	1.59	187.83	1.00	188.33	212.59	0.58	0.18	0.31	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	10	0.89	100	185.78	112.2	1.66	191.76	0.97	186.32	212.59	0.57	0.17	0.30	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	10	0.85	100	213.75	125.46	1.70	195.05	0.94	184.30	212.59	0.56	0.16	0.28	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	10	0.81	100	241.73	138.72	1.74	196.05	0.92	180.65	212.59	0.55	0.15	0.27	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	10	0.77	100	269.70	151.98	1.77	197.05	0.90	177.47	212.59	0.53	0.14	0.26	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 20. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-4) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-1																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-4 (σ_{vo})	SK-4 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{S,i}$ (m/sn)	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR ($0,65 \cdot (\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}) \cdot$ PGA(g)/g. r_d)	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	12	0.97	100	82.59	42.364	1.95	131.96	1.24	163.57	211.68	0.73	0.10	0.14	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	12	0.95	100	110.56	55.624	1.99	151.16	1.16	175.03	211.68	0.74	0.13	0.18	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	12	0.94	100	138.54	68.884	2.01	161.20	1.10	176.94	211.68	0.74	0.14	0.19	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	12	0.93	100	166.51	82.144	2.03	168.96	1.05	177.48	211.68	0.73	0.14	0.19	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	12	0.89	100	194.49	95.404	2.04	172.75	1.01	174.79	211.68	0.71	0.13	0.18	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	12	0.85	100	222.46	108.66	2.05	175.94	0.98	172.32	211.68	0.68	0.12	0.18	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	12	0.81	100	250.44	121.92	2.05	176.94	0.95	168.39	211.68	0.65	0.11	0.18	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	12	0.77	100	278.41	135.18	2.06	177.94	0.93	165.02	211.68	0.62	0.11	0.17	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 21. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-4) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-2																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-4 (σ_{vo})	SK-4 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{s,i}(\text{m/sn})$	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR ($0,65 \cdot (\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}) \cdot$ $PGA_{(g)}/g \cdot r_d$)	$CRR_{M=7,5}$	F _{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	12	0.97	100	82.59	42.36	1.95	148.24	1.24	183.75	211.68	0.73	0.16	0.22	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	12	0.95	100	110.56	55.62	1.99	168.04	1.16	194.58	211.68	0.74	0.23	0.32	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	12	0.94	100	138.54	68.88	2.01	179.03	1.10	196.52	211.68	0.74	0.26	0.35	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	12	0.93	100	166.51	82.14	2.03	187.83	1.05	197.30	211.68	0.73	0.27	0.36	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	12	0.89	100	194.49	95.4	2.04	191.76	1.01	194.03	211.68	0.71	0.23	0.32	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	12	0.85	100	222.46	108.7	2.05	195.05	0.98	191.04	211.68	0.68	0.20	0.30	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	12	0.81	100	250.44	121.9	2.05	196.05	0.95	186.57	211.68	0.65	0.17	0.27	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	12	0.77	100	278.41	135.2	2.06	197.05	0.93	182.74	211.68	0.62	0.16	0.25	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 22. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-5) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-1																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-5 (σ_{vo})	SK-5 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{S,i}$ (m/sn)	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR (0,65.($\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$). PGA(g)/g. r_d	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	23	0.97	100	83.93	39.78	2.11	131.96	1.26	166.16	206.12	0.79	0.12	0.15	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	23	0.95	100	111.90	53.04	2.11	151.16	1.17	177.13	206.12	0.78	0.15	0.19	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	23	0.94	100	139.88	66.3	2.11	161.20	1.11	178.64	206.12	0.77	0.16	0.21	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	23	0.93	100	167.85	79.56	2.11	168.96	1.06	178.90	206.12	0.76	0.16	0.21	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	23	0.89	100	195.83	92.82	2.11	172.75	1.02	176.00	206.12	0.73	0.15	0.20	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	23	0.85	100	223.80	106.1	2.11	175.94	0.99	173.36	206.12	0.70	0.14	0.20	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	23	0.81	100	251.78	119.3	2.11	176.94	0.96	169.29	206.12	0.67	0.13	0.19	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	23	0.77	100	279.75	132.6	2.11	177.94	0.93	165.82	206.12	0.63	0.12	0.18	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 23. Çalışma sahasında sismik profil-2(MASW-2- SK-5) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-2																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-5 (σ_{vo})	SK-5 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{s,i}(m/sn)$	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR ($0,65 \cdot (\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}) \cdot$ PGA(g)/g. r_d)	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	23	0.97	100	83.93	39.78	2.11	148.24	1.26	186.66	206.12	0.79	0.21	0.26	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	23	0.95	100	111.90	53.04	2.11	168.04	1.17	196.91	206.12	0.78	0.38	0.48	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	23	0.94	100	139.88	66.3	2.11	179.03	1.11	198.40	206.12	0.77	0.44	0.56	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	23	0.93	100	167.85	79.56	2.11	187.83	1.06	198.88	206.12	0.76	0.46	0.60	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	23	0.89	100	195.83	92.82	2.11	191.76	1.02	195.37	206.12	0.73	0.33	0.45	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	23	0.85	100	223.80	106.08	2.11	195.05	0.99	192.19	206.12	0.70	0.27	0.38	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	23	0.81	100	251.78	119.34	2.11	196.05	0.96	187.57	206.12	0.67	0.21	0.32	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	23	0.77	100	279.75	132.6	2.11	197.05	0.93	183.63	206.12	0.63	0.19	0.29	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 24. Çalışma sahasında sismik profil-1(MASW-1- SK-6) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-1																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-6 (σ_{vo})	SK-6 (σ_{vo}')	σ_{vo}/σ_{vo}'	$V_{s,i}$ (m/sn)	CV (P_A/σ_{vo}') ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR (0,65.(σ_{vo}/σ_{vo}'). PGA(g)/g. r_d	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	23	0.97	100	82.92	41.72	1.99	131.96	1.24	164.20	206.12	0.74	0.11	0.15	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	23	0.95	100	110.90	54.98	2.02	151.16	1.16	175.55	206.12	0.75	0.15	0.20	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	23	0.94	100	138.87	68.24	2.04	161.20	1.10	177.36	206.12	0.74	0.15	0.21	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	23	0.93	100	166.85	81.5	2.05	168.96	1.05	177.83	206.12	0.74	0.15	0.21	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	23	0.89	100	194.82	94.76	2.06	172.75	1.01	175.09	206.12	0.71	0.14	0.20	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	23	0.85	100	222.80	108	2.06	175.94	0.98	172.58	206.12	0.68	0.14	0.20	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	23	0.81	100	250.77	121.3	2.07	176.94	0.95	168.61	206.12	0.65	0.12	0.19	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	23	0.77	100	278.75	134.5	2.07	177.94	0.93	165.22	206.12	0.62	0.11	0.18	Sıvılaşma Beklenir

Tablo 3. 25. Çalışma sahasında sismik profil-2 (MASW-2- SK-6) için kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

MASW-2																
Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı(m)	PGA(g)	IDI (%)	r_d	PA (kPa)	SK-6 (σ_{vo})	SK-6 ($\sigma_{vo'}$)	$\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}$	$V_{s,i}(\text{m/sn})$	CV ($P_A/\sigma_{vo'}$) ^{0.25}	VS_1 (m/sn)	VS_1^* (m/sn)	CSR ($0,65 \cdot (\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}) \cdot$ $PGA(g)/g \cdot r_d$)	$CRR_{M=7,5}$	F_{SL}	Sıvılaşma Potansiyeli
4.5	1.5	0.597	23	0.97	100	82.92	41.72	1.99	148.24	1.24	184.45	206.12	0.74	0.19	0.26	Sıvılaşma Beklenir
6	1.5	0.597	23	0.95	100	110.90	54.98	2.02	168.04	1.16	195.15	206.12	0.75	0.33	0.44	Sıvılaşma Beklenir
7.5	1.5	0.597	23	0.94	100	138.87	68.24	2.04	179.03	1.10	196.98	206.12	0.74	0.38	0.51	Sıvılaşma Beklenir
9	1.5	0.597	23	0.93	100	166.85	81.5	2.05	187.83	1.05	197.69	206.12	0.74	0.40	0.55	Sıvılaşma Beklenir
10.5	1.5	0.597	23	0.89	100	194.82	94.76	2.06	191.76	1.01	194.36	206.12	0.71	0.31	0.43	Sıvılaşma Beklenir
12	1.5	0.597	23	0.85	100	222.80	108	2.06	195.05	0.98	191.33	206.12	0.68	0.26	0.38	Sıvılaşma Beklenir
13.5	1.5	0.597	23	0.81	100	250.77	121.3	2.07	196.05	0.95	186.82	206.12	0.65	0.21	0.32	Sıvılaşma Beklenir
15	1.5	0.597	23	0.77	100	278.75	134.5	2.07	197.05	0.93	182.96	206.12	0.62	0.18	0.29	Sıvılaşma Beklenir

3.4.3. Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksine (Ls) dayalı sıvılaşma analizi

İnceleme alanında yapılan hesaplamalardan elde edilen analiz sonuçlarına göre; (Tablo 3.26); sıvılaşabilen tüm tabakalarda, F_{SL} güvenlik faktörünün 1.10'den küçük olması sebebiyle sıvılaşma potansiyelinin araştırıldığı temel altındaki zeminde, sıvılaşma güvenliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak bu aşamadan sonra, sıvılaşma güvenliğinin olmadığı kesin olarak belirlenen bu ortamda, yapılarda oluşabilecek hasarın etkilerinin ve sıvılaşma olasılığının derecesini belirlemek için elde edilen güvenlik faktörlerinden faydalanarak; Sıvılaşma potansiyeli indeksi ve sıvılaşma risk indeksi değerlerinin hesaplanması gerekmektedir.

İnceleme alanında SK-1 sondaj kuyusunda 15 metre derinlik için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI = 24$ değeri, Tablo 3.26 'da verilen kriterlere göre $LI \geq 15$ durumuna karşı 'Çok Yüksek' hasar seviyesinde olması; sıvılaşma potansiyelinin yapıda önemli hasarlara sebep olabileceğini gösterir. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) hesaplama sonucu $\sum Ls=45$ Tablo 3.26 'da verilen kriterlere göre $Ls \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının 'Orta' derecede olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında SK-2 sondaj kuyusunda 15 metre derinlik için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI=18$ değeri, Tablo 3.27'de verilen kriterlere göre $LI \geq 15$ durumuna karşı 'Çok Yüksek' hasar seviyesinde olması; sıvılaşma potansiyelinin yapıda önemli hasarlara sebep olabileceği belirlenmiştir. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) hesaplama sonucu $\sum Ls=36$ Tablo 3.27'de verilen kriterlere göre $Ls \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının 'Orta' derecede olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında SK-3 sondaj kuyusunda 15 metre derinlik için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI = 29$ değeri, Tablo 3.28 'de verilen kriterlere göre $LI \geq 15$ durumuna karşı 'Çok Yüksek' hasar seviyesinde olması; sıvılaşma potansiyelinin yapıda önemli hasarlara sebep olacaktır. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) hesaplama sonucu $\sum Ls=64$ Tablo 3.28'de verilen kriterlere göre $Ls \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının 'Orta' derecede olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında SK-4 sondaj kuyusunda 15 metre derinlik için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI = 40$ değeri. Tablo 3.29 'da verilen kriterlere göre $LI \geq 15$ durumuna karşı 'Çok Yüksek' hasar seviyesinde olması; sıvılaşma potansiyelinin yapıda

önemli hasarlara sebep olacaktır. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) hesaplama sonucu $\sum Ls = 60$ Tablo 3.29 'da verilen kriterlere göre $Ls \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının 'Orta' derecede olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında SK-5 sondaj kuyusunda 15 metre derinlik için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI = 29$ değeri. Tablo 3.30'da verilen kriterlere göre $LI \geq 15$ durumuna karşı 'Çok Yüksek' hasar seviyesinde olması; sıvılaşma potansiyelinin yapıda önemli hasarlara sebep olacaktır. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) hesaplama sonucu $\sum Ls=60$ Tablo 3.30'da verilen kriterlere göre $Ls \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının 'Orta' derecede olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında SK-6 sondaj kuyusunda 15 metre derinlik için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI=26$ değeri. Tablo 3.31'de verilen kriterlere göre $LI \geq 15$ durumuna karşı 'Çok Yüksek' hasar seviyesinde kalmakta olup; sıvılaşma potansiyelinin yapıda önemli hasarlara sebep olacaktır. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) hesaplama sonucu $\sum Ls=55$ Tablo 3.31'de verilen kriterlere göre $Ls \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının 'Orta' derecede olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. 26. SK-1 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri

SK-1	Sıvılaşma Potansiyeli							
Iwasaki ve ark., [1982]					Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]			
Derinlik (m)	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı, m	W(z) (10-0,5*z)	F(z) (1-F _{SL})	Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi, LI	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı, m	W(z) (10-0,5*z)	P _L (z) (1/(1+(F _{SL} /0,96) ^{4,5}))	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi, L _s
3	1.50	8.50	0.06	0.77	1.50	8.50	0.52	6.68
4.5	1.50	7.75	0.43	5.01	1.50	7.75	0.91	10.61
6	1.50	7.00	0.57	6.02	1.50	7.00	0.97	10.23
7.5	1.50	6.25	0.36	3.40	1.50	6.25	0.86	8.09
9	1.50	5.50	0.31	2.59	1.50	5.50	0.82	6.76
10.5	1.50	4.75	-	-	1.50	4.75	0.40	2.82
12	1.50	4.00	1.00	6.00	1.50	4.00	0.00	0.00
13.5	1.50	3.25	-	-	1.50	3.25	0.00	0.00
15	1.50	2.50	-	-	1.50	2.50	0.00	0.00
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Yüksek		LI =	24	Sıvılaşma Şiddeti	Orta	LS =	45

Tablo 3. 27. SK-2 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri

SK-2	Sıvılaşma Potansiyeli							
Iwasaki ve ark., [1982]					Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]			
Derinlik (m)	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı, m	W(z) (10-0,5*z)	F(z) (1-F _{SL})	Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi, LI	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı, m	W(z) (10-0,5*z)	P _L (z) (1/(1+(F _{SL} /0,96) ^{4,5}))	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi, L _s
3	1.50	8.50	-	-	1.50	8.50	0.00	0.00
4.5	1.50	7.75	0.44	5.09	1.50	7.75	0.92	10.67
6	1.50	7.00	0.33	3.42	1.50	7.00	0.83	8.72
7.5	1.50	6.25	0.46	4.36	1.50	6.25	0.93	8.75
9	1.50	5.50	0.60	4.94	1.50	5.50	0.98	8.09
10.5	1.50	4.75	-	-	1.50	4.75	0.00	0.00
12	1.50	4.00	-	-	1.50	4.00	0.00	0.00
13.5	1.50	3.25	-	-	1.50	3.25	0.00	0.00
15	1.50	2.50	-	-	1.50	2.50	0.00	0.00
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Yüksek		LI =	18	Sıvılaşma Şiddeti	Orta	LS =	36

Tablo 3. 28. SK-3 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri

SK-3	Sıvılaşma Potansiyeli (Sondaj Noktalarındaki)							
Iwasaki ve ark., [1982]					Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]			
Derinlik (m)	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı, m	W(z) (10-0,5*z)	F(z) (1-F _{SL})	Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi, LI	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı, m	W(z) (10-0,5*z)	P _L (z) (1/(1+(F _{SL} /0,96) ^{4,5}))	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi, L _s
3	1.50	8.50	0.35	4.44	1.50	8.50	0.85	10.85
4.5	1.50	7.75	0.21	2.50	1.50	7.75	0.71	8.27
6	1.50	7.00	0.28	2.96	1.50	7.00	0.79	8.27
7.5	1.50	6.25	0.41	3.82	1.50	6.25	0.90	8.41
9	1.50	5.50	0.42	3.44	1.50	5.50	0.90	7.46
10.5	1.50	4.75	0.35	2.49	1.50	4.75	0.85	6.07
12	1.50	4.00	0.60	3.61	1.50	4.00	0.98	5.89
13.5	1.50	3.25	0.61	2.98	1.50	3.25	0.98	4.79
15	1.50	2.50	0.61	2.30	1.50	2.50	0.98	3.69
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Yüksek		LI =	29	Sıvılaşma Şiddeti	Orta	LS =	64

Tablo 3. 29. SK-4 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri

SK-4	Sıvılaşma Potansiyeli (Sondaj Noktalarındaki)							
Iwasaki ve ark.. [1982]					Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]			
Derinlik (m)	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı. m	W(z) (10-0.5*z)	F(z) (1-F _{SL})	Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi. LI	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı. m	W(z) (10-0.5*z)	P _L (z) (1/(1+(F _{SL} /0.96) ^{4.5}))	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi. L _s
3	1.50	8.50	-	-	1.50	8.50	0.00	0.00
4.5	1.50	7.75	0.51	5.87	1.50	7.75	0.95	11.06
6	1.50	7.00	0.63	6.63	1.50	7.00	0.99	10.36
7.5	1.50	6.25	0.70	6.57	1.50	6.25	0.99	9.33
9	1.50	5.50	0.57	4.74	1.50	5.50	0.97	8.04
10.5	1.50	4.75	0.59	4.18	1.50	4.75	0.98	6.97
12	1.50	4.00	0.59	3.54	1.50	4.00	0.98	5.87
13.5	1.50	3.25	1.00	4.88	1.50	3.25	1.00	4.88
15	1.50	2.50	1.00	3.75	1.50	2.50	1.00	3.75
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Yüksek		LI =	40	Sıvılaşma Şiddeti	Orta	LS =	60

Tablo 3. 30. SK-5 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri

SK-5	Sıvılaşma Potansiyeli (Sondaj Noktalarındaki)							
Iwasaki ve ark.. [1982]					Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]			
Derinlik (m)	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı. m	W(z) (10-0.5*z)	F(z) (1-F _{SL})	Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi. LI	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı. m	W(z) (10-0.5*z)	P _L (z) (1/(1+(F _{SL} /0.96) ^{4.5}))	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi. L _s
3	1.50	8.50	0.35	-	1.50	8.50	0.85	10.90
4.5	1.50	7.75	0.32	3.70	1.50	7.75	0.82	9.57
6	1.50	7.00	0.59	6.23	1.50	7.00	0.98	10.28
7.5	1.50	6.25	0.52	4.83	1.50	6.25	0.96	8.96
9	1.50	5.50	-	-	1.50	5.50	0.00	0.00
10.5	1.50	4.75	0.30	2.14	1.50	4.75	0.81	5.74
12	1.50	4.00	0.74	4.43	1.50	4.00	1.00	5.98
13.5	1.50	3.25	0.88	4.29	1.50	3.25	1.00	4.87
15	1.50	2.50	1.00	3.75	1.50	2.50	1.00	3.75
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Yüksek		LI =	29	Sıvılaşma Şiddeti	Orta	LS =	60

Tablo 3. 31. SK-6 sıvılaşma potansiyeli indeksi (LI) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LS) analizleri

SK-6	Sıvılaşma Potansiyeli (Sondaj Noktalarındaki)							
Iwasaki ve ark.. [1982]					Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]			
Derinlik (m)	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı. m	W(z) (10-0.5*z)	F(z) (1-F _{SL})	Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi. LI	Sıvılaşmaya Yatkın Tabaka Kalınlığı. m	W(z) (10-0.5*z)	P _L (z) (1/(1+(F _{SL} /0.96) ^{4.5}))	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi. L _s
3	1.50	8.50	0.57	7.22	1.50	8.50	0.97	12.40
4.5	1.50	7.75	-	-	1.50	7.75	0.99	11.54
6	1.50	7.00	0.29	3.09	1.50	7.00	0.80	8.39
7.5	1.50	6.25	0.45	4.21	1.50	6.25	0.92	8.66
9	1.50	5.50	-		1.50	5.50	0.00	0.00
10.5	1.50	4.75	-		1.50	4.75	0.00	0.00
12	1.50	4.00	0.49	2.96	1.50	4.00	0.95	5.68
13.5	1.50	3.25	1.00	4.88	1.50	3.25	1.00	4.88
15	1.50	2.50	1.00	3.75	1.50	2.50	1.00	3.75
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Yüksek		LI =	26	Sıvılaşma Şiddeti	Orta	LS =	55

3.5. İnceleme Alanında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis (2D) Programı Kullanılarak Yapılan Sıvılaşma Analizi

Çalışma kapsamında, öncelikle 15 m derinliğe sahip SK-3 sondaj kuyusu verileri ile bir boyutlu analizi literatürde yer alan RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Model geometrisi

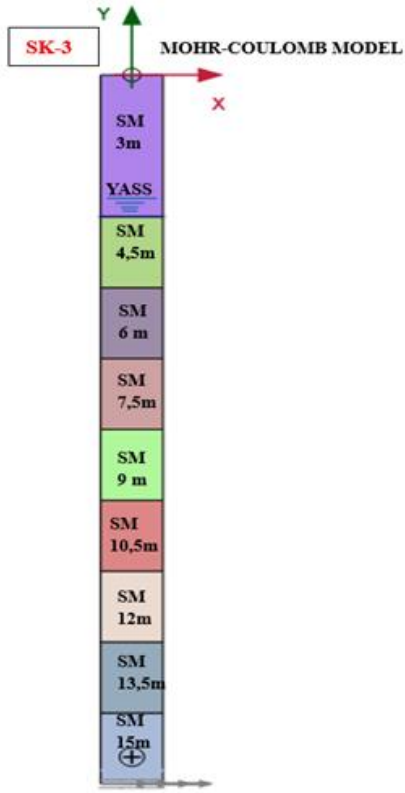
Yapılan analizlerde öncelikle, SK-3 sondaj logundan elde edilen veriler ile zemin 1.5'lik tabakalar halinde düşünülerek 15 m'lik bir model oluşturulmuştur. Analizlerde statik durumlar için Mohr-Coulomb, dinamik durumlar için UBC3D-PLM malzeme modelleri seçilmiştir. Tablo 3.32'de sayısal analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb modeli parametreleri verilmiştir. Bununla birlikte dinamik analiz aşamasında UBC3D-PLM bünye modeli atanarak SPT-N darbe sayılarına bağlı olarak model parametreleri seçilmiş literatürde yer alan RSN292_ITALY_A-STU000 depremi özellikleri kullanılmıştır. Tablo 3.33'de sayısal analizlerde kullanılan Plaxis UBC3D-PLM parametreleri verilmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görüldüğü üzere seçilen SK-3 sondaj logu bir boyutlu (1-D) analizinde, 1.5'lik tabakalara noktalar (Şekil 3.9) tanımlanmıştır. Tanımlanan bu noktalara dair ivme kaydı elde edilmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görüldüğü üzere, 15 m derinliğe sahip sondaj logunun 15 m'sinde yer alan ivme kaydı kullanılarak ilk 15 m'si modellenerek analiz gerçekleştirildiğinde, 4 m ile 15 m arasındaki 11 m'lik tabakanın sıvılaştığı görülmüştür.

Tablo 3. 32. Sayısal analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb modeli parametreleri

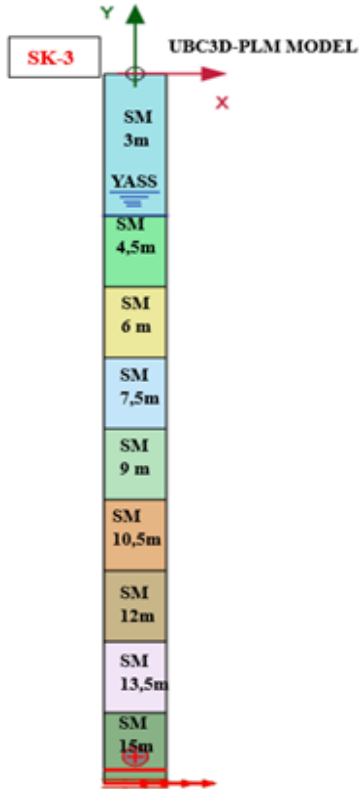
Mohr-Coulomb Modeli										
DERİNLİK(m)	γ_n (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	Sondaj	E_{ref} (kN/m²)	V_s (m/sn)	K_0	ν	Ψ (⁰)	Φ (⁰)	c
3	15.3	18.65	SK-3	84090	144	0.44	0.30	4	34	5.58
4.5				61350	123					
6				73900	135					
7.5				97420	155					
9				974200	155					
10.5				117200	170					
12				120000	172					
13.5				127000	177					
15				131400	180					

Tablo 3. 33. Sayısal analizlerde kullanılan Plaxis UBC3D-PLM parametreleri

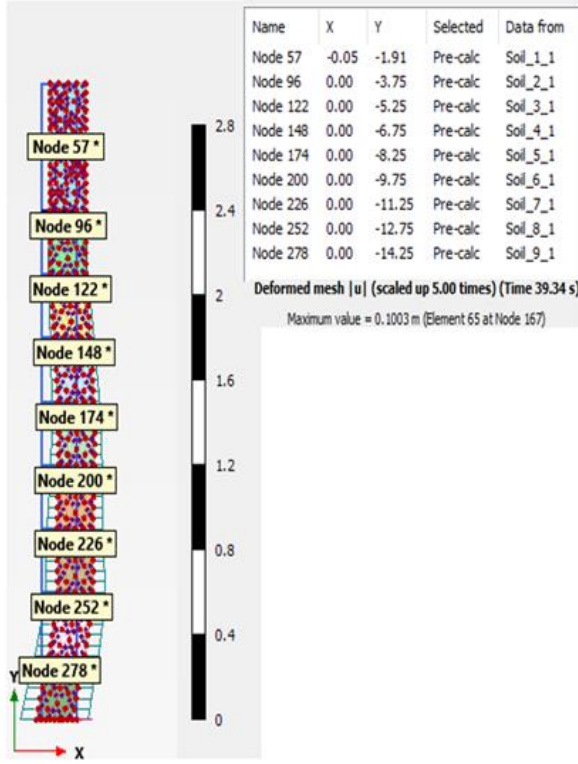
SK3(K_G^e)	K_B^e	K_G^p	Φ'_{cv}	Φ'_{pi}	Φ'_p	R_f	c
1.121.88	785.32	1.109.94	34	36	36	0.72	5.58
1.246.67	872.67	2.214.50	34	36	36	0.68	
1.250.88	875.61	2.264.95	34	36	36	0.68	
1.216.35	851.44	1.879.38	34	36	36	0.69	
1.222.46	855.72	1.943.03	34	36	36	0.69	
1.250.65	875.45	2.262.16	34	36	36	0.68	
1.086.12	760.28	904.85	34	36	36	0.73	
1.068.10	747.67	815.84	34	35	35	0.73	
1.051.99	736.39	743.53	34	35	35	0.74	



Şekil 3. 7. Statik durumlar için oluşturulan model geometrisi



Şekil 3. 8. Dinamik durumlar için oluşturulan model geometrisi



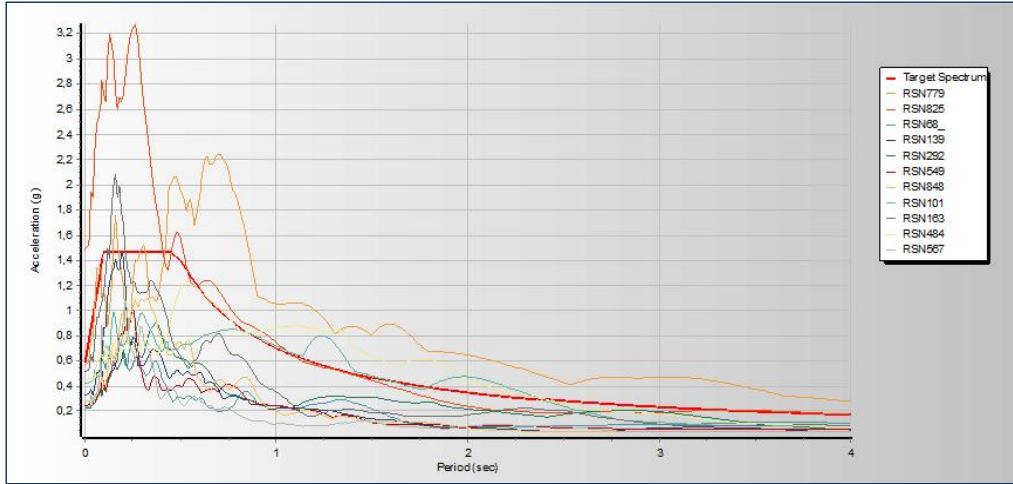
Şekil 3. 9. Model üzerinde seçilen noktalar

3.5.2. Tasarım spektrumu ile uyumlu ivme-zaman serilerinin seçimi

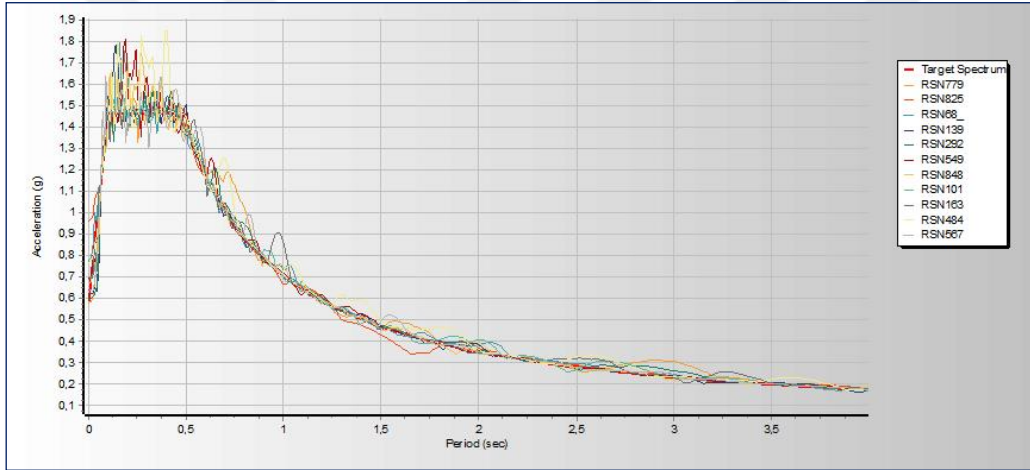
Yapılan analizlerde. (TBDY.2018) kapsamında. bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında bir veya iki boyutlu ve üç boyutlu deprem hesabında gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi veya spektral uyum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi için uygulanması gerekli kurallar 2.5.1. 2.5.2 ve 2.5.3'te tanımlanmıştır. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılmıştır. Tablo 3.34'te DD2 deprem tehlike sınıfına uygun ivme kayıtları gösterilmiştir. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11).

Tablo 3. 34. DD2 Deprem Tehlike Sınıfına Uygun İvme Kayıtları

Result ID	Record Sequence Number	Mean Squared Error	Scale Factor	Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude	Mechanism	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/sec)	Lowest Useable Frequency (Hz)
1	68	0.1023	2.1251	"San Fernando"	1971	"LA - Hollywood Stor FF"	6.61	strike slip	22.77	22.77	316.46	0.1
2	139	0.1983	2.1572	"Tabas_Iran"	1978	"Dayhook"	7.35	Normal	-	13.94	471.53	0.25
3	292	0.1037	1.7031	"Irpinia Italy-01"	1980	"Sturno (STN)"	6.9	Normal	6.78	10.84	382	0.125
4	549	0.0994	2.4836	"Chalfant Valley-02"	1986	"Bishop - LADWP South St"	6.19	strike slip	6.19	17.17	303.47	0.125
5	779	0.1833	0.5965	"Loma Prieta"	1989	"LGPC"	6.93	Reverse Oblique	6.93	3.88	594.83	0.125
6	825	0.1452	0.711	"Cape Mendocino"	1992	"Cape Mendocino"	7.01	strike slip	7.01	6.96	567.78	0.07
7	848	0.1998	2.0402	"Landers"	1992	"Coolwater"	7.28	strike slip	7.28	19.74	352.98	0.1
8	1013	0.1591	1.1857	"Northridge-01"	1994	"LA Dam"	6.69	Reverse	6.69	-	628.19	0.15
9	1633	0.1383	1.2948	"Manjil_Iran"	1990	"Abbar"	7.37	strike slip	7.37	12.55	723.95	0.13
10	4847	0.0864	1.37	"Chuetsu-oki_Japan"	2007	"Joetsu Kakizakiku Kakizaki"	6.8	Normal	6.8	9.43	383.43	0.0875
11	5678	0.0935	2.7323	"Iwate_Japan"	2008	"MYGHO2"	6.9	Reverse	6.9	5.09	398.59	0.0375

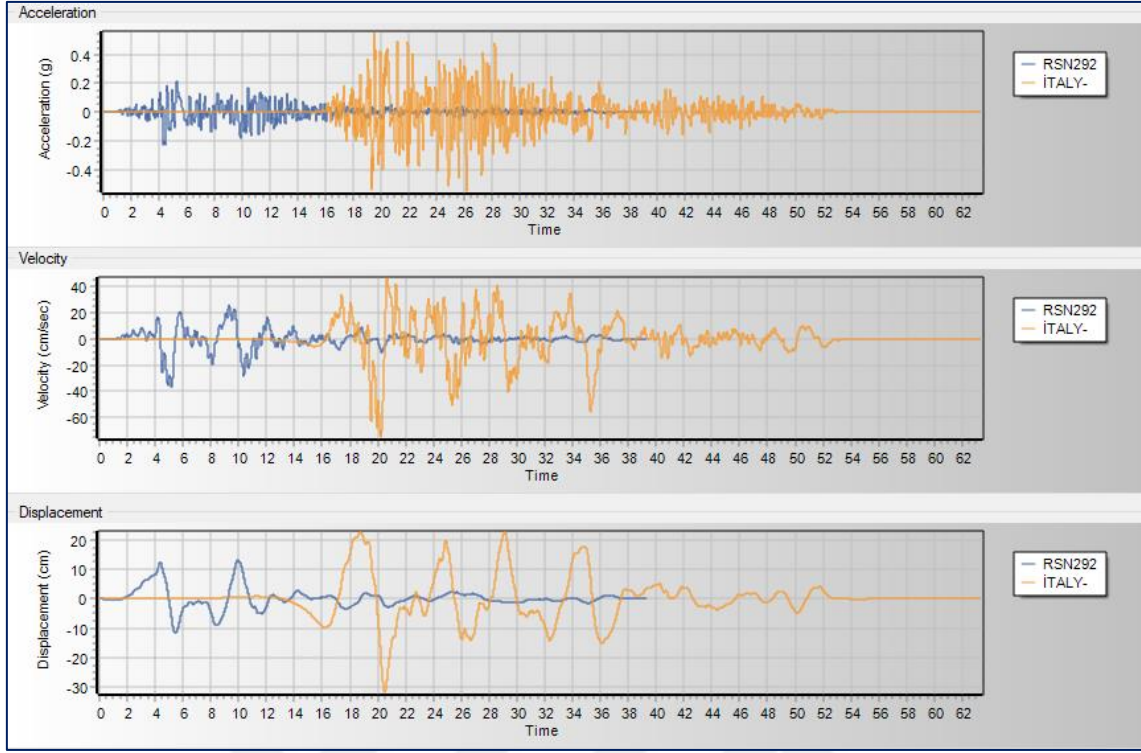


Şekil 3. 10. DD2 Deprem tehlike seviyesi için ölçeklendirilmemiş deprem kayıtlarına ait spektrum grafiği ile hedef-tasarım spektrum grafiği

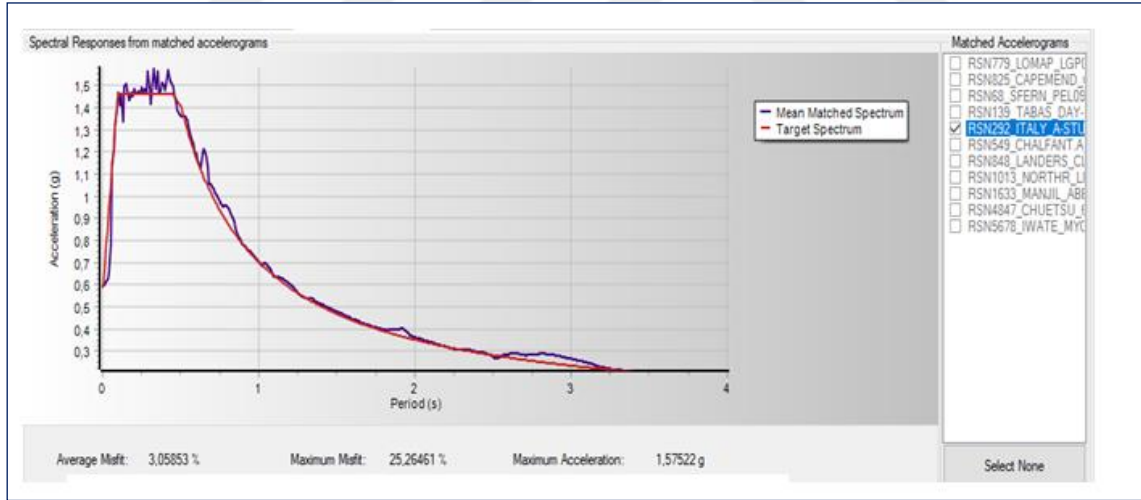


Şekil 3. 11. DD2 Deprem tehlike seviyesi için ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarına ait spektrum grafiği ile hedef-tasarım spektrum grafiği

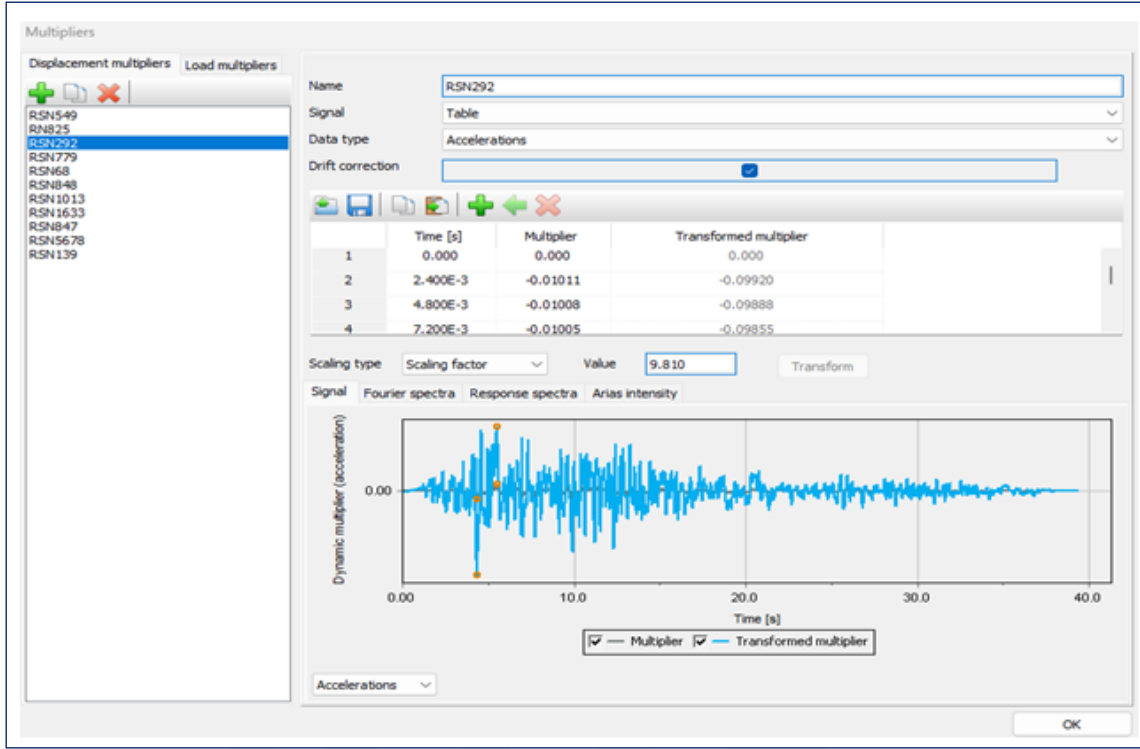
Yapılan analizlerde, toplamda her bir deprem seviyesi için Peer veri tabanından indirilen 11 adet deprem kaydı seçilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarından spektral uyum metodolojisi temelinde. Seismosoft yazılımı kullanılarak ölçeklendirme yapılmıştır. Seçilen İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir. Yine analizlerde girdi hareketi (input motion) olarak kullanılan ivme kayıtları Şekil 3.14’de verilmiştir. Şekil 3.15’de, orijinal ivme-zaman ve Şekil 3.16’da, uyumlu ivme-zaman kayıtları gösterilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 3.17’de, İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı orijinal ivme-zaman ve Şekil 3.18’de, İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı uyumlu ivme-zaman grafikleri verilmiştir.



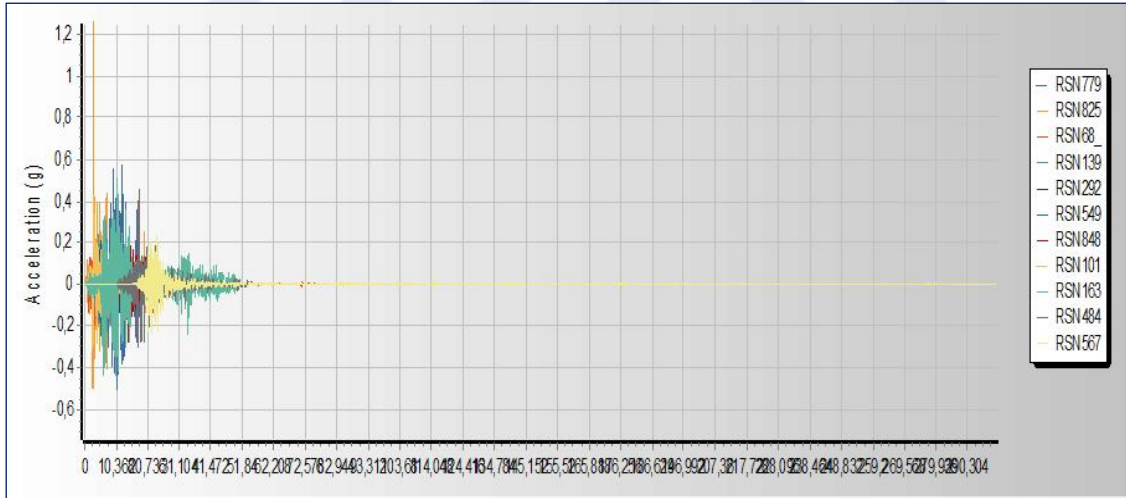
Şekil 3. 12. Irpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı



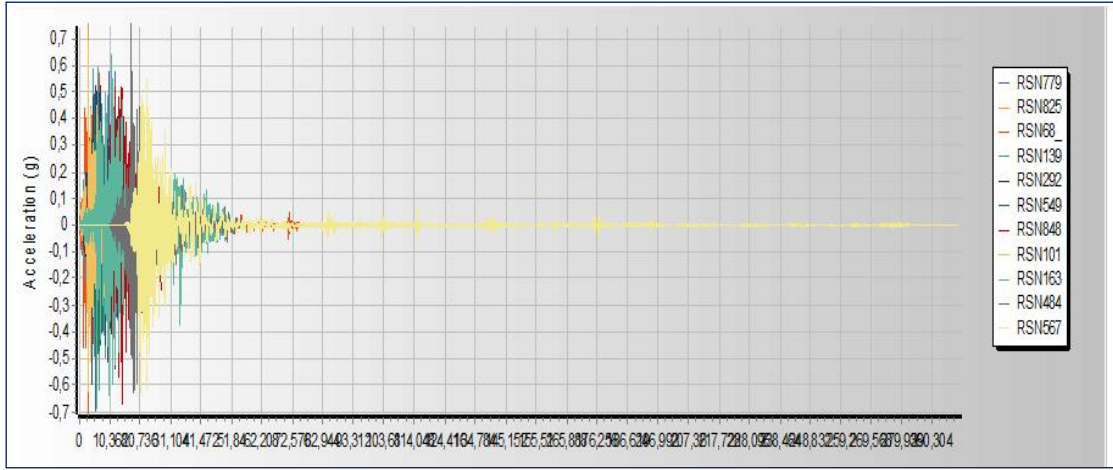
Şekil 3. 13. Irpinia -RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı



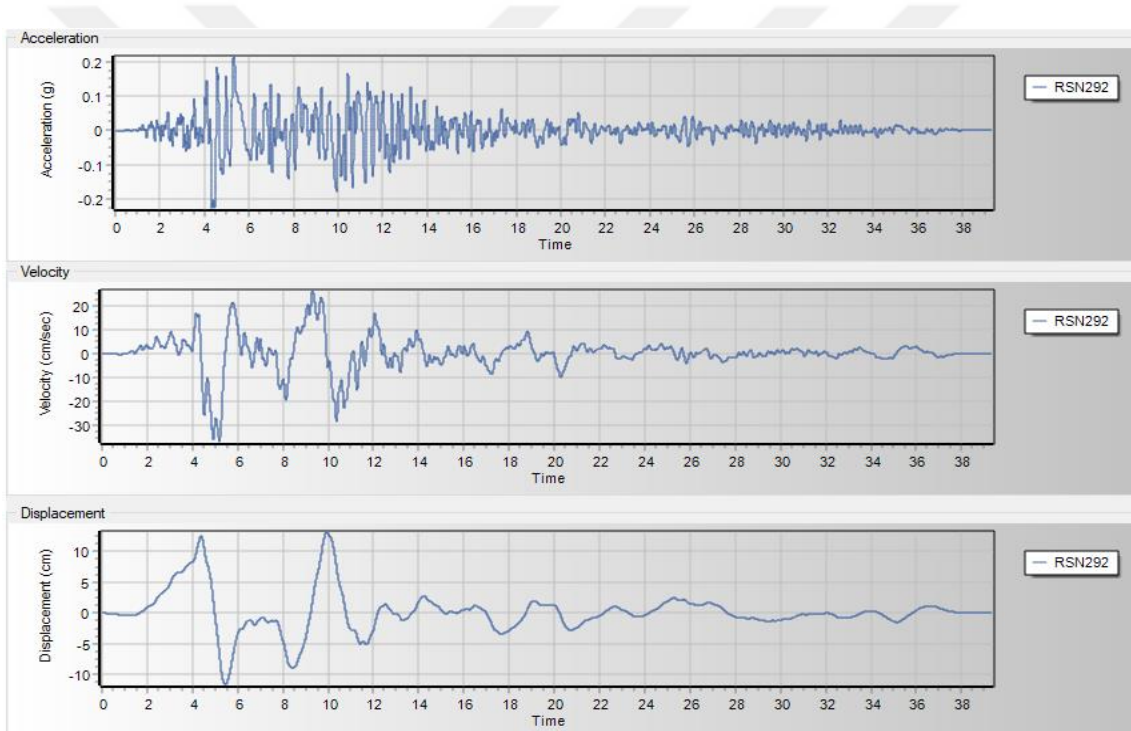
Şekil 3. 14. Irpinia -RSN292_ITALY_A-STU000 depremine ait ivme girdisi



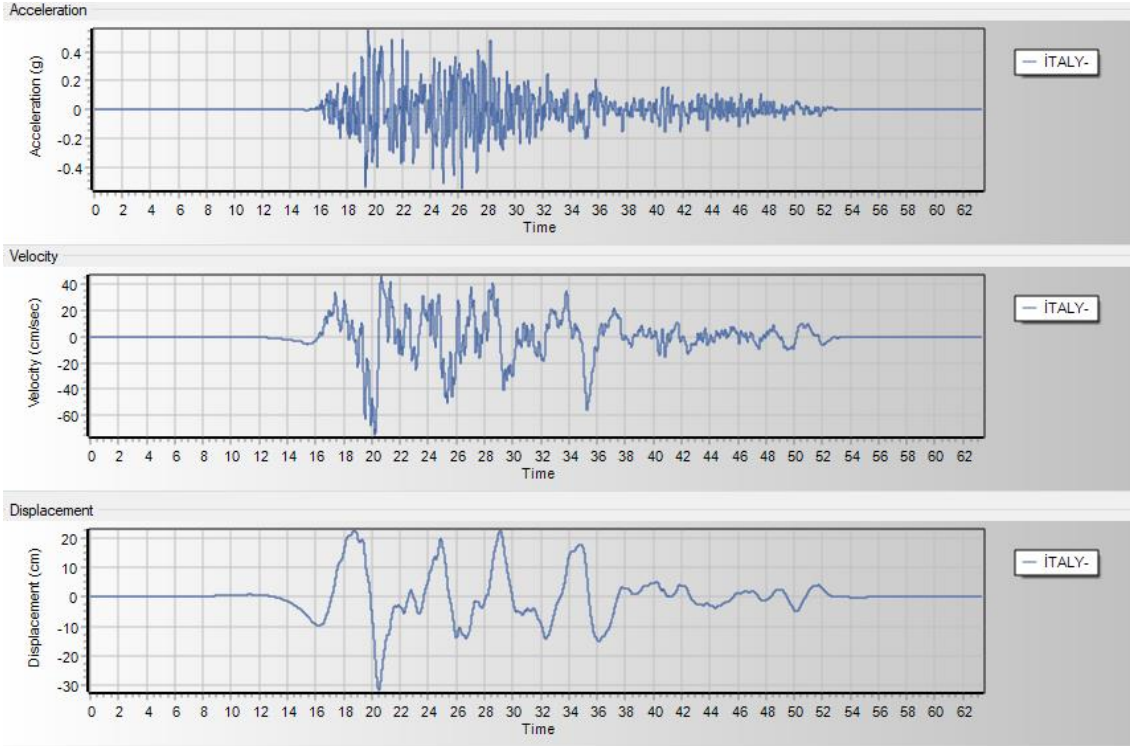
Şekil 3. 15. Orijinal ivme-zaman grafiği



Şekil 3. 16. Uyuşumlu ivme-zaman grafiği

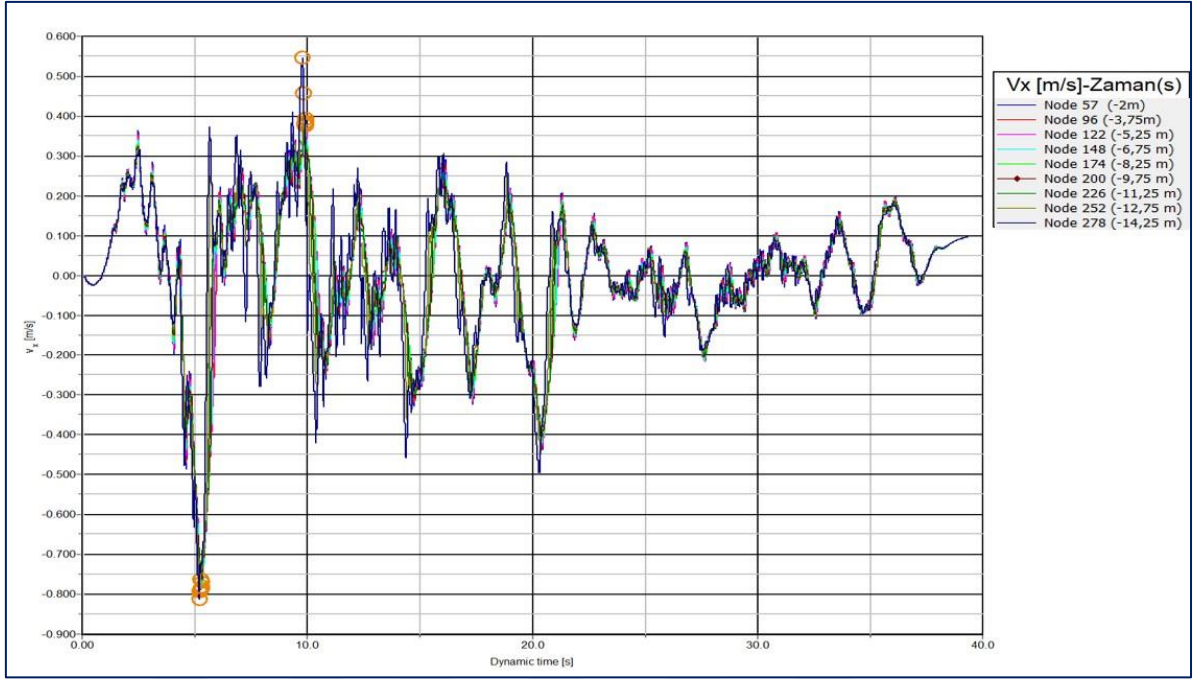


Şekil 3. 17. İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı orijinal ivme

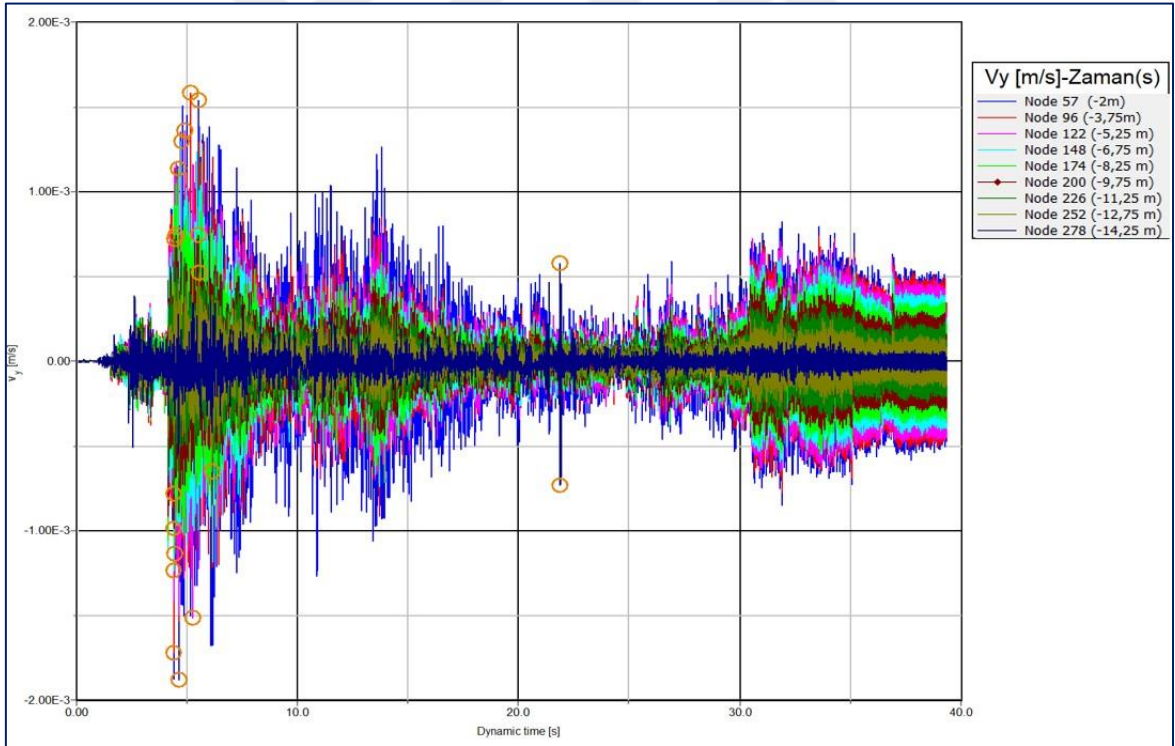


Şekil 3. 18. İrpinia-RSN292_ITALY_A-STU000 deprem kaydı uyşumlu ivme

Şekil 3.19a)'da $V_x(m/sn)$ -zaman(sn), Şekil 3.19b)'de $V_y(m/sn)$ -zaman(sn), Şekil 3.20a)'da $a_x(m/sn^2)$ -zaman(sn), Şekil 3.20b)'de $a_y(m/sn^2)$ -zaman(sn), Şekil 3.21a)'da $u_x(m)$ -zaman(sn) ve Şekil 3.21b)'de $u_y(m)$ -zaman(sn) grafikleri verilmiştir. $V_x(m/sn)$ -zaman(sn) ve $V_y(m/sn)$ -zaman(sn) grafiklerinde en yüksek yer değıştirmenin Node-200'de 9,75 metre olduğı görölmüşür.

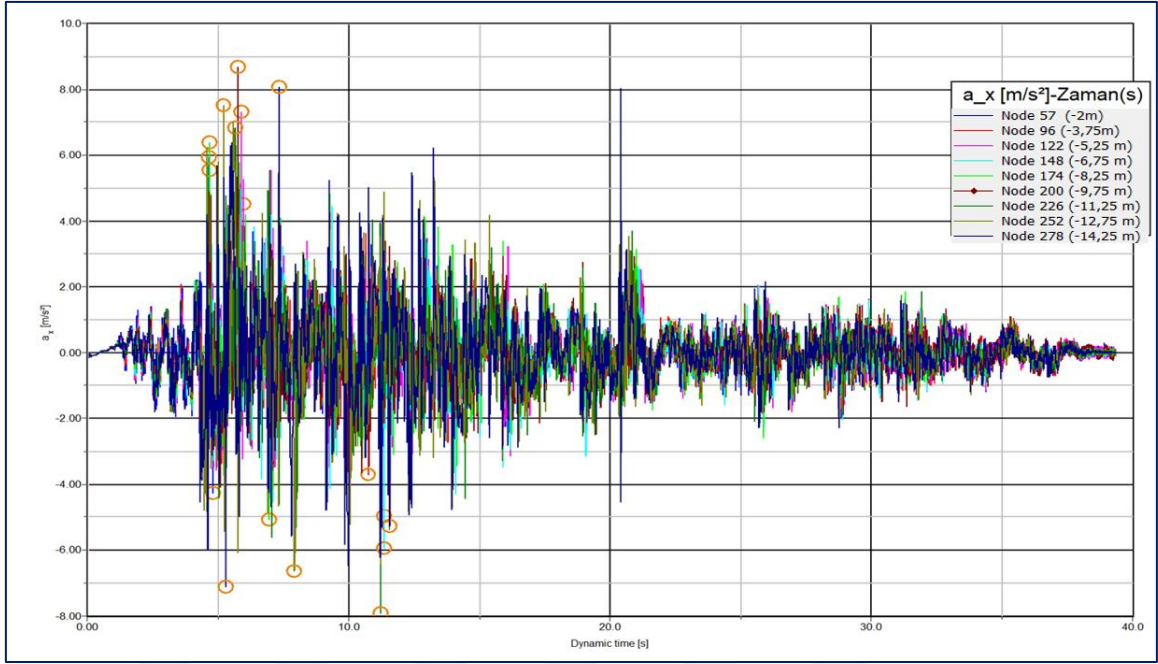


a)

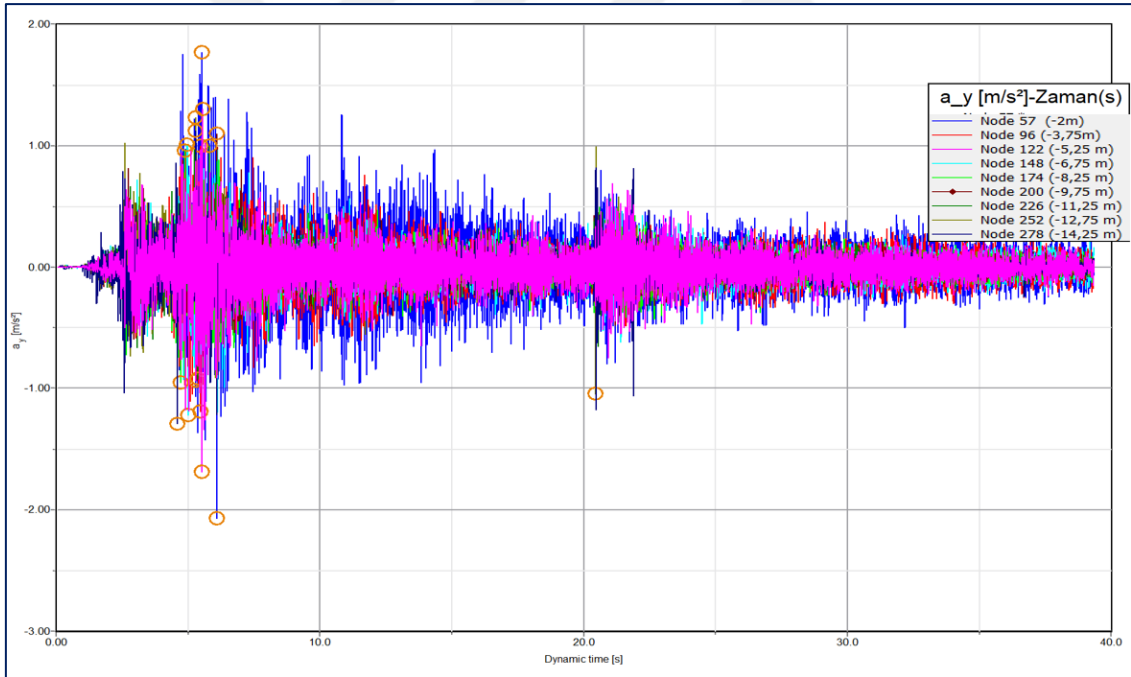


b)

Şekil 3. 19. a) V_x (m/sn)-zaman(sn) b) V_y (m/sn)-zaman(sn) grafikleri

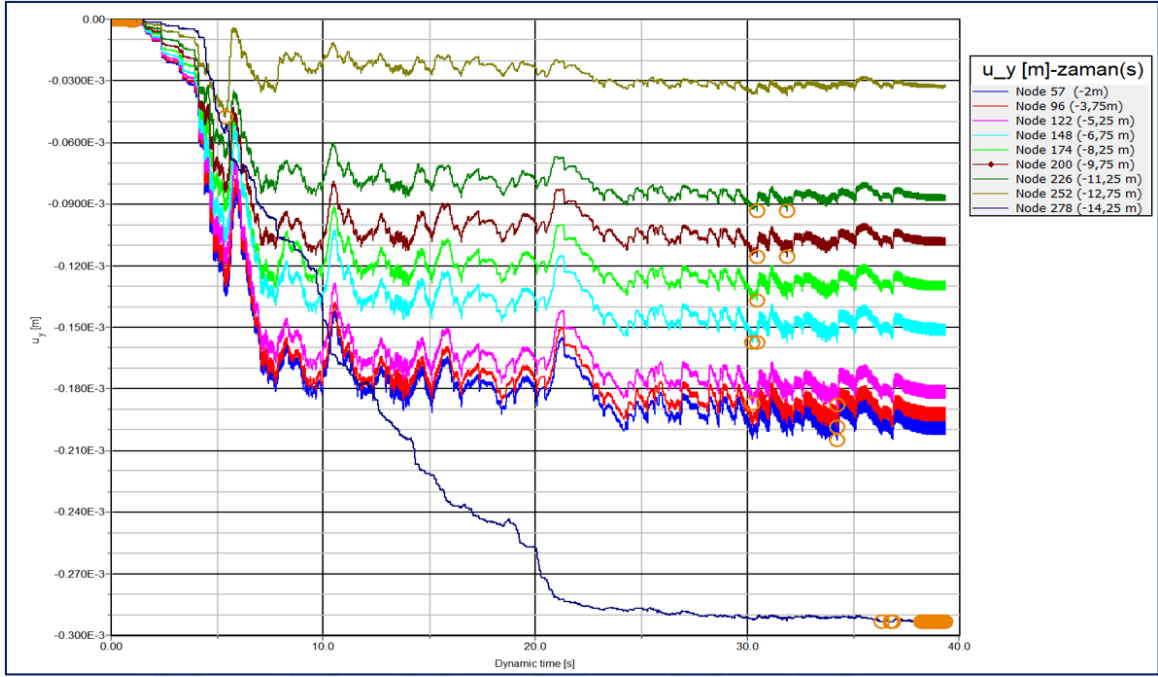


a)

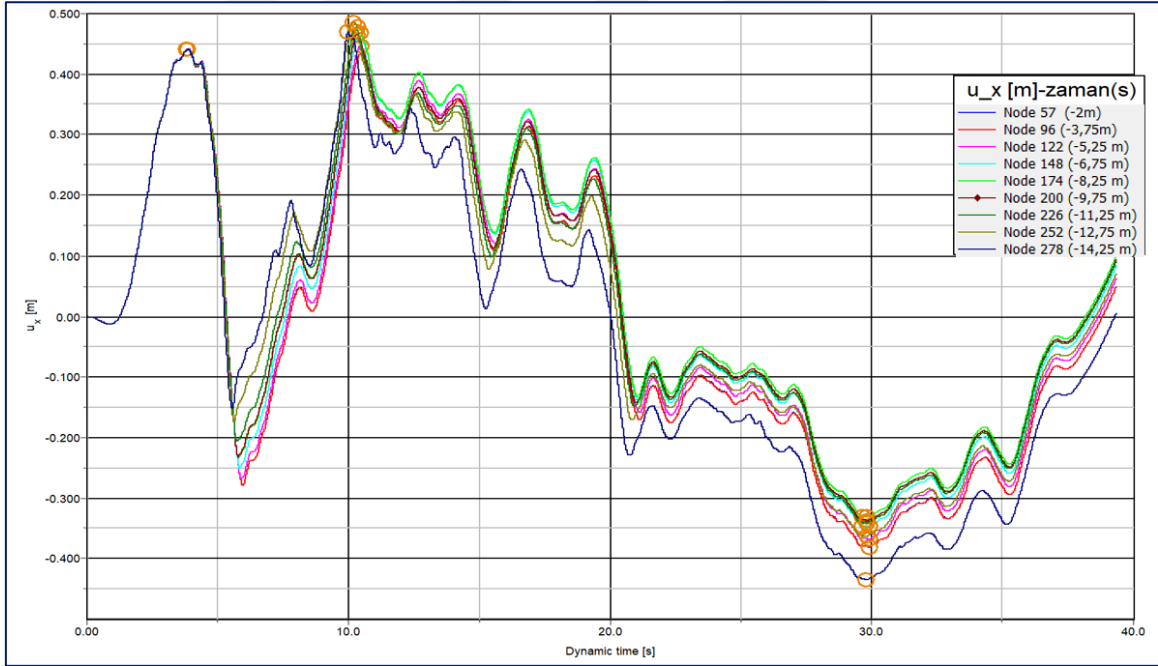


b)

Şekil 3. 20. a) $a_x(m/sn^2)$ -zaman(sn)b) $a_y(m/sn^2)$ -zaman(sn) grafikleri



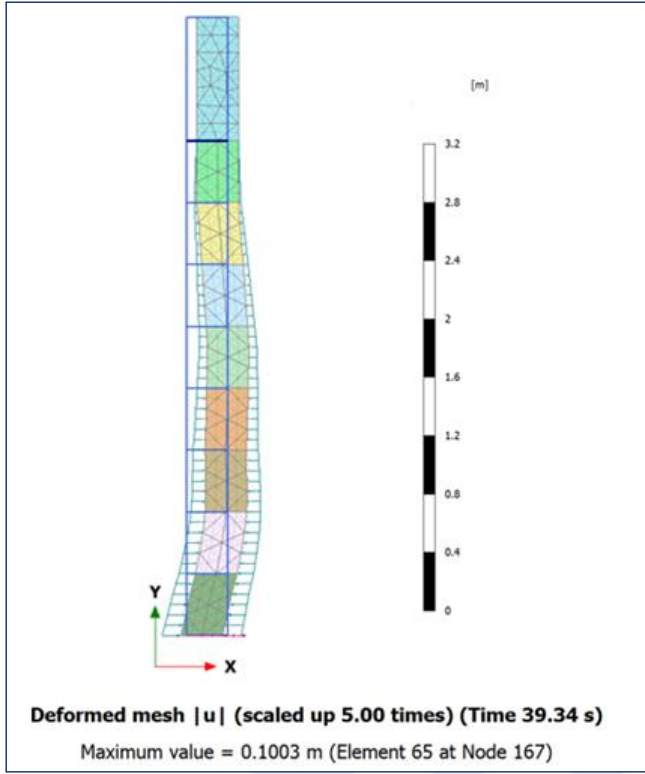
a)



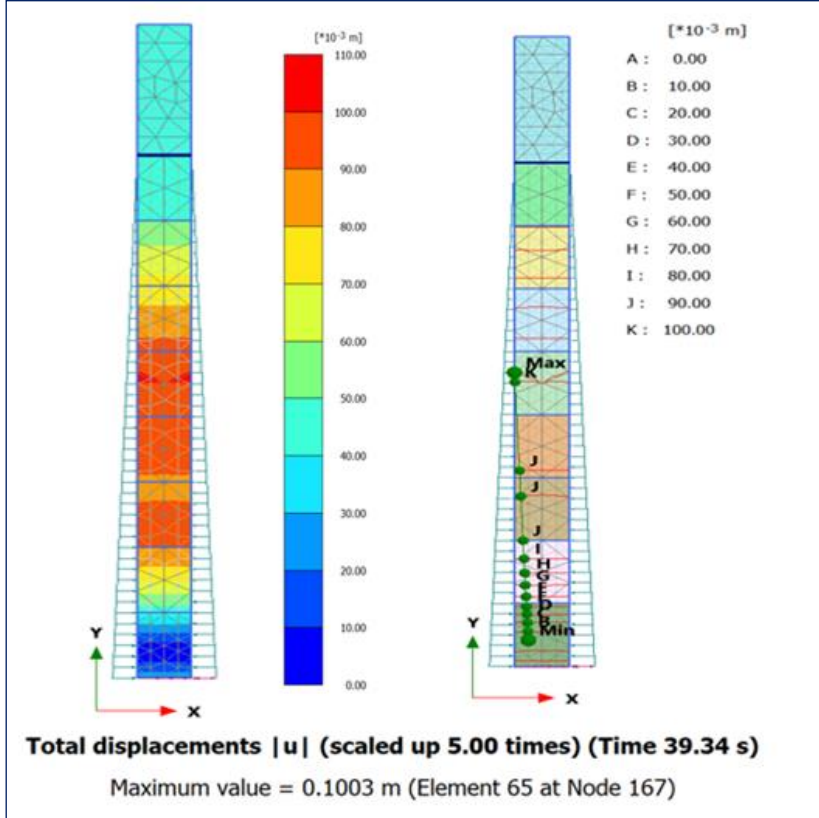
b)

Şekil 3. 21. a) $u_x(m)$ -zaman(sn)b) $u_y(m)$ -zaman(sn) grafikleri

Yapılan analizlerde Şekil 3.22’de deformed mesh ve Şekil 3.23’de toplam deformasyon modelleri gösterilmiştir. Şekil 3.23’de görüldüğü üzere 4 m’lik kum tabakasının altında yer alan 11 m’lik gevşek kum tabakasında maksimum toplam deformasyon 0.1003 metre hesaplanmıştır.



Şekil 3. 22. Deforme olmuş ağ(Deformed mesh)

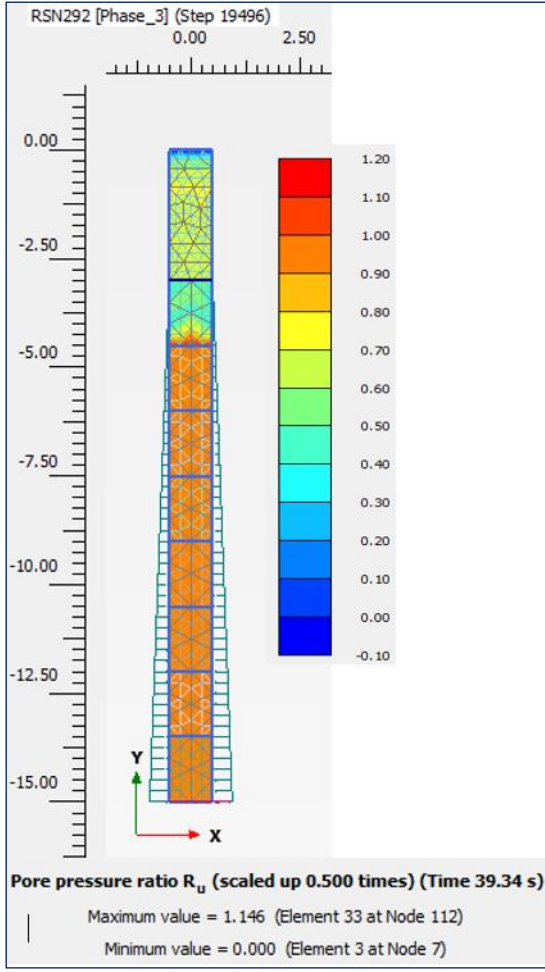


Şekil 3. 23. Toplam deformasyon

3.5.3. R_u değerinin değışimi

Yapılan 1D boyutlu analiz sonucunda. 4 m'lik kum tabakasının altında yer alan 11 m'lik gevşek kum tabakasında bir başka deyişle, turuncu ve kırmızı renk ile gösterilen bölümlerde sıvılaşmanın meydana geldiği görülmüştür. Zemin modeli için Şekil 3.21'de görüldüğü üzere, artık boşluk suyu basıncının düşey efektif gerilmeye oranı (R_u) 0.70 değerini aştığından sıvılaştığı sonucuna varılmıştır (Petalas. 2012). Dolayısıyla artık boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye oranının (Şekil 3.24) SPT-N değerin düşük olduğu durumda R_u değerin 0.7 değerinde yukarıda olduğu görülmektedir. Ayrıca kum tabakasının özellikle üst kısmında yer alan ve yazılım tarafından hesaplanan artık boşluk suyu basıncının oluşması sıvılaşan tabakanın sıvılaşmadan kaynaklı daha sıkı hale gelme eğiliminde davranış sergilemesi neticesinde tabaka üzerinde meydana gelen hacimsel değışimden kaynaklı olduğu şeklinde değerlendirilmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 3 m olduğundan, 3 m'lik tabakanın sıvılaşmadığı ayrıca ru değerin sifıra yakın olduğundan 1 m'lik kum tabakasının da sıvılaşmadığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen modelde artık boşluk suyu basıncının oluşumunun hacimsel değışime bağı olduğu, dolayısıyla bu durumun kayma gerilmelerinden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.24). Kayma gerilmelerinde ilgili tabaka üzerinde bulunan ivme değerlerine bağı olarak değerlendirildiğinde, modelde kum tabakası yüzeyinde herhangi bir artık boşluk suyu basıncının oluşmadığı, bu durumda sıvılaşan tabakadaki ivme değerlerinin aşırı derecede sönümlenmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

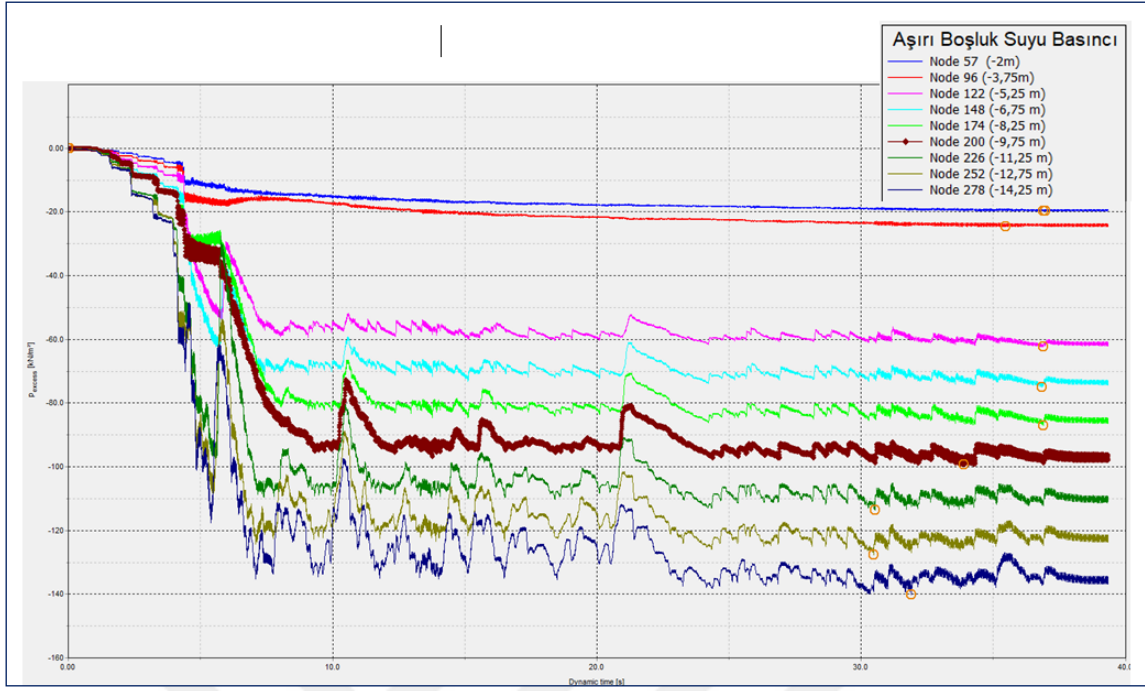


Şekil 3. 24. Oluşturulan modelde R_u değeri

3.5.4. Boşluk suyu basıncı değişimleri

Model sonuçları incelendiğinde, sıvılaştıran tabakanın kumdaki etkisi neticesinde hacim değişiminden kaynaklandığı görülmüştür. Ayrıca modelde önce hacim kabarmasına bağlı olarak pozitif değer aldığı anda sonrasında büzülme davranışına bağlı olarak işaret değiştirdiği belirlenmiştir.

Seçilen noktanın sıvılaştıran tabakaya denk gelmesi halinde çok daha fazla boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. 0-15 m'deki noktalarda modele bağlı değişim. Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Şekil 3.25'te seçilen noktaların sıvılaştıran tabakaya denk gelmesi durumunda sıvılaşmayan tabakaya göre 5-6 kat aşırı boşluk suyu basıncı ürettiği görülmektedir. 15 m'lik derinlik boyunca tabaka üzerinde 1-2 m'lik değişimler ile boşluk suyu basınçlarının değişim grafikleri Şekil 3.25'de verilmiştir.



Şekil 3. 25. Oluşturulan modelde aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında. Aydın ili Köşk İlçesi. Azmak mahallesi Atıksu Arıtma Tesis projesi kapsamında yapılacak yerel zemin koşullarında inşası düşünülen mimari olarak bodrumsuz 1 ve 2 katlı yapılar ile gömülü atıksu tesisi ünitelerinin deprem sırasında dinamik yükler altında meydana gelebilecek zemin sıvılaşması potansiyelini belirlemek amacıyla. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY.2018)'e göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve Kayma dalga hızı (V_s) yöntemleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Zeminin kayma gerilmesi (τ_r) ve deprem kayma gerilmesi (τ_{deprem}) oranlanmasıyla Güvenlik Katsayıları (F_{SL}) elde edilmiştir. Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve Kayma dalga hızı (V_s) yöntemlerinden elde edilen Güvenlik Katsayıları (F_{SL}) değerlendirilip yorumlanmıştır. Bununla birlikte arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçlarının ardından statik ve dinamik durum için sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis (2D) kullanılarak modeller oluşturulup sunulmuştur. Plaxis'te sıvılaşma modeli olan UBC3D-PLM ile modellenerek zemin sıvılaşması artık boşluksuyu basıncı, ivme ve deplasmanlar açısından değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1-) Çalışma sahasında SK-1. SK-2. SK-3. SK-4. SK-5 ve SK-6 sondaj kuyusu lokasyonları için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu için yaklaşık 4.50-10.5 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.43-1.06 aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında. Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

2-) SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu için yaklaşık 4.50-9.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.40-0.56 aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında. Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

3-) SK-3 sondaj kuyusu lokasyonu için yaklaşık 4.50-15 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.39-0.79 aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında. Güvenlik Koşulu (F_{SL})

değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

4-) SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu için yaklaşık 4.50-15 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.39-0.51 aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında sıvılaşma beklenirken 4.50-15 m arasındaki derinlikten elde edilen $N_{1.60f}$ değeri 30'dan büyük olduğundan sıvılaşma riski olmadığı görülmüştür.

5-) SK-5 sondaj kuyusu lokasyonu için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.12-0.70 aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-5 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında. Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğini göstermektedir. Aynı şekilde. 7.5 m'de 1.5 m'lik tabakanın F_{SL} değerinin de 0.48 olduğundan sıvılaşma riski tespit edilmiştir. SK-5 yaklaşık 4.5-7.5 ile 9-15 m arasındaki derinlikten elde edilen $N_{1.60f}$ değeri 30'dan büyük olması bu alanda sıvılaşma riski olmadığına işaret etmektedir.

6-) SK-6 sondaj kuyusu lokasyonu için yaklaşık 7.5-9 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 1.46-1.88 aralıklarında hesaplanmıştır. Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den büyük olması bu alanda sıvılaşma riski olmadığına işaret etmektedir. 6.00-7.50 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.55-0.71 aralıklarında yaklaşık 12.00-15.00 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.51-0.53 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-6 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında. Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

7-) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY.2018) kapsamında kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan analizlerde muhtemel sıvılaşma beklenen çalışma sahasında 7.5 deprem büyüklüğü ve maksimum yüzey ivmesi 0.597 g alınarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kayma dalga hızı (V_s)'na göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, zeminin sıvılaşmaya karşı devirsel direnç oranı (CRR) ile depremden kaynaklanan devirsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ve Güvenlik Koşulu (F_{SL}) hesaplanmıştır. İnceleme alanında yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen (V_s)₃₀ değerleri 159.7-172.4 m/sn olarak hesaplanmıştır.

8-) Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-1 (MASW-1) için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri sondaj kuyusu lokasyonlarında sırasıyla. SK-1 (0.17-0.20). SK-2

(0.18-0.21). SK-3 (0.17-0.20). SK-4 (0.14-0.19). SK-5 (0.26-0.60) ve SK-6 (0.15-0.21) aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

9-) Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; sismik profil-2 (MASW-2) için yaklaşık 4.50-15.0 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri sondaj kuyusu lokasyonlarında sırasıyla. SK-1 (0.24-0.35). SK-2 (0.26-0.34). SK-3 (0.24-0.31). SK-4 (0.22-0.36). SK-5 (0.26-0.60) ve SK-6 (0.26-0.55) aralığında hesaplanmıştır. Dolayısıyla Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

10-) Yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen gözenek suyu basınç oranı (ru) dağılımına göre zeminde sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarında maksimum ru değeri 1.146 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, etkin gerilmenin tamamen kaybolduğu ve zeminde sıvılaşmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Derinlik bazında incelendiğinde, yüzeye yakın 0–5 m aralığında minimum ru değeri 0.0-0.4 olup bu bölgelerde sıvılaşma riski bulunmamaktadır. 5–10 m aralığında ru değerlerinin 0.6–0.9 arasında değiştiği ve orta düzeyde sıvılaşma eğilimi olduğu 10 m altındaki tabakalarda ise ru değerlerinin 1.0'a ulaştığı, bu nedenle yüksek sıvılaşma riski bulunduğu tespit edilmiştir. 4 m'lik kum tabakasının altında yer alan 11 m'lik gevşek kum tabakasında maksimum toplam deformasyon 0.1003 metre hesaplanmıştır. Bu bulgular, deprem sırasında boşluk suyu basıncının arttığını, buna bağlı olarak zeminde sıvılaşma ya da direnç kaybı oluştuğunu göstermektedir. Deprem bitmesinin ardından boşluk suyu basıncı sönmünecek, buna bağlı olarak hacim değişimleri oluşacak ve bu da yüzeye oturma olarak yansımaya girecektir. Zemin içindeki homojen olmayan durumlar karşısında bazı bölgelerde fazla bazı bölgelerde de daha az hacim değişiminin oluşacağı ve sonuç olarak bu farklı oturmaların yapılarda ağır hasarlar oluşturma riskinin fazla olduğu açıktır. Sonuç olarak incelenen zemin profili yüksek sıvılaşma potansiyeline sahiptir.

11-) İnceleme alanında yapılan hesaplamalardan elde edilen analiz sonuçlarına göre; sıvılaşabilen tüm tabakalarda. F_{SL} güvenlik faktörünün 1.10'den küçük olması sebebiyle sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu temel altındaki zeminde sıvılaşma güvenliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak bu aşamadan sonra sıvılaşma güvenliğinin olmadığı kesin olarak belirlenen bu ortamda yapılarda oluşabilecek hasarın etkilerinin ve sıvılaşma olasılığının derecesini belirlemek için elde edilen güvenlik faktörlerinden faydalanarak; sıvılaşma potansiyeli indeksi ve sıvılaşma risk indeksi değerlerinin

hesaplanması önem arz eder.

12-) İnceleme alanındaki sondaj kuyularında 15 metre derinlik için SK-1. SK-2.SK-3.SK-4. SK-5 ve SK-6 sondaj kuyuları için yapılan hesaplama ile bulunan $\sum LI$ değerleri $LI \geq 15$ durumuna karşı '**Çok Yüksek**' hasar seviyesinde olması; sıvılaşma potansiyelinin yapıda önemli hasarlara sebep olabileceğini gösterir. Diğer yandan sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) hesaplama sonucu $L_s \geq 35$ durumuna karşı zeminin sıvılaşma olasılığının '**Orta**' derecede olduğu belirlenmiştir.

13-) Sıvılaşmanın UBC3D-PLM Model ile Tahmin Edilmesi: İnceleme alanındaki sondaj kuyularında yapılan analizler sonucunda İvme değişimlerine bakıldığında ise birkaç derinlik noktası hariç zamana bağlı olarak yakın bir davranışın bulunduğu görülmüştür. Özellikle zemin yüzeyinde elde edilen maksimum genlik değerleri birbirine oldukça benzer çıkmaktadır. UBC3D-PLM modeli kullanılabilir yapan etkenlerin başında ise $SPT_{N1.60}$ değerine bağlı olarak model girdi parametrelerinin elde edilebilmesidir.

Çalışma sahasında zemin iyileştirme yöntemlerinin (drenaj sistemleri, taş kolon, vibro-kompaksiyon, enjeksiyon vb.) uygulanması ile yoğunluk artırılarak fazla gözenek suyu basıncı giderilebilir. Zemin enjeksiyonu (grout) veya derin karıştırma yöntemi uygulanarak kayma direnci artırılabilir. Yapısal önlemler temellerin derin kazıklı sisteme aktarılması ve rijit temel çözümleri ile oturma farklarının minimize edilmesi önerilmektedir. Ayrıca analiz sonuçlarının arazi verileriyle (SPT , CPT , V_s ölçümleri) doğrulanması ve proje öncesinde detaylı geoteknik incelemelerin yapılması uygun olacaktır.

Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY. 2018) ile beraber zemin sıvılaşması değerlendirilmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin dikkate alınması istendiğinden UBC3D-PLM model ile yapılan sıvılaşma analizleri sonucunda elde edilecek deplasman değerlerinin dikkatli bir şekilde değerlendirmesi gerekmektedir.

Ülkemizde zemin araştırma yöntemleri olarak en çok standart penetrasyon deneyi uygulanmaktadır ve hemen hemen her projede $SPT_{N1.60}$ değerleri kullanılmaktadır. Dolayısıyla. $SPT_{N1.60}$ değerleri kullanılarak bir zemine ait yaklaşık sıvılaşma davranışı artık boşluksuyu basıncı oluşumu ve ivmeler açısından Plaxis UBC3D-PLM modeli ile tahmin edilebilir. Yüzeyde oluşabilecek oturmalar açısından ise analiz sonuçlarına biraz daha temkinli yaklaşılarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak ilgili zeminin

sıvılaşma davranışının daha iyi modellenebilmesi için mevcut imkanlar çerçevesinde zemine ait gerekli laboratuvar deneyleri yapılmalı ve bu deney sonuçları baz alınarak girdi parametrelerinin elde edilmesi tavsiye edilmektedir.



5. KAYNAKLAR

AA (2023, 17 Mart). Depremle zemini yaklaşık 1,5 metre çöken tesisler gölün içinde kaldı. TRT Haber aracılığıyla erişilmiştir:

<https://www.trthaber.com/haber/turkiye/depremle-zemini-yaklasik-15-metre-coken-tesisler-golun-icinde-kaldi-753866.html>, Erişim Tarihi: 18 Eylül 2025.

Ambraseys, N. N., 1988. Engineering seismology. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 17(1), 1– 105.

Andrus R.D., Stokoe II KH., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 126 (11), 1015–25.

Anonymous, 2006a. Why does liquefaction occur? Explanation. On-line: <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why1.html>, Accessed at 08 August.

Arango, I., 1996. Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations. *J. Geotechnical Eng.*, ASCE 122(11), 929–36, 1996.

Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanlı Yapı Tasarımı, Beta Yayınevi, İstanbul.

Çetin, K. O., and Seed, R. B., 2004. Nonlinear shear mass participation factor (rd) for cyclic shear stress ratio evaluation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 24: 103-113.

Idriss I.M., Boulanger R.W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute, EERI Publication*, Monograph MNO-12, Oakland, CA, 237ss.

Idriss I.M., 1999. Presentation notes: An update of the Seed Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential, *TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction Anal.*, Publ. No FHWARD- 99-165, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Kayabali, K., 1996. Soil Liquefaction Evaluation Using Shear Wave Velocity. *Engineering Geology*, New York, 44, 121-127.

Kayen, R.E., Mitchell, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S., Countinho, R., 1992. Evaluation of SPT CPT and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data. In: Hamada, M., O'Rourke, T.D. (Eds.), *Proceedings, Fourth Japan- US. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*. Technical Report NCEER-92-0019. 1, pp. 177–204 Honolulu, Hawaii, Buffalo, NY.

Kishida, H., 1969. Characteristics of liquefied sands during Mino-Owaei, Tohnankai and Fukui earthquakes. *Soils and Foundations*, 9(1):75-92.

Kramer, S.L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. *Prentice-Hall*, Inc., USA, 1-653.

Lambe P.C., 1981. Dynamic Centrifuge Modelling of a Horizontal Sand Stratum, *Sc.D Thesis*, Dept. Of Civil Engineering, Mass. Inst. Technology, Cambridge, Mass. USA.

Liao S.S.C., Whitman R.V., 1986. Overburden correction factors for SPT in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3), 373- 377

ODTÜ DMAM, 2023. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ve Elbistan Depremleri Ön Gözlem Raporu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, s. 26.

Özçep, F., 2010. Soil Engineering: A Microsoft Excel (R) spreadsheet (c) program for geotechnical and geophysical analysis of soils. *Computers & Geosciences* , vol.36, no.10, pp.1355-1361

Özçep, F., Aşçı, M., Karabulut, S., Alpaslan, N., Yas, T., 2003. Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi. *Uygulamalı Yerbilimleri*, Cilt:3, Sayı:2, Sayfa: 11-22.

Özçep, F and Zarif, H., 2006. Microzonation Studies based on Soil Liquefaction: Yalova City (Turkey). *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology* , Switzerland, pp.348

Özçep, F and Zarif, H., 2009. Variations of soil liquefaction safety factors depending on several design earthquakes in the city of Yalova (Turkey). *Scientific Research And Essays* , vol.4, no.6, pp.594-604.

Seed, B., Lee, K. L., 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of Soil Mechanics&Foundations Div.*, 92(SM6).

Seed, H. B., Arango, I., Chan, C. K., 1975b. Evaluation of soil liquefaction potential during earthquakes. *Earthquake Engineering Research Center, Report no: EERC 75-28*, Berkeley, California.

Seed H.B., Idriss I. M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249-1273.

Seed, H.B., Idriss, I. M., Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3):458-482.

Seed, H. B., Martin, P. P., Lysmer, J., 1975a. The generation and dissipation pore water pressures during soil liquefaction. *Earthquake Engineering Research Center, Report no: EERC 75-26*, Berkeley, California.

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R. M., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 111(12):1425-1446.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Resmi Gazete, Tarih: 18.03.2018, Sayı: 30364.

Terzaghi, K., 1925. Erdbaumechnik auf Bodenphysikalischer Grundlage. *Vienna, Deuticke.*

USGS, 2023. Seismic Refraction Method. U.S. Geological Survey. Erişim adresi: <http://earthquake.usgs.gov/> Erişim Tarihi: 18 Eylül 2025.

Uyanık, O., 2002. Potential liquefaction analysis method based on the shear wave velocity. DEU. The Graduate School of Natural and Applied Sciences, *Ph.D. Thesis*, İzmir-Türkiye, p. 195.

Uyanık, O., 2006. An approach for cyclic stress ratio of liquefied or unliquefied soils. *DEU Eng. Faculty J. Sci. Eng.*, 8 (2), 79–91.

Uyanık, O., 2010. Compressional and shear-wave velocity measurements in unconsolidated the top-soil and comparison of the results. *Int. J. Phys. Sci.*, 5 (7), 1034–1039.

- Uyanık, O.,** 2011. The porosity of saturated shallow sediments from seismic compressional and shear wave velocities. *J. Appl. Geophys.*, 73 (1), 16–24.
- Uyanık, O.,** 2020. Soil liquefaction analysis based on soil and earthquake parameters. *Journal of Applied Geophysics*, 176, 104004.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B.,** 2015. Determination of density from seismic velocities. *The Chamber of Geophysical Engineers of Türkiye*, Jeofizik 17 (1–2), 3–15.
- Uyanık, O., Taktak, A. G.,** 2009. A new method for liquefaction analysis from shear wave velocity and predominant resonance period. *Süleyman Demirel Univ. J. Nat. Appl. Sci.*, 13 (1), 74–81.
- Uyanık, O., Ekinci, B., Uyanık, N. A.,** 2013a. Liquefaction analysis from seismic velocities and determination of Lagoon Limits Kumluca /Antalya example. *J. Appl. Geophys.*, 95, 90–103.
- Uyanık, A. N., Uyanık, O., Akkurt, İ.,** 2013b. Micro-zoning of the natural radioactivity levels and seismic velocities of potential residential areas in volcanic fields: the Case of Isparta (Turkey). *J. Appl. Geophys.*, 98, 191–204.
- Yoshimi, Y.,** 1967. An experimental study of liquefaction of saturated sands. *Soils and Foundation*, 7(2):20-32.
- Youd T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. ,D., Arango I., Castro, G., ..., Stokoe, K. H.,** 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817-833.
- Zarif, İ. H., Özçep, F., Özyalın, Ş.,** 2005. Zemin Sıvılaşması Bazlı Mikrobölgeleme:

Yalova Örneği, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi, İzmit.

Zarif, İ. H., Özçep, F., Seyyar, T., 2004. Yalova'daki Alüvyon Zeminlerin Sıvılaşma Tehlike Analizi, *Türkiye 16. Uluslararası Jeofizik Kongresi*, Ankara.

