



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN STANDART
PENETRASYON TEST(SPT) VE KAYMA DALGA HIZI(V_s)
TEMELİNDE ANALİZ EDİLMESİ, ÖRNEK BİR UYGULAMA**

EVİN ALPASLAN

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN STANDART
PENETRASYON TEST(SPT) VE KAYMA DALGA HIZI(V_s)
TEMELİNDE ANALİZ EDİLMESİ, ÖRNEK BİR UYGULAMA**

Evin ALPASLAN

**Danışman
Doç. Dr. Nuray ALPASLAN**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet Salih KESKİN

Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Evin ALPASLAN tarafından hazırlanan “ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN STANDART PENETRASYON TEST (SPT) ve KAYMA DALGA HIZI (Vs) TEMELİNDE ANALİZ EDİLMESİ, ÖRNEK BİR UYGULAMA” adlı tez çalışması 28/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Mehmet Salih KESKİN

Danışman

Doç.Dr. Nuray ALPASLAN

Üye

Doç.Dr Abdulrezzak BAKIŞ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Evin ALPASLAN
28.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN STANDART PENETRASYON TEST (SPT) ve KAYMA DALGA HIZI (Vs) TEMELİNDE ANALİZ EDİLMESİ, ÖRNEK BİR UYGULAMA

Evin ALPASLAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

2025, 70 Sayfa

Dinamik yükler altında zeminde oluşan önemli mühendislik problemlerinden birisi de sıvılaşmadır. Sıvılaşma genel olarak suya doygun, kohezyonsuz zeminlerin sismik yükleme durumunda, zeminin mukavemetini kaybederek akışkan gibi davranması olarak tanımlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Batman kent merkezinde bir sahanın sıvılaşma potansiyeli Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre Standard Penetrasyon Test (SPT) ve Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı (Vs) dayalı zemin sıvılaşması analiz yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Belirtilen sıvılaşma analizi yöntemine göre değerlendirmeler yapıp sıvılaşma için güvenlik faktörleri hesaplanmıştır.

Genel olarak yapılan sıvılaşma analizlerinin güvenlik faktörü değerlerinde, Standard Penetrasyon Test (SPT) ve Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı (Vs) dayalı zemin sıvılaşması analiz yöntemlerinin birbirlerini desteklediği yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çalışma sahasında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması nedeniyle bu alanda sıvılaşma riskinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güvenlik Koşulu (F_{SL}), Kayma Dalga Hızı (Vs), Sıvılaşma, Standart Penetrasyon Test (SPT-N)

ABSTRACT

MASTER THESIS

ANALYSIS OF THE LIQUEFACTION POTENTIAL OF SOILS BASED ON THE STANDARD PENETRATION TEST (SPT) AND SHEAR WAVE VELOCITY (V_s), AN EXAMPLE APPLICATION

Evin ALPASLAN

Batman University Graduate Education Institute

Civil Engineering Department of Science

Advisor: Associate Professor Nuray ALPASLAN

2025, 70 Pages

One of the significant engineering problems that occurs in soil under dynamic loads is liquefaction. Liquefaction is generally defined as the loss of strength and subsequent fluid-like behaviour of saturated, cohesionless soils under seismic loading.

In this thesis study, calculations were performed to determine the liquefaction potential of a site in the city centre of Batman using soil liquefaction analysis methods based on the Standard Penetration Test (SPT) according to the Turkish Building Earthquake Regulation (2018) and the shear wave velocity (V_s) according to the Andrus and Stokoe (2000) method. Evaluations were made according to the specified liquefaction analysis method, and safety factors for liquefaction were calculated.

In general, it has been determined that the safety factor values obtained from liquefaction analyses based on the Standard Penetration Test (SPT) and the Andrus and Stokoe (2000) method, which are based on shear wave velocity (V_s), yield similar results that support each other. At the study site, it was concluded that the liquefaction risk is high in this area due to the Safety Factor (F_{SL}) values being less than 1.1.

Keywords: Liquefaction, Safety Factor (F_{SL}), Shear Wave Velocity (V_s), Standard Penetration Test (SPT-N)

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle ışık tutan, sabırlı ve hoşgörölü tutumuyla beni her daim destekleyen saygıdeğer danışman hocam, Doç.Dr. Nuray ALPASLAN'a teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans çalışmamda bilgileriyle beni aydınlatan YÜK. JEOLojİ MÜH. Sadettin ONUR'a, tecrübesiyle her daim destek olan ve motive eden JEOLojİ MÜH. Faris ALPASLAN'a ve hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen, fedakârlıklarını ve sevgilerini her daim hissettiren kıymetli aileme çok teşekkür ederim.

Evin ALPASLAN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	5
3.1.Sıvılaşma Kavramı ve Mekanizması.....	5
3.2.Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler.....	8
3.2.1. Zemin özelliklerinin sıvılaşmaya etkisi.....	8
3.2.1.1. Jeolojik koşullar	9
3.2.1.2. Zeminlerin maruz kaldıkları gerilme koşulları.....	9
3.2.1.3. Zeminin bileşimi ve sıklığı.....	9
3.2.1.4. Yeraltı su seviyesi derinliği.....	10
3.2.1.5. Zeminin drenaj koşulları.....	9
3.2.1.6. Yer hareketlerinin sıvılaşmaya etkisi.....	10
3.3. Sıvılaşma Kökenli Hasar Tipleri.....	11
3.3.1. Kum kaynaması.....	11
3.3.2. Akma göçmesi.....	12
3.3.3. Yanal yayılma.....	12
3.3.4. İstinat yapısı yenilmesi.....	13
3.3.5. Taşıma gücü kaybı.....	14
3.4.Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Analizi.....	16
3.4.1. Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi.....	16
3.5. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre sıvılaşma analizi.....	16
3.5.1.Standart Penetrasyon Test (SPT) dayalı sıvılaşma analizi.....	16
3.6. Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı(Vs) dayalı sıvılaşma analizi.....	20
3.7. Sıvılaşma Güvenlik Koşulu.....	23
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	25
4.1. İnceleme Alanı Hakkında Genel Bilgiler.....	25
4.2. Bölgenin Jeolojisi ve Tektonik özellikleri.....	25
4.3.İnceleme Alanında Yapılan Geoteknik Araştırmalar	26
4.3.1. Laboratuvar deneyleri.....	30

4.4.Çalışma Sahasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e Göre Sıvılaşma Analizleri.....	30
4.4.1.Standart Penetrasyon Test(SPT) dayalı sıvılaşma analizi($M_w6,5$) için.....	30
4.4.2.standart penetrasyon test(SPT) dayalı sıvılaşma analizi($M_w7,5$) için.....	37
4.5. Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi.....	42
4.5.1.Kayma dalga hızı(V_s) dayalı sıvılaşma analizi (M_w =6,5).....	42
4.5.2.Kayma dalga hızı(V_s) dayalı sıvılaşma analizi (M_w =7,5)	52
5-SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
5.1.Sonuçlar.....	62
5.2.Öneriler.....	67
6-KAYNAKÇA.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c'	: Efektif kohezyon (t/m^2)
CB	: Sondaj delgi çapı düzeltme faktörü
CE	:Enerji oranı düzeltme faktörü
CM	:Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı
CN	:Örtü yükü düzeltme faktörü
CR	: Tij boyu düzeltme faktörü
CSR	:Depremi etkisinin bir çevrimsel gerilme oranı
CRR	:Depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı
CRRM6.5	: Moment büyüklüğü 6.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı
CRRM7.5	:Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı
CS	:Numune alıcı tipi düzeltme faktörü
C_u	:Drenajsız kayma mukavemeti (kPa)
D_f	:Temel gömülme derinliği (m)
DTS	:Deprem tasarım sınıfı
Gk	:Güvenlik katsayısı
IDI	:İnce dane indeksi (%)
I_p	:Boyutsuz temel şekil faktörü
M_w	: Deprem moment magnitud büyüklüğü
P_a	:100 kPa'a tekabül eden atmosferik basınç,
R_d	:Gerilme azaltma katsayısı
S	:Kum
SDS	:Kısa periyod tasarım spektral ivme katsayısı
SPT	:Standart penetrasyon testi
SPT-N _{1,60}	:SPT sonuçlarının örtü yüküne göre düzeltilmiş değeri
SPT-N _{1,60f}	:SPT sonuçlarının ince dane indeksi değerlerine göre düzeltilmiş değeri
SPT-N ₆₀	:SPT sonuçlarının %60 enerji düzeyine göre düzeltilmiş değeri
SPT-N ₆₀₍₃₀₎	:Temel altından itibaren üst 30 metredeki SPT ortalaması
$\tan \delta$	:Taban sürtünme direnci oranı

U_s	: Statik koşulda boşluk suyu basıncı
u_d	: Dinamik koşulda boşluk suyu basınç fazlalığı
$V_s(30)$	: Temel altından itibaren üst 30 metredeki kayma dalgası hızı ortalaması (m/s)
V_{s1}^*	: İnce dane oranına (FC) bağlı olarak sıvılaşmanın olduğu üst limit kayma dalgası hızı
W_n	: Doğal su içeriği (%)
YASS	: Yeraltı su seviyesi
Z	: Temel kalınlığı (m)
ZD	: Gevşek kum
A	: IDI değerine bağlı faktör
B	: IDI değerine bağlı faktör
$\Gamma_{doğal}$	: Zeminin doğal birim hacim ağırlığı (t/m ³)
Γ_{doygun}	: Zeminin suya doygun birim hacim ağırlığı (t/m ³)
Γ_{su}	: Suyun birim hacim ağırlığı (t/m ³)
τ_R	: Sıvılaşma direnci
τ_{deprem}	: Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi/
Σv	: Düşey toplam gerilme (t/m ²)
σ'_{v0}	: Düşey efektif gerilme (t/m ²)
τ_{deprem}	: Zeminde oluşan kayma gerilmesi (t/m ²)
τ	: Kayma mukavemeti(direnci)
τ_R	: Zeminin sıvılaşma direnci (t/m ²)

Kısaltmalar

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
BKS	: Bina kullanım sınıfı
ÇŞB	: Çevre Şehircilik Bakanlığı
MASW	: Multi-Channel Analysis of Surfacewaves (Çok kanallı yüzey dalgaları analizi)
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi)

ÇİZELGER LİSTESİ

Çizelge 3. 1. SPT düzeltme faktörleri (TBDY,2018).....	19
Çizelge 4.1. İnceleme alanında açılan sondaj kuyularının derinlikleri.....	28
Çizelge 4.2. Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularından 6.5 metrede (SK-1,SK-2,SK-3,SK-4) elde edilen numunelerin laboratuvar deney sonuçları.....	30
Çizelge 4.3. Çalışma sahasında açılan SK-1 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	32
Çizelge 4.4. Çalışma sahasında açılan SK-2 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	33
Çizelge 4.5. Çalışma sahasında açılan SK-3 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	34
Çizelge 4.6. Çalışma sahasında açılan SK-4 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	35
Çizelge 4.7. Çalışma sahasında açılan SK-1 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	38
Çizelge 4.8. Çalışma sahasında açılan SK-2 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	39
Çizelge 4.9. Çalışma sahasında açılan SK-3 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	40
Çizelge 4.10. Çalışma sahasında açılan SK-4 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	41
Çizelge 4.11. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-1) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	45
Çizelge 4.12. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-2) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	46
Çizelge 4.13. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-3) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	47
Çizelge 4.14. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-4) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	48
Çizelge 4.15. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-1) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	49
Çizelge 4.16. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-2) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	50
Çizelge 4.17. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-3) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	51
Çizelge 4.18. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-4) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	52
Çizelge 4.19. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-1) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	55
Çizelge 4.20. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-2) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	56
Çizelge 4.21. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-3) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	57
Çizelge 4.22. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-4) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	58
Çizelge 4.23. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-1) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (V_s) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	59

Çizelge 4.24. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-2) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	60
Çizelge 4.25. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-3) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	61
Çizelge 4.26. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-4) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar.....	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Deprem sırasında zemin sıvılaşmasının kavramsal modelini gösteren şematik diyagram (Wang ve ark.,2023).....	5
Şekil 3.2. Sıvılaşmayı tetikleyen çevrimsel yükleme koşullarının meydana gelmesi (Obermeier,1996).....	6
Şekil 3.3a) Normal gerilme altındaki gevşek kum modeli b)Kesme kuvvetinden kaynaklanan kayma gerilmesi altında zemin tanelerinin hareketine bağlı olarak zemin hacminin küçülmesi (Özkan,2017).....	7
Şekil 3.4. Suyu doymuş gevşek kumlu zeminde kayma gerilmesi altında zemin tanelerinin arasındaki temas kaybolması (Özkan,2017).....	8
Şekil 3.5. Alaskada sıvılaşma.....	10
Şekil 3.6. Sıvılaşmaya bağlı kum kaynamalarının etkileri, Niigata, 1964 (Marcuson ve ark.,2007).....	11
Şekil 3.7. 2000 Tottori depreminde oluşan kum kaymaları (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006).....	11
Şekil 3.8. 1971 depreminde The Lower San Fernando barajında oluşan akma (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).....	12
Şekil 3.9. 1989 Loma Prieta depreminde devlet parkı yakınında oluşan yanal yayılma (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006).....	13
Şekil 3.10. İstinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998).....	13
Şekil 3.11. Sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi (https://dailycivil.com/soil-liquefaction-causes-effects-and-types/).....	14
Şekil 3.12. Hindistan 1897 yılında Shillong depremi sırasında da Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi (https://gharpedia.com/blog/soil-liquefaction/).....	14
Şekil 3.13. 1999 Türkiye depreminde Adapazarı ilinde sıvılaşma sonucu devrilen binalar (http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/d50601b7bc18501_ek.pdf).....	15
Şekil 3.14. 1964 Niigata depremi (Youd, 1984).....	15
Şekil 3.15. Standart penetrasyon deneyi aşamaları (FHWA, 2002b).....	17
Şekil 3.16. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı (Youd ve ark., 2001).....	21
Şekil 3.19. Büyüklüğü 7,5 deprem için temiz ve siltli kumlar için düzeltilmiş Vs - CSR Abağı (Andrus ve Stokoe, 1999).....	23
Şekil 4.1. İnceleme alanı yerbulduru haritası (ArcGIS Earth'den düzenlenmiştir).....	25
Şekil 4.2. İnceleme alanı jeoloji haritası (Dedeoğlu ve ark., 2023).....	26
Şekil 4.3. İnceleme alanında sondaj kuyuları ve sismik profiller.....	27
Şekil 4.4. İnceleme alanında uygulanan sondaj görüntüleri.....	27
Şekil 4.5. İnceleme alanında uygulanan jeofizik ölçüm görüntüleri.....	28

1.GİRİŞ

Deprem etkisiyle zeminlerde meydana gelen en büyük yüzey deformasyonlarından biri sıvılaşmadır. Sıvılaşma geoteknik mühendisliğinde zemin hasarlarına neden olan en önemli ve kompleks konulardan biridir.

Sıvılaşma, deprem sonucunda oluşan dinamik gerilmeler etkisi ile genellikle suya doygun granüle zeminlerde boşluk suyu basıncının artması ve efektif gerilmenin azalmasının bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Deprem sırasında zemin tabakalarında meydana gelen sıvılaşma durumunun ortaya çıkmasıyla zemine gömülü yapılarda oturma, devrilme ve çeşitli hasarlar meydana gelir. Bu nedenle geoteknik deprem mühendisliğinde sıvılaşmaya sebep olan faktörleri ve sıvılaşma potansiyelini belirlemek ve ayrıca oluşabilecek hasarları tahmin edilebilmek önemli araştırma konuları arasında bulunur.

Sıvılaşma, doygun ve gevşek yapıdaki kohezyonsuz (çoğunlukla kumlu) zeminlerin, özellikle deprem gibi dinamik yüklemeler altında taşıma güçlerini kaybederek geçici olarak sıvı davranmasıdır.

Deprem süresince sismik dalgalar ani ve çok kısa süreli hareketlere neden olmasından dolayı, partiküller arası suyun drene olması için gereken yeterli süreye olanak tanımamaktadır. Dolayısıyla ortamdan uzaklaşamayan gözenek suyunun basıncı aniden artmaktadır. Gözenek suyundaki bu ani artış, zemin partiküllerini bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek partikülleri birbirinden uzaklaştırır. Böylece zemin dayanımını yitirir. Efektif düşey basıncın sıfır olduğu bu koşullar altında zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı zemin davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak suyla birlikte yüzeye doğru hareket eder ve yüzeyden fışkırmaya başlar. Zeminin dinamik yükler sonucunda ortaya koyduğu bu davranış biçimi sıvılaşma olarak tanımlanır.

Sıvılaşma riski değerlendirmelerinde ilk olarak sıvılaşmanın oluşabilmesi için gereken şartların var olup olmadığının araştırılması önemlidir.

Mühendislik yapıları açısından en önemli olumsuz etkilerin, zeminde mukavemet ve rijitlik kaybı ile aşırı şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler sonucu oluşan, temellerin taşıma gücü kaybı, farklı oturmalar, yanal akımlar ve şev göçmeleri, zemin yapıları ve istinat yapılarında hasarlar, kazıklar üzerinde ek yüklemeler ve yanal destek azalması, gömülü yapılar üzerinde basınçlar ve kaldırma etkisi olduğu söylenebilir. Bu nedenle sıvılaşma, yapısal hasarlar ve zemin kaymalarına yol açabilir ve mühendislik açısından oldukça önemli bir konudur.

Bu tez çalışmasında, Batman kent merkezinde bir sahanın sıvılaşma potansiyeli Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre Standard Penetrasyon Test (SPT) ve Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı(V_s) dayalı zemin sıvılaşması analiz yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Casagrande (1936) yaptığı çalışmada “kritik boşluk oranı” yaklaşımı ile, granüler zeminlerinde sıvılaşmanın hangi koşullarda gerçekleşebileceğini incelemiştir.

Casagrande (1938) yaptığı çalışmada, kritik boşluk oranının çevre basıncına bağlı olarak farklılık gösterdiğini gözlemlemiştir. Araştırmasının bulgularına göre, çevre basıncının artması sonucu kritik boşluk oranının düştüğünü belirlemiştir.

Seed (1966), deprem etkisi altında kumun davranışını açıklamak amacıyla kum numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Elde ettiği bulgular sıvılaşma davranışını açıklamak için geliştirilen pek çok araştırmaya kaynak teşkil etmiştir.

Kramer (1996), suya doymun kohezyonsuz zeminlerin drenajsız koşullarda statik ve tekrarlı yüklemelerin etkisi altında oluşan birtakım zemin deformasyonlarını tanımlamak amacıyla sıvılaşma terimini kullanmıştır.

Özçep ve ark.(2003) yaptıkları çalışmada, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini farklı yöntemlerle değerlendirmişlerdir.

Çavuş (2004) yaptığı çalışmada, gevşek kum depozitlerin sıvılaşma potansiyelini bulanık mantık modelleme yöntemi ile değerlendirmiştir.

Sitharam (2004) yaptığı çalışmada, zeminlerin dinamik özellikleri ve sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır.

Şaylan (2006) yaptığı çalışmada, Erzincan İli ve çevresinin zemin sıvılaşma potansiyelini, Kayma Dalga Hızı (Vs) verileri kullanarak saptamaya çalışmıştır.

Tonaroğlu (2006) yaptığı çalışmada, zeminlerde sıvılaşmaya neden olan etkenler hakkında daha fazla bilgi edinmek için bir dizi bilgisayar analizi yapmıştır.

Güngör (2007) yaptığı çalışmada, İzmir-Mavişehir sahasında sıvılaşma analizi gerçekleştirmiştir. Bu analizleri, SPT, CPT, sismik kırılma, elektrik özdirenç, mikrotremör yöntemlerini kullanarak değerlendirmiştir.

Özçep (2010) yaptığı çalışmada, geoteknik ve jeofizik araştırmalarda sıvılaşma analizleri için A Microsoft Excel (R) spreadsheet (c) programını geliştirmiştir.

Tolon (2013) yaptığı çalışmada, karşılaştırmalı sayısal sıvılaşma analizi yapmıştır.

Akkaya (2017) yaptığı çalışmada, Kayma dalga hızları (Vs) kullanılarak Van Erciş ilçesinde üç farklı deprem durumu için sıvılaşma analizleri yapılmıştır.

Çetin (2018) yaptığı çalışmada, SPT tabanlı sismik zemin sıvılaşma tetikleme ilişkisi arasındaki farklılıkların detaylı incelenme yapmıştır.

Patel (2019) yaptığı çalışmada, jeoteknik araştırmalar ve zemin koşullarının iyileştirilmesi konusunda çalışmalar yapmıştır.

Demiröz (2021) yaptığı çalışmada, Konya Organize Sanayi Bölgesi zeminlerinin dinamik davranışlarının eşdeğer doğrusal analiz yöntemi ile araştırmıştır.

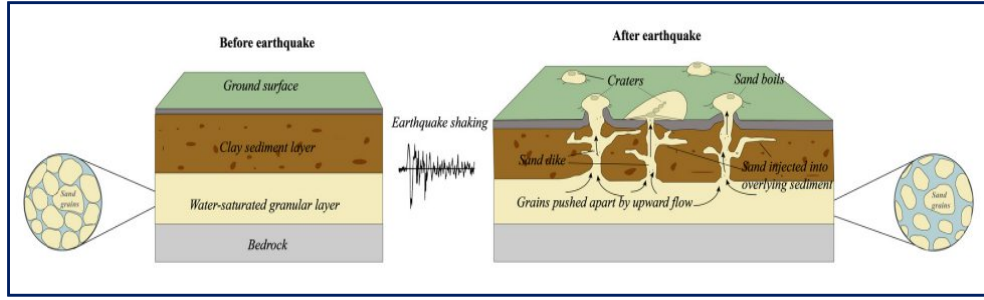
Chafale (2022) yaptığı çalışmada, sıvılaşmayı azaltmada ek yüklü zemin iyileştirilmesi hakkında inceleme yapmıştır. Toprak dinamikleri ve jeoteknik sorunların modellenmesi üzerinde detaylı bilgiler vermiştir.

Zorluer ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada, Kütahya ili Merkez ilçesine bağlı mahallelerinde sıvılaşma risk raporları oluşturulmuştur. SPT sonuçları ve zemin verilerinden elde edilen toplam 112 adet sondaj kuyusu incelenmiştir. Analiz verilerinden alınan sonuçların ortalaması alınarak, mahalleler için ortalama sıvılaşma oranları bulunmuştur.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

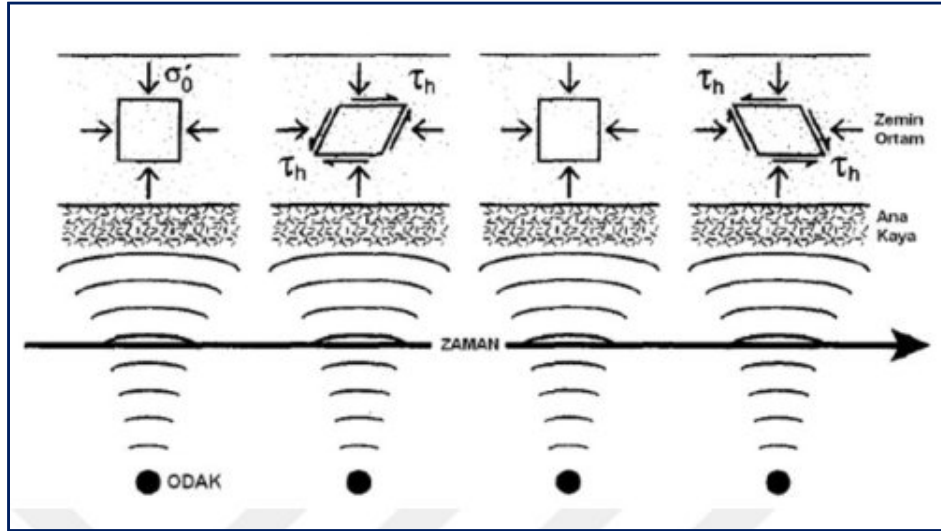
3.1.Sıvılaşma Kavramı Ve Mekanizması

Sıvılaşma, deprem dalgaları veya benzeri ani ve yoğun yüklemeler sonucu, zeminin dayanıklılığını, sertliğini ve sıkılığını yitirmesi anlamına gelir. Bu durum, siltli, kumlu bir başka deyişle daneli zeminlerde meydana gelmektedir (Şekil 3.1). Özellikle, kil bulunmayan kum ve siltler ve bazen çakıllar sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Deprem sırasında, dalgaların özellikle kayma dalgalarının suya doymuş daneli tabakalardan geçerken, dane yerleşim düzenini değiştirir, gevşek olarak bulunan danelerin göçerek yerleşmesine ve sıkışmasına sebep olur (Celep ve Kumbasar, 2000).



Şekil 3.1. Deprem sırasında zemin sıvılaşmasının kavramsal modelini gösteren şematik diyagram (Wang ve ark.,2023)

Zeminlerin statik yükleme sırasında sergiledikleri davranışların, dinamik yükleme altında sergilenen davranışlarla fark gösterebileceği, sıvılaşma ile ilgili açıklamalar yapılırken dikkate alınan önemli bir noktadır. Çevrimli yükleme altında bulunan bir zemin, statik koşullar altındaki yükleme durumu ile kıyaslandığında farklılık göstermektedir (Nas, 2013). Şekil 3.2’de sıvılaşmayı tetikleyen çevrimsel yükleme koşullarının meydana gelmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sıvılaşmayı tetikleyen çevrimsel yükleme koşullarının meydana gelmesi (Obermeier, 1996)

Gevşek bir zeminin uygulanan kayma gerilmeleri altında zemin tanelerinin birbirine yaklaşacağı bir başka değişle hacminin küçüleceği bilinmektedir. Dolayısıyla böyle bir zemine oturan yapılar, sıkı zeminlere göre daha fazla oturma yapar. Şekil 3.3a'da normal gerilmesi altındaki taneleri yuvarlak olarak basitleştirilmiş gevşek kum modeli, Şekil 3.3b'de ise bu zemine uygulanan T kesme kuvvetinden kaynaklanan kayma gerilmesi altında zemin tanelerinin hareketine bağlı olarak zemin hacminin küçülmesi gösterilmiştir (Özkan,2017). Kumlu zeminlerin kayma mukavemeti(direnci) Mohr-Coulomb denklemi, Denklem (3.1) ile ifade edilir.

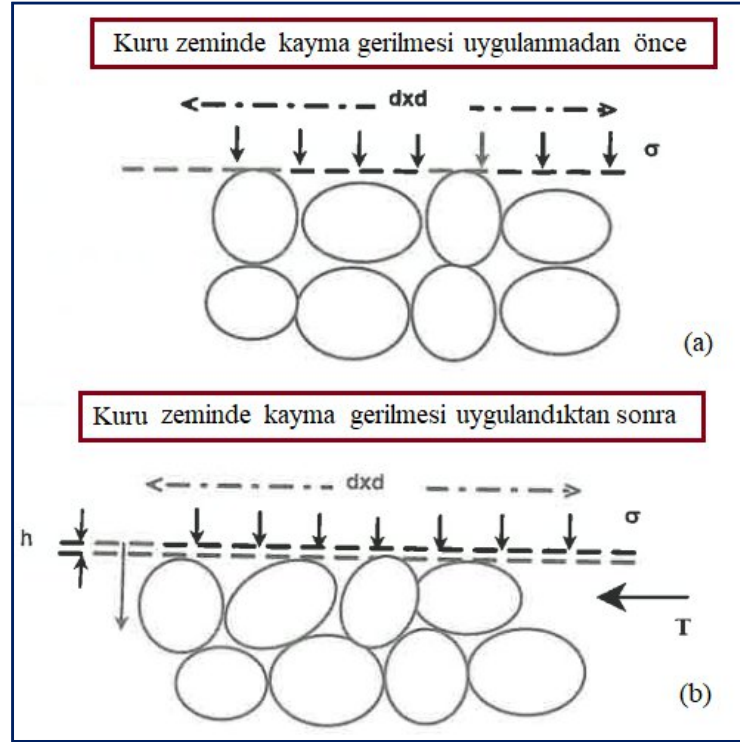
$$\tau = \sigma' \tan \varphi \quad (3.1)$$

Burada;

τ : kayma mukavemeti(direnci)

σ' : efektif gerilme

φ : kayma mukavemeti(direnci) açısıdır.



Şekil 3.3 a) Normal gerilme altındaki gevşek kum modeli b) Kesme kuvvetinden kaynaklanan kayma gerilmesi altında zemin tanelerinin hareketine bağlı olarak zemin hacminin küçülmesi (Özkan,2017)

Dolayısıyla çevrimsel deprem yükü altında her çevrimde bu etki daha da artacaktır. Bunun sonucunda zemin yeraltı suyu altında ise, zemin hacimce küçülme eğilimi gösterecek ancak suyun varlığı buna izin vermediği için tanelerin arasındaki temas zamanla kaybolacaktır. Taneler arasındaki temas kaybolunca (Şekil 3.4) çevrimsel yükler altında boşluk suyu basıncı artar ve efektif gerilme sıfıra yaklaşır. Sonuç olarak kayma direnci kaybolur. Bu durumda dayanımını yitiren zemin viskoz bir sıvı gibi davranmaya, başlar (Özkan,2017).

Statik koşulda Denklem (3.2), Dinamik koşulda; Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) ile ifade edilir.

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_s \quad (3.2)$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - (u_s + u_d) \quad (3.3)$$

$$(u_s + u_d) = \sigma_v \Rightarrow \sigma'_v = 0 \quad (3.4)$$

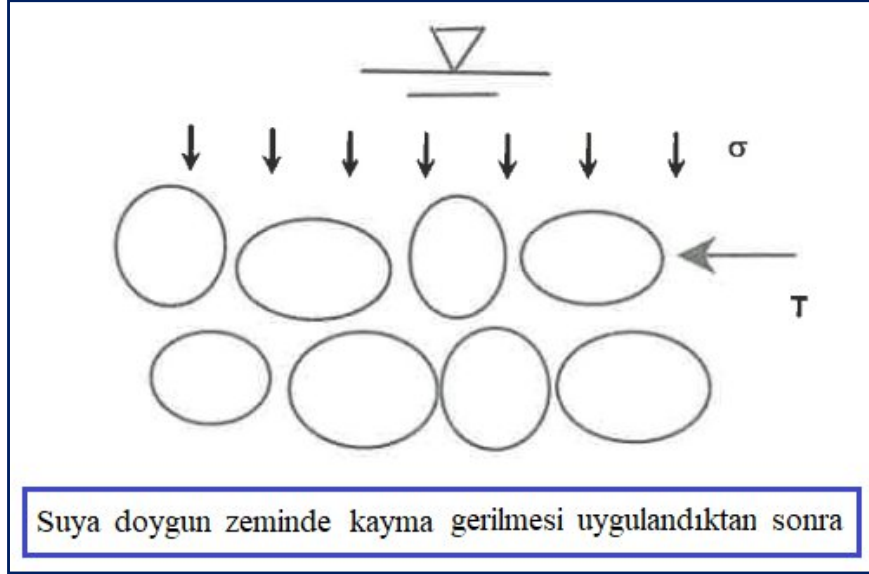
Burada;

σ_v : toplam gerilme

σ'_v : efektif gerilme

u_s : statik koşulda boşluk suyu basıncı

u_d : dinamik koşulda boşluk suyu basınç fazlalığı



Şekil 3.4. Suya doymun gevşek kumlu zeminde kayma gerilmesi altında zemin tanelerinin arasındaki temas kaybolması (Özkan,2017)

3.2.Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Depremler esnasında zemin sıvılaşmasının meydana gelmesi için gerekli olan jeolojik ve hidrojeolojik durumların yanı sıra zemin yapısı ve gerilim gibi farklı bazı unsurların da uygun olması şarttır (Youd, 1984).

Zemin sıvılaşması, doymun ve kohezyonsuz zeminlerde özellikle de gevşek yapıdaki kumlu zeminlerin sismik yüklemeler altında geçici olarak taşıma gücünü kaybederek viskoz bir sıvı davranması durumudur Seed-İdris, 1971). Sıvılaşma, zeminin tipi, yoğunluk durumu, deprem, yer altı su seviyesi, jeolojik koşullar gibi birçok nedene bağlı olarak gelişmektedir.

3.2.1. Zemin özelliklerinin sıvılaşmaya etkisi

3.2.1.1. Jeolojik koşullar

Kramer (1996) tarafından belirtildiğine göre, zeminlerin oluşumuyla ilgili jeolojik olayların türü sıvılaşma hassasiyetini önemli şekilde etkiler. Çoğu zaman yeraltı su seviyesi 20 m'den daha derin olduğunda sıvılaşma olasılığının olmadığı düşünülmektedir (Youd, 1984).

3.2.1.2. Zeminlerin maruz kaldıkları gerilme koşulları

Gerilmeler etkisi altında, zeminin tanelerinin daha iyi bir şekilde yerleştiği ve jeolojik süreçlerin etkisiyle çimentolaşmanın gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu durum, zeminin sıvılaşmaya karşı olan dayanımını çok önemli ölçüde arttırmaktadır (Seed, 1976).

3.2.1.3. Zeminin bileşimi ve sıklığı

Çakıl tane boyutundaki malzeme miktarının fazla olması durumunda, zemin oldukça geçirimli olmakta ve aşırı gözenek suyu basınçları gelişmeden gözeneklerdeki su miktarı ortamdan uzaklaşmaktadır. Önemli miktarda çakıl içeren (~%50) kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyeli olduğu (Youd ve ark., 1985) tarafından belirtilmektedir. Ayrıca suya doygun çakıllı zemin seviyelerinin az geçirimli seviyeler tarafından kapatılması halinde, gözenek suyu basıncındaki artış etkisini gösteremeyince ve zemin sıvılaşma problemi ile karşı karşıya kalmaktadır. Şekil 3.5'de, 9.2 büyüklüğündeki 1964 Alaska depremindeki sıvılaşma gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Alaskada sıvılaşma

3.2.1.4. Yeraltı su seviyesi derinliği

Yeraltı su seviyesi, zamana bağlı değişken bir hale sahipse zeminin sıvılaşma potansiyeli de buna paralel olarak değişir (Kumar, 2008).

3.2.1.5. Zeminin drenaj koşulları

Çevrimsel yüklemelerde, zemin içerisinde dağılmasına izin verilen boşluk suyu basıncı hızı sıvılaşmanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirleyen en kritik unsurlardan biridir (Wong ve ark., 1974).

3.2.1.6. Yer hareketlerinin sıvılaşmaya etkisi

Sıvılaşma çalışmalarında söz konusu zeminin sismik geçmişine dair bilgiler oldukça kritik bir rol oynamaktadır (Ferritto, 1997). Kuru kumlarda yatay titreşimler dikey titreşimlere kıyasla daha fazla oturmaları yol açmaktadır (Prakash ve Gupta, 1967).

3.3. Sıvılaşma Kökenli Hasar Tipleri

3.3.1. Kum kaynaması

Bir zemindeki boşluk suyu basıncının aşırı artması sebebiyle kum ve suyun yüzeye doğru hareket etmesiyle dışarı çıkması olayı kum kaynaması olarak tanımlanır

(Wang ve Law,1994). Şekil 3.6’da 1964 Niigata depreminde açıkça kum kayması etkileri görülmektedir. Şekil 3.7’de 2000 Tottori depreminde de kum kaynamaları meydana gelmiştir.



Şekil 3.6. Sıvılaşmaya bağlı kum kaynamalarının etkileri, Niigata, 1964 (Marcuson ve ark.,2007)



Şekil 3.7. 2000 Tottori depreminde oluşan kum kaymaları (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006)

3.3.2. Akma göçmesi

Akma göçmeleri genellikle üçüncü dereceden daha yüksek eğimlerde oluşur (Şekil 3.6). Bu tür göçmeler, sıvılaşmanın neden olduğu en yıkıcı göçmeler arasındadır. Ani bir şekilde meydana gelirler. Çoğu durumda, geniş bir zemin kütleinin şev boyunca aşağı yöndeki hareketini gösterirler (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006) Şekil 3.8’de

1971 depreminde The Lower San Fernando Barajında oluşan akma göçmesi bu duruma örnek gösterilebilir.



Şekil 3.8. 1971 depreminde The Lower San Fernando barajında oluşan akma göçmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

3.3.3. Yanal yayılma

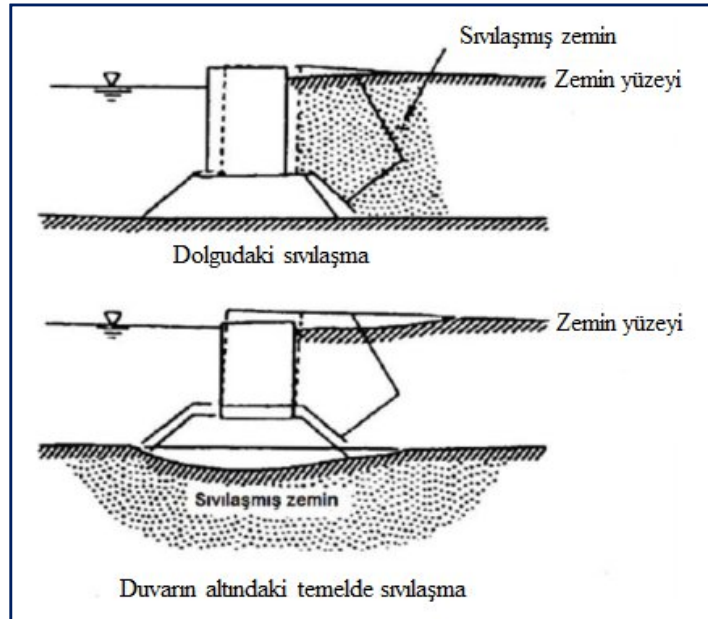
Yanal yayılımlar, alt tabakadaki zeminin sıvılaşma sonucunda zemin tabakalarının yatay yönde yer değiştirmesiyle oluşan bir deformasyon türüdür. Bu gibi olaylar, tipik dolgulara, liman tesislerine, boru hatlarına, köprülere ve yüzeysel temellere sahip diğer yapıların stabilitesini olumsuz etki vermektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006) Şekil 3.9’da 1989 Loma Prieta depreminde devlet parkı yakınlarında meydana gelen yanal yayılma örneği bu duruma örnek gösterilebilir.



Şekil 3.9.1989 Loma Prieta depreminde devlet parkı yakınında oluşan yanal yayılma (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006)

3.3.4. İstinat yapısı yenilmesi

Sıvılaşmış temel zeminindeki destek kaybı veya istinat yapısının arkasındaki sıvılaşmış zemin nedeniyle ortaya çıkan artan yan yükler bu duruma yol açar (Şekil 3.10). Bu etkilerin sonucunda istinat yapısı dikey veya yatay şekil değişikliklerine maruz kalır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu,2006). Şekil 3.11’de sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.10.İstinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998)



Şekil 3.11. Sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi (<https://dailycivil.com/soil-liquefaction-causes-effects-and-types/>)

3.3.5. Taşıma gücü kaybı

Temel zemini sıvılaşma sonucu dayanımını kaybeder. Zemin taşıma kapasitesi sıfıra düşer ve binalar zemine batmaya başlar. Bunun sonucunda yapılar batar, döner, yan yatar veya devrilme şeklinde hasar görebilir. (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Hindistan 1897 yılında Shillong depremi sırasında da Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi (<https://gharpedia.com/blog/soil-liquefaction/>)

Şekil 3.13’de 1999 Türkiye depreminde Adapazarı ilinde sıvılaşma sonucu devrilen binalar görülmektedir.



Şekil 3.13. 1999 Türkiye depreminde Adapazarı ilinde sıvılaşma sonucu devrilen binalar (http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/d50601b7bc18501_ek.pdf)

Şekil 3.14’de 1964 Niiagata depreminde sıvılaşma sonucu devrilen binalar görülmektedir (Youd, 1984).



Şekil 3.14. 1964 Niiagata depremi (Youd, 1984)

3.4.Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Analizi

3.4.1. Basitleştirilmiş sıvılaşma analizi

Zeminlerin gerilme esaslı sıvılaşma hassasiyetinin değerlendirilmesi için basitleştirilmiş prosedür geliştirme çalışmaları ilk olarak Seed ve Idriss (1971) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, deprem sırasında zeminin sıvılaşmaya karşı güvenliği, zeminin çevrimsel direnç oranının (CRR), depremin etkisinin bir çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile kıyaslanmaktadır. Deprem sırasında oluşan tekrarlı gerilme oranı, Seed ve Idriss (1971) tarafından Denklem (3.5) ile ifade edilir.

$$CSR = 0.65 * \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} * a_{max} * r_d \quad (3.5)$$

Burada;

g : Yerçekimi ivmesi

σ_0 ve σ'_0 : Sıvılaşma değerlendirmesinin yapıldığı derinlikteki (z) toplam ve efektif gerilme

r_d : Gerilme azalım katsayısıdır.

Denklem (3.6a) ve Denklem (3.6b)'de verilen derinliğe bağlı ifadelerden belirlenmektedir (Liao ve Whitman 1986).

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

(3.6a)

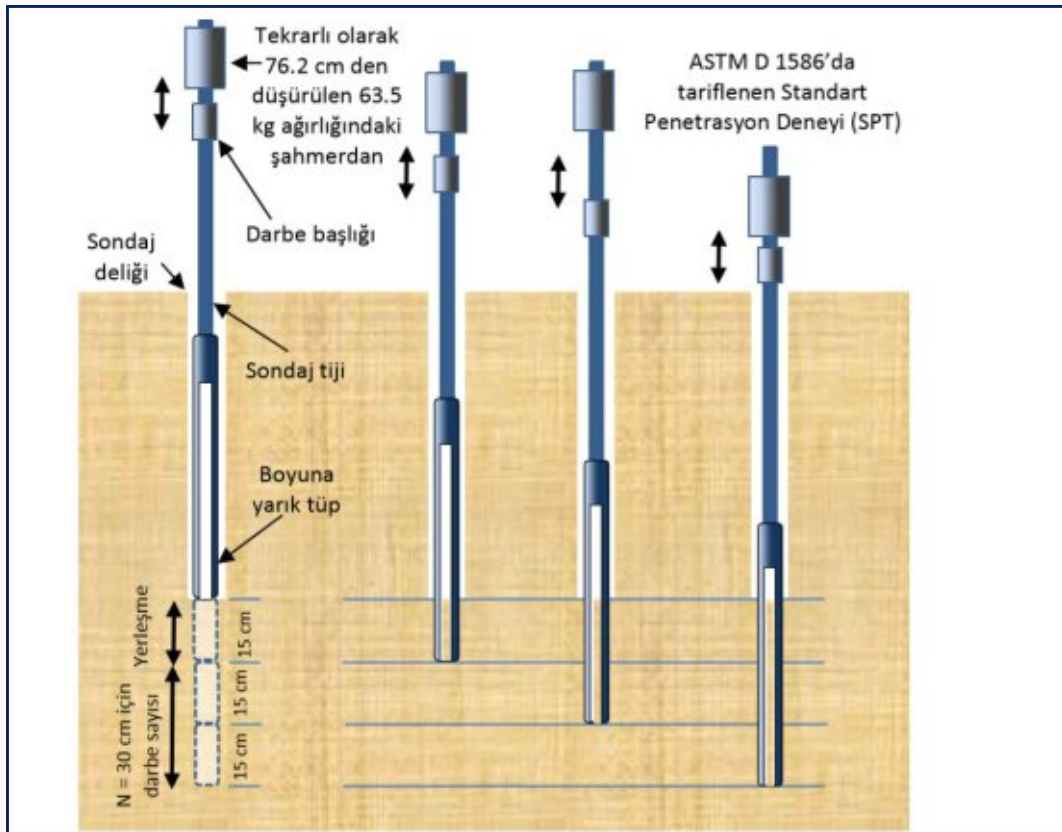
$$r_d = 1.174 - 0.0267 * z \quad 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$$

(3.6b)

3.5. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'E Göre Sıvılaşma Analizi

3.5.1. Standart Penetrasyon Test (SPT) dayalı sıvılaşma analizi

Standart penetrasyon deneyi, yeraltı ortamının mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan ve tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan bir saha deneyidir. Günümüzde zemin türünü, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin sıkılık, mukavemet (dayanım), kıvam ve sıvılaşma durumu ile temel zemininin taşıma kapasitesi ve tahmini oturmayı belirlemekte kullanılır (Clayton ve ark., 1995). SPT deney düzeneği en uçta ‘boyuna yarık tüp’ olarak bilinen standart örnek alıcısının bağlı olduğu tijlerin üzerine, 63,5 kg ağırlığındaki bir şahmerdanın 76,2 cm yükseklikten tekrarlı bir şekilde bırakılarak kuyu tabanından toplamda 45 cm’lik itilme sağlanana kadar çakılması ve bunun için gerekli olan darbe sayısı (SPT-N) değerlerinin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Şekil 3.15’de Standart penetrasyon deneyi aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.15. Standart penetrasyon deneyi aşamaları (FHWA, 2002b)

Sondaj sırasında yapılan standart penetrasyon deneyi (SPT) üzerine yapılan araştırmalarda bazı fiziksel faktörlerin deney üzerinde etkili olduğu ve deney sonuçlarının belirli bir ortak standartta değerlendirilebilmesi için deney sonuçlarını etkileyen bazı faktörler ile ilgili düzeltmeler önerilmiştir (Çizelge 3.1). 100 kPa’lık örtü basıncı ve %

60 enerji verimliliği için düzeltilmiş SPT-N değerleri, $(N_1)_{60}$, Denklem (3.7) ile ifade edilir.

$$(N_1)_{60} = N * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (3.7)$$

Burada;

$(N_1)_{60}$: Enerji oranına göre düzeltilmiş SPT darbe miktarı

N: Sahada ölçülen SPT darbe miktarı

C_N : Üst tabaka yükü düzeltme faktörü

C_E : Enerji oranı düzeltme faktörü

C_B : Kuyu çapı düzeltme faktörü

C_R : Tij boyu düzeltme faktörü

C_S : Numune alma metodu düzeltme faktörüdür.

Çizelge 3.1. SPT düzeltme faktörleri (TBDY,2018)

Düzeltilme Faktörü	Ekipman Değişkeni	Düzeltilme Değeri
Örtü basıncı (C_N)	-	$(95.76/\sigma'_V) \ll 1.7$
Enerji oranı (C_E)	Halkalı tokmak Güvenli tokmak Otomatik darbeli tokmak	0.45 – 1.00 0.60 – 1.17 0.90 – 1.60
Sondaj delgi çapı (C_B)	65 – 115 mm 150 mm 200 mm	1.0 1.05 1.15
Tij boyu (C_R)	3 – 4 m 4 – 6 m 6 – 10 m 10 – 30 m	0.75 0.85 0.95 1.0
Numune alıcı tipi (C_S)	Standart numune alıcı İç tüpü olmayan numune alıcı	1.0 1.1 – 1.3

İnce dane oranı %5'den az olan temiz kumlar (FC £ %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 3.16) olarak tanımlanmakta ve bu durum için tekrarlı direnç oranı ($CRR_{7.5}$) Denklem (3.8) ile ifade edilir.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(10 * N_{1,60f} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3.8)$$

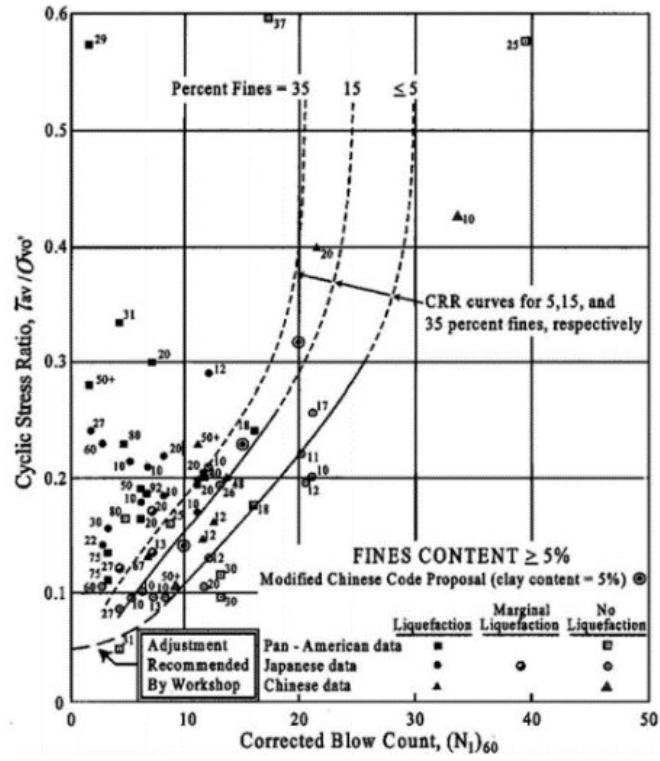
Kum içerisindeki ince dane miktarı artışı zeminin tekrarlı kayma direncini artırmaktadır. 100 kPa'lık örtü basıncı ve 7.5 büyüklüğündeki deprem için, ince dane oranının % 5'den fazla olması durumunda düzeltilmiş $(N_1)_{60}$ değerleri Denklem (3.9) kullanılarak eşdeğer temiz kum değerlerine $N_{1,60f}$ dönüştürülmektedir. Burada α ve β ifadeleri ince dane oranına bağlı olarak Denklem (3.10a), Denklem (3.10b) ve Denklem (3.10c)'de verilmiştir.

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta * N_{1,60} \quad (3.9)$$

$$\alpha = 0, \beta = 1 \quad IDI \leq \%5 \quad (3.10a)$$

$$\alpha = \exp [1.76 - (190/IDI^2)], \beta = 0.99 + IDI^{1.5}/1000 \quad \%5 < IDI < \%35 \quad (3.10b)$$

$$\alpha = 5, \beta = 1.2 \quad IDI \geq \%35 \quad (3.10c)$$

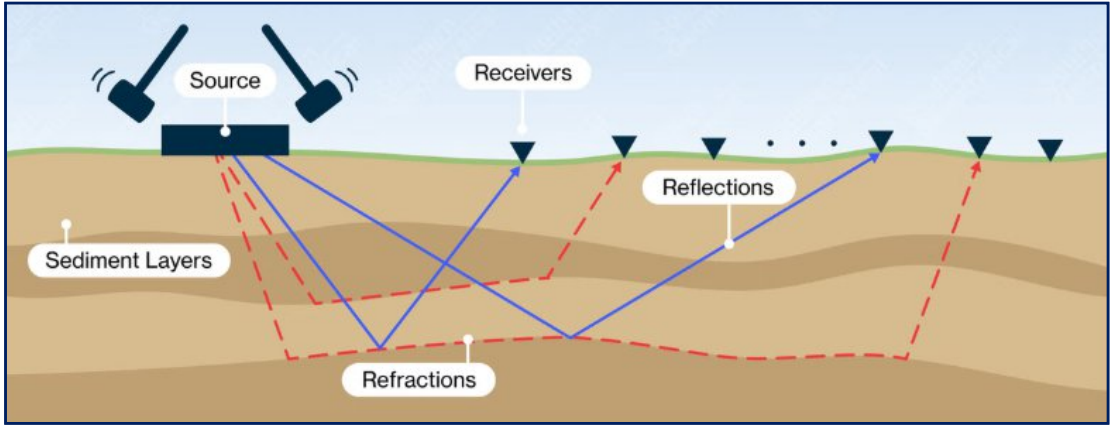


Şekil 3.16. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı (Youd ve ark., 2001)

3.6. Andrus Ve Stokoe (2000) Yöntemine Göre Kayma Dalga Hızı(Vs)

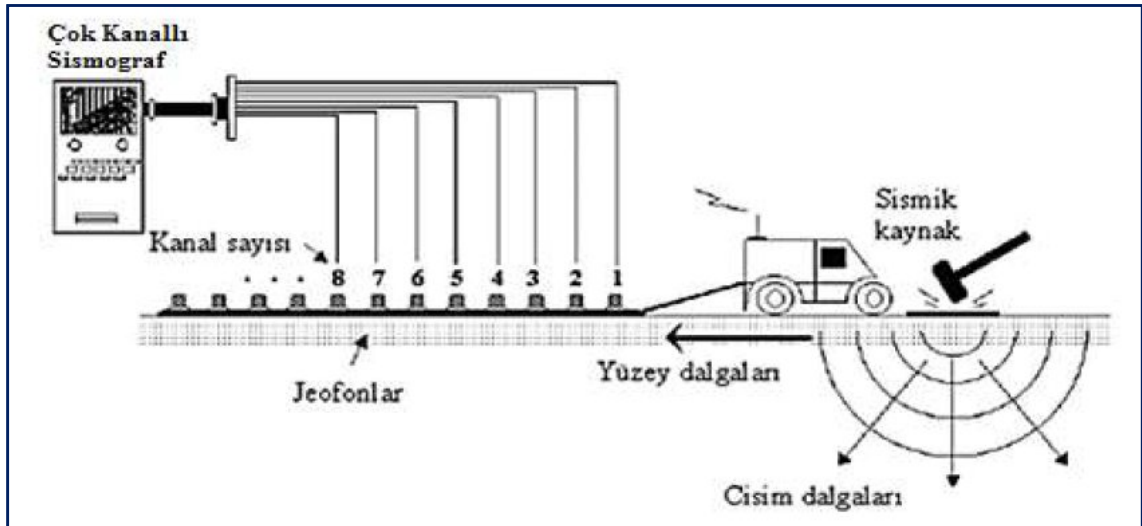
Dayalı Sıvılaşma Analizi

Sismik Kırılma Yöntemi, yeraltına gönderilen sismik dalganın kırılarak alıcılara (jeofon) gelmesi sonucu yer içinden geçen dalganın seyahat zamanının ölçülmesi ile tabaka hızlarının bulunması esasına dayanır. Bu hızlar kullanılarak tabakaların dinamik elastik özelliklerini yansıtan parametreler hesaplanır. Şekil 3.17’de sismik kırılma yönteminde kullanılan kaynak ve jeofonların yerleşim düzeni gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Sismik kırılma ve sismik yansıma arazide uygulanişı
(<https://www.southerngeophysical.co.nz/seismic-reflection-and-refraction/>)

Yeraltı tabakalarının fiziksel özellikleri makaslama (S) hızı ile doğrudan ilişkili parametrelerdir. Bu nedenle, yeraltı tabakalarının S-hızı değişimlerinin belirlenmesi geoteknik mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Yer in sığ sismik hız özelliklerini ortaya koymak için son yıllarda en çok kullanılan tekniklerden biri MASW tekniğidir (Park ve ark., 1999). Sismik kırılma yöntemi ile ölçü alımında kullanılan dizilim geometrisi korunarak MASW kayıtları toplanabilmekte ve daha büyük araştırma derinliği elde edilebilmektedir. Çok- kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeneği Şekil 3.18’de görölmektedir.



Şekil 3.18. Çok- kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeneği (Park ve ark., 1998)

Sismik deneylerle elde edilen kayma dalgası hızına bağlı olarak sıvılaşıma direnci Andrus ve Stokoe (2000) tarafından Denklem (3.11) ile ifade edilir.

$$CRR_{7.5} = 0.022 * \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 * \left[\left(\frac{1}{215 - V_{S1}} \right) - \left(\frac{1}{215} \right) \right] \quad (3.11)$$

Bu yöntemde öncelikle, S-dalga hızının (V_{S1}) sıvılaşma hesaplarında kullanılmasında bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir (Şekil 3.19). Burada düşey gerilmeye göre kayma dalgası hızı için üst tabaka yükü, düzeltilmesi S-dalga hızı (V_{S1}), Denklem (3.12) ile ifade edilir.

$$V_{S1} = (P_a / \sigma'_0)^{0.25} \quad (3.12)$$

Burada;

P_a ; 100 kPa'a tekabül eden atmosferik basınç,

σ'_0 ; Düşey efektif gerilme (kPa)

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

İnce dane oranına (FC) bağlı olarak sıvılaşma direnci sıvılaşma direnci Denklem (3.13) ve Denklem (3.14) ile ifade edilir.

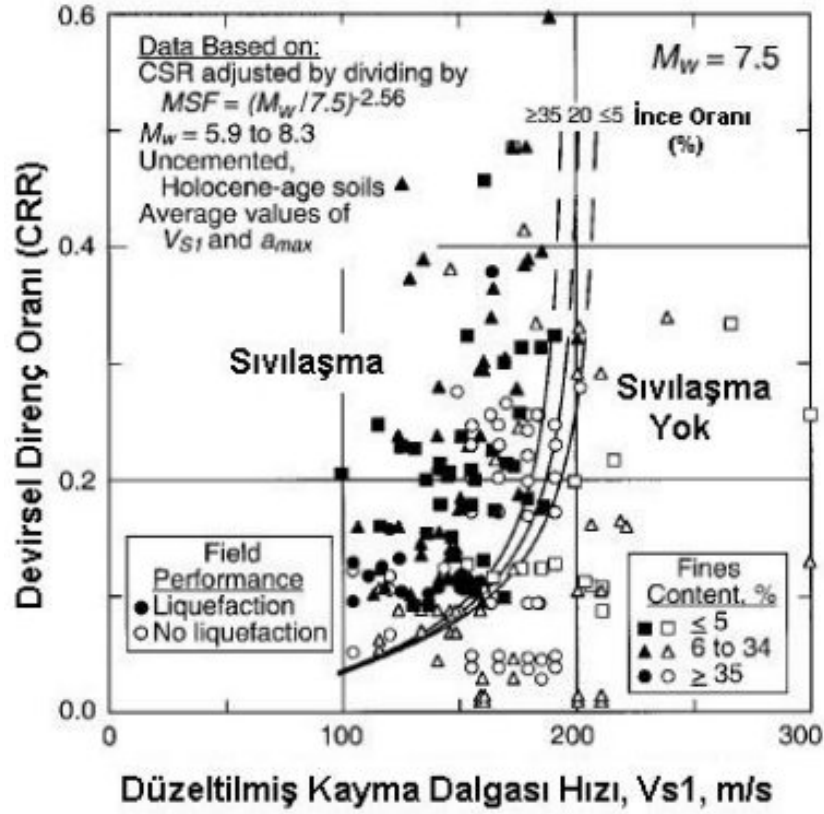
$$\%5 < F.C. < \%35 \quad (3.13)$$

$$CRR_{7.5} = 0.022 * \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 * \left[\left(\frac{1}{215 - 0.5(FC - 5) - V_{S1}} \right) - \left(\frac{1}{215 - 0.5(FC - 5)} \right) \right]$$

$$F.C. \gg 35 \quad (3.14)$$

$$CRR_{7.5} = 0.022 * \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 * \left[\left(\frac{1}{200 - V_{S1}} \right) - \left(\frac{1}{200} \right) \right]$$

F.C. $\gg$ 35



Şekil 3.19. Büyüklüğü 7,5 deprem için temiz ve siltli kumlar için düzeltilmiş Vs - CSR Abağı (Andrus ve Stokoe, 1999)

3.7. Sıvılaştırma Güvenlik Koşulu

Zeminler, deprem sırasında titreşimli veya devirli yükler nedeniyle oluşan gerilmeye tepki olarak mukavemet ve rijitliğini büyük ölçüde kaybettiğinde, normalde katı bir malzeme iken sıvı gibi davranmaya başlarlar. Sıvılaştırma olarak tanımlanan bu durumda depremin oluşturduğu tekrarlı yükleme ve zeminlerin sıvılaştırma direnç özellikleri ortaya konulduktan sonra değerlendirme yapılabilir. Dolayısıyla, sıvılaştırma potansiyelinin değerlendirilmesi belirli bir zemin profili için yükleme ile direnç arasında bir karşılaştırma yapmaya yöneliktir. Sonuçta, zeminin sıvılaştırmaya karşı devirsel direnç oranı (CRR) ile depremden kaynaklanan devirsel kayma gerilmesi oranı (CSR) kullanılarak güvenlik faktörü belirlenmektedir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre sıvılaştırmaya karşı güvenlik koşulu Denklem (3.15) ile hesaplanır. Denklem (3.15) ile verilen koşul sağlanmaz ise “Sıvılaştırma Olabilir”, koşul sağlanır ise “Sıvılaştırma Yok” olarak ifade edilmektedir.

$$FS_L = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \gg 1.10 \quad (3.15)$$

Burada;

τ_R : Sıvılaşma direnci

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

$$\tau_R = CRR_{M7.5} \cdot C_M \cdot \sigma_{v0} \quad (3.16)$$

$$\tau_{deprem} = 0.65 \cdot \sigma_{v0} \cdot (0.4S_{DS}) \cdot r_d \quad (3.17)$$

$$C_M = (M_w/7.5)^{-2.56} \quad (3.18)$$

Burada;

σ_{v0} : Toplam düşey gerilme

r_d : Gerilme azaltma katsayısı

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısıdır.

C_M : Deprem magnitüdü düzeltme faktörüdür.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, Batman kent merkezinde bir sahanın deprem sırasında dinamik yükler altında meydana gelebilecek zemin sıvılaşması analizleri gerçekleştirilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre Standard Penetrasyon Test (SPT) ve Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı (V_s) dayalı zemin sıvılaşması analiz yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

İnceleme alanındaki zemin sıvılaşması probleminin belirlenmesi ve çözümüne yönelik zemin iyileştirme önlemlerinin alınması ile ilgili tartışılmıştır.

4.1. İnceleme Alanı Hakkında Genel Bilgiler

İnceleme alanının yer aldığı Batman kenti 41 derece 10 dakika ve 41 derece 40 dakika doğu boylamları ile 38 derece 40 dakika ve 37 derece 50 dakika kuzey enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 4.1).

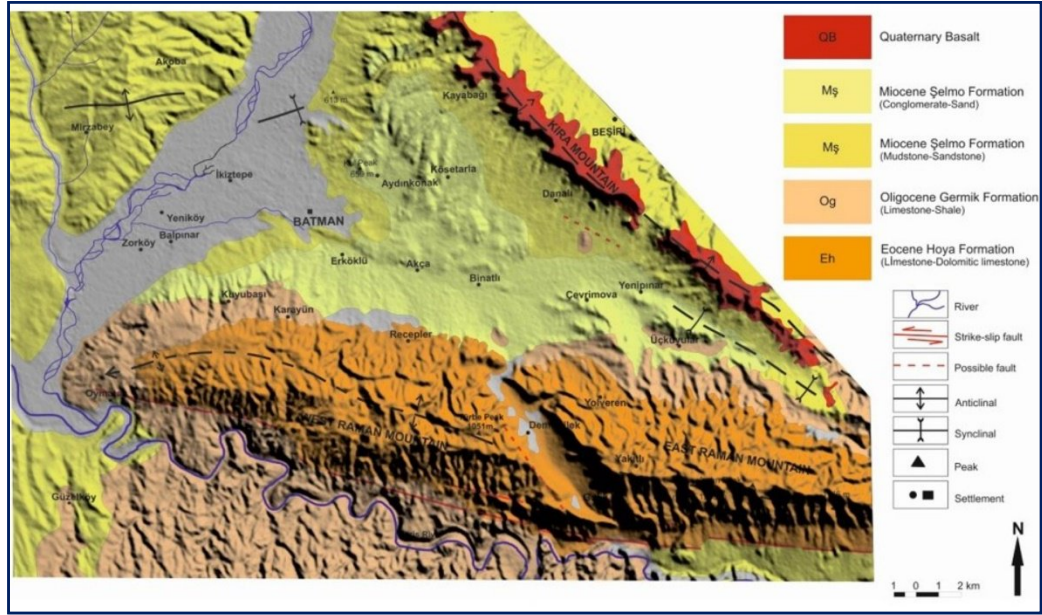


Şekil 4.1. İnceleme alanı yerbulduru haritası (ArcGIS Earth'den düzenlenmiştir)

4.2. Bölgenin Jeolojisi Ve Tektonik Özellikleri

İnceleme alanında genel olarak Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yaygın olup Batman kent merkezine kadar uzanmaktadır. Batman kentinin güneyinde bulunan Raman

antiklinalinde sürekli olarak güneye itilen Dicle Nehrinin güneyinde geniş bir alanda Oligo-Miyosen yaşlı Hoya Formasyonu (kireçtaşı-dolomitik kireçtaşı), yüzeylenmektedir. Dicle Nehrinin kuzeyinde ise Miyo-Pliyosen depolarından oluşmuş Şelmo Formasyonu (konglomera-kumtaşı-çamurtaşı) geniş bir alan kaplamaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. İnceleme alanı jeoloji haritası (Dedeoğlu ve ark., 2023)

4.3.İnceleme Alanında Yapılan Geoteknik Araştırmalar

İnceleme alanında zeminin karakteristik ve jeolojik özellikleri ile mühendislik parametrelerinin tespiti amacıyla jeolojik çalışmalar kapsamında; 4 adet toplamda 80 metre olmak üzere temel sondaj kuyuları açılmıştır. Jeofizik çalışmalar kapsamında; 2 MASW ve 2 adet sismik (P ve S) serim çalışması yapılmıştır (Şekil 4.3). Sondaj kuyularının açılması sırasında geçilen zemin tabakalarının fiziksel ve mekanik niteliklerini belirlemek amacıyla SPT ve UD numuneleri alınmıştır. Çalışma sahasının zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir. Şekil 4.4’de inceleme alanında uygulanan sondaj çalışmaları Şekil 4.5’de ise ölçüm alınan sismik profillerin lokasyonları gösterilmiştir.



Şekil 4.3. İnceleme alanında sondaj kuyuları ve sismik profiller



Şekil 4.4. İnceleme alanında uygulanan sondaj görüntüleri



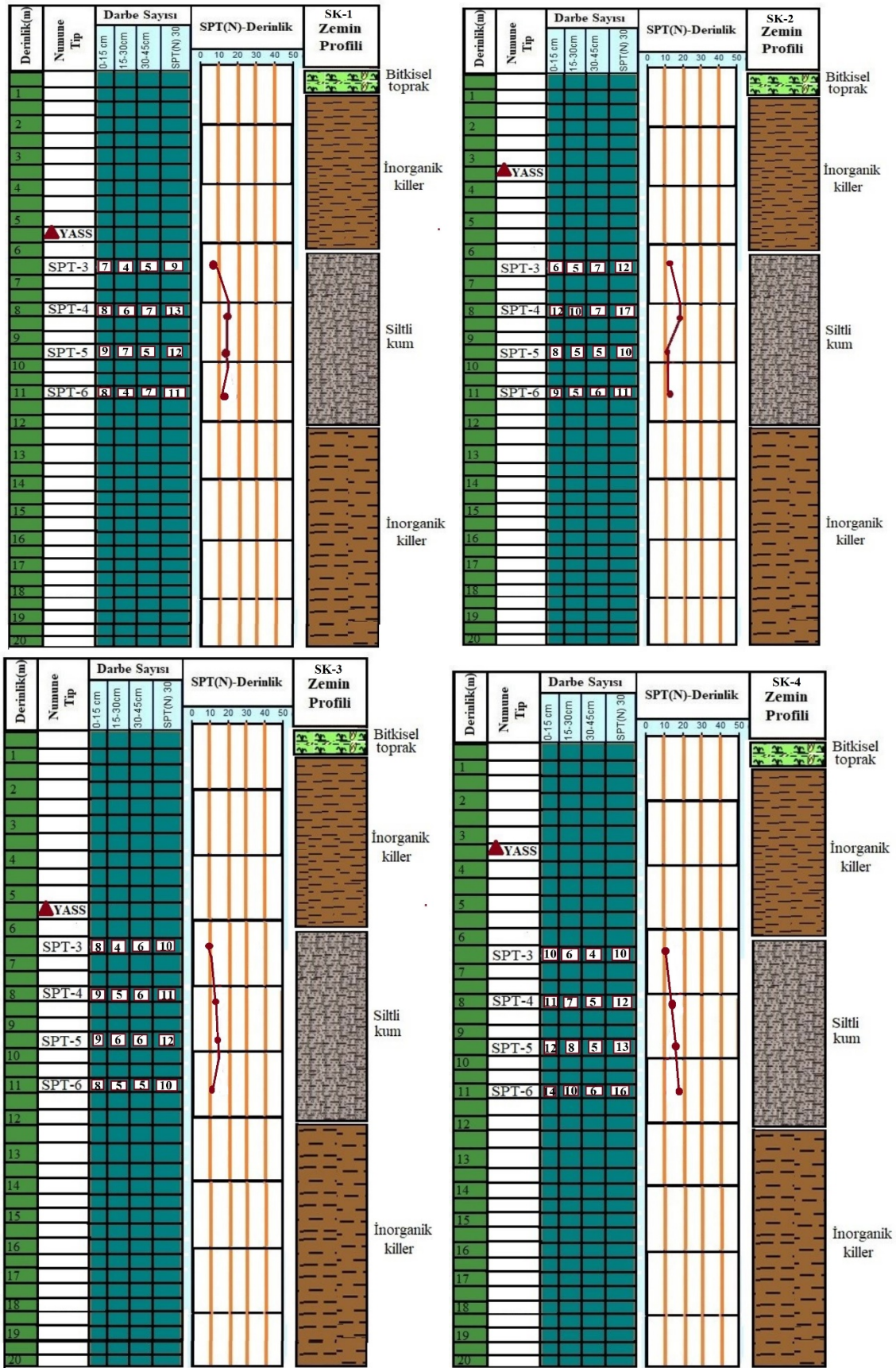
Şekil 4.5. İnceleme alanında uygulanan jeofizik ölçüm görüntüleri

Sahadaki temel sondaj kuyularının (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4) derinliği ve yeraltı suyu seviyeleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.6’da ise (SPT-N) darbe sayılarının derinlikle değişim ve ortalama N_{30} değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1.İnceleme alanında açılan sondaj kuyularının derinlikleri

SONDAJ NO	DERİNLİK (m)	Yeraltı su seviyesi (YASS)
SK-1	20	5
SK-2	20	3
SK-3	20	5
SK-4	20	3

Çalışma sahasında; genel olarak; 0.00-0.50 metre bitkisel toprak, 0.50-6.50 inorganik killler (düşük ile orta plastisitede) çakıllı killler, kumlu killler, siltli killler, 6.5 m-11.45 m siltli kum, 11.45 m-20.00 m inorganik killler (düşük ila orta plastisitede) çakıllı killler, kumlu killler, siltli killler hakimdir.



Şekil 4.6. Sondaj logları ve SPT değerleri

4.3.1. Laboratuvar deneyleri

Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularından (SK-1,SK-2,SK-3,SK-4) 6.5 metrede elde edilen numunelerin, su içeriği (%) ve doğal birim hacim ağırlık (kN/m^3) laboratuvar deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çalışma sahasında açılan sondaj kuyularından 6.5metrede (SK-1,SK-2,SK-3,SK-4) elde edilen numunelerin laboratuvar deney sonuçları

Sondaj No.	Derinlik (m)	Su İçeriği (%)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Zemin Sınıfı
				USCS
SK-1	6.5	10.87	18.3	SM
SK-2	6.5	12.54	18.3	SM
SK-3	6.5	12.53	18.3	SM
SK-4	6.5	14.35	18.3	SM

4.4. Çalışma Sahasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)’E Göre Sıvılaşma Analizleri

4.4.1. Standart Penetrasyon Test (SPT) dayalı sıvılaşma analizi ($M_w=6,5$ için)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında, sondaj sırasında yapılan standart penetrasyon deneyi (SPT) üzerine yapılan analizlerde, muhtemel sıvılaşma beklenen çalışma sahasında tasarım deprem büyüklüğü 6.5, Kısa periyot (0.2s) boyutsuz tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) 0.485 ve maksimum yüzey ivmesi 0.139 g alınarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Standart Penetrasyon Test (SPT-N)’e göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, SK-1, SK-2, SK-3 ve SK-4 sondaj kuyularından elde edilen parametrelere göre (Çizelge4.3, Çizelge4.4, Çizelge4.5 ve Çizelge4.6) zeminin kayma gerilmesi (τ_r) ve deprem kayma gerilmesi (τ_{deprem}) oranlanmasıyla Güvenlik Katsayıları (GK) elde edilmiştir.

Çalışma sahasında SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.83-0.97 aralıklarında (Çizelge 4.3) 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 6.50-11.45

m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.83-0.97 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.71-1.05 aralıklarında (Çizelge 4.4) 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.71-1.05 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-3 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.73-0.87 aralıklarında (Çizelge 4.5) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-3 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 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.73-0.87 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.79-0.87 aralıklarında (Çizelge 4.6) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-4 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 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.79-0.87 aralığında hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Çalışma sahasında açılan SK-1 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI				Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $FS_L = \tau_R / \tau_{\text{deprem}} \geq 1.10$
Derinlik(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	Δvo	δvo'	α	β	CRR _{M=6,5}	C _M	τ _R	R _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	9	6.15	6.34	18.3	21.1	7.1	0.96	0.95	1	1	0.75	118.95	104.23	0.13	1.01	0.08	1.44	12.01	0.95	14.25	0.84	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	13	8.33	8.78	18.3	21.1	8.3	0.90	0.95	1	1	0.75	146.40	116.97	0.37	1.01	0.10	1.44	16.84	0.94	17.35	0.97	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	12	7.35	7.48	18.3	21.1	6.4	0.86	0.95	1	1	0.75	173.85	129.71	0.06	1.01	0.09	1.44	16.81	0.92	20.17	0.83	Sıvılaşma Beklenir
11.0-11.45	11	6.76	6.77	18.3	21.1	5.2	0.82	1	1	1	0.75	201.30	142.44	0.01	1.00	0.09	1.44	18.46	0.88	22.34	0.83	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.4. Çalışma sahasında açılan SK-2 sondaj kuyusu için, yeraltı 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 $FS_L = \tau_R / \tau_{\text{deprem}} \geq 1.10$
Derink(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	Δvo	δvo'	α	β	CRR _{M=6,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	12	9.06	9.31	18.3	21.1	6.1	1.06	0.95	1	1	0.75	118.95	84.62	0.03	1.01	0.11	1.44	13.4	0.95	14.25	0.94	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	17	11.9	12.27	18.3	21.1	7.3	0.99	0.95	1	1	0.75	146.40	97.35	0.16	1.01	0.13	1.44	18.22	0.94	17.35	1.05	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	10	6.64	7.03	18.3	21.1	5.7	0.93	0.95	1	1	0.75	173.85	110.08	0.36	1.00	0.09	1.44	14.27	0.92	20.17	0.71	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	11	7.26	7.3	18.3	21.1	5.6	0.88	1	1	1	0.75	201.30	122.82	0.01	1.00	0.09	1.44	15.92	0.88	22.34	0.71	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.5. Çalışma sahasında açılan SK-3 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI				Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $FS_L = \tau_R / \tau_{\text{deprem}} \geq 1.10$
Derinlik(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	δ _{vo}	δ _{vo'}	α	B	CRR _{M=6,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	10	6.84	7.13	18.3	21.1	7.6	0.96	0.95	1	1	0.75	118.95	104.24	0.22	1,01	0.08	1.44	12.01	0.95	14.25	0.84	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	11	7.06	7.17	18.3	21.1	6.1	0.90	0.95	1	1	0.75	146.40	116.97	0.04	1,01	0.09	1.44	15.16	0.94	17.35	0.87	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	12	7.35	7.37	18.3	21.1	5.8	0.86	0.95	1	1	0.75	173.85	129.71	0.02	1,00	0.09	1.44	16.81	0.92	20.17	0.83	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	10	6.15	6.36	18.3	21.1	7.2	0.82	1	1	1	0.75	201.30	142.44	0.15	1,01	0.08	1.44	16.41	0.88	22.34	0.73	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.6. Çalışma sahasında açılan SK-4 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 3 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI				Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $FS_L = \tau_R / \tau_{\text{deprem}} \geq 1.10$
Derinlik(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	Δvo	δvo'	α	β	CRR _{M=6,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	10	7.55	7.89	18.3	21.1	7.8	1.06	0.95	1	1	0.75	118.95	84.62	0.26	1.01	0,1	1.44	11.58	0.95	14.25	0.81	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	12	8.46	8.6	18.3	21.1	6.5	0.99	0.95	1	1	0.75	146.40	97.35	0.06	1.01	0,1	1.44	14.02	0,94	17.35	0.81	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	13	8.61	8.62	18.3	21.1	5.2	0.93	0.95	1	1	0.75	173.85	110.09	0.01	1.00	0.10	1.44	15.85	0.92	20.17	0.79	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	16	10.56	10.75	18.3	21.1	6.7	0.88	1	1	1	0.75	201.30	122.82	0.08	1.01	0.12	1.44	19.5	0.88	22.34	0.87	Sıvılaşma Beklenir

4.4.2. Standart Penetrasyon Test (SPT) dayalı sivilaşma analizi ($M_w=7,5$ için)

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}) 0.485 ve maksimum yüzey ivmesi 0.139 g alınarak sivilaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Standart Penetrasyon Test (SPT-N)'e göre yapılan sivilaşma analizlerinde, SK-1, SK-2, SK-3 ve SK-4 sondaj kuyularından elde edilen parametrelere göre (Çizelge 4.7, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10) zeminin kayma gerilmesi (τ_r) ve deprem kayma gerilmesi (τ_{deprem}) oranlanmasıyla Güvenlik Katsayıları (GK) elde edilmiştir.

Çalışma sahasında SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sivilaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.57-0.67 aralıklarında (Çizelge 4.7) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sivilaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sivilaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.57-0.67 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sivilaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.49-0.73 aralıklarında (Çizelge 4.8) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sivilaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sivilaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.49-0.73 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-3 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sivilaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.51-0.61 aralıklarında (Çizelge 4.9) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-3 sondaj kuyusu lokasyonu sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sivilaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sivilaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.51-0.61 aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0,55-0,66 aralıklarında (Çizelge 4.10) hesaplanmıştır. Dolayısıyla SK-4 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 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0,55-0,66 aralığında hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7. Çalışma sahasında açılan SK-1 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI				Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $FS_L = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$
Derinlik(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	δ _{vo}	δ _{vo'}	α	β	CRR _{M=7,5}	C _M	τ _R	R _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	9	6.15	6.34	18.3	21.1	7.1	0.96	0.95	1	1	0.75	118.95	104.23	0.13	1.01	0.08	1	8.34	0.95	14.25	0.59	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	13	8.33	8.78	18.3	21.1	8.3	0.90	0.95	1	1	0.75	146.40	116.97	0.37	1.01	0.10	1	11.69	0.94	17.35	0.67	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	12	7.35	7.48	18.3	21.1	6.4	0.86	0.95	1	1	0.75	173.85	129.71	0.06	1.01	0.09	1	11.67	0.92	20.17	0.58	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	11	6.76	6.77	18.3	21.1	5.2	0.82	1	1	1	0.75	201.30	142.44	0.01	1.00	0.09	1	12.82	0.88	22.34	0.57	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.8. Çalışma sahasında açılan SK-2 sondaj kuyusu için, yeraltı 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 $FS_L = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$
Derink(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	δvo	δvo'	α	β	CRR _{M=7,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	12	9.06	9.31	18.3	21.1	6.1	1.06	0.95	1	1	0.75	118.95	84.62	0.03	1.01	0.11	1	9.31	0.95	14.25	0.65	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	17	11.9	12.27	18.3	21.1	7.3	0.99	0.95	1	1	0.75	146.40	97.35	0.16	1.01	0.13	1	12.66	0.94	17.35	0.73	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	10	6.64	7.03	18.3	21.1	5.7	0.93	0.95	1	1	0.75	173.85	110.08	0.36	1.00	0.09	1	9.91	0.92	20.17	0.49	Sıvılaşma Beklenir
11.0-11.45	11	7.26	7.3	18.3	21.1	5.6	0.88	1	1	1	0.75	201.30	122.82	0.01	1.00	0.09	1	11.05	0.88	22.34	0.49	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.9. Çalışma sahasında açılan SK-3 sondaj kuyusu için, yeraltı su seviyesi (YASS) 5 metrede, SPT yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

SIVILAŞMA ANALİZİ																SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESABI				Deprem Kayma Gerilmesi		TBDY-2018'e göre $FS_L = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$
Derinlik(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	δ _{vo}	δ _{vo'}	α	B	CRR _{M=7,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	10	6.84	7.13	18.3	21.1	7.6	0.96	0.95	1	1	0.75	118.95	104.24	0.22	1,01	0.08	1	8.34	0.95	14.25	0.59	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	11	7.06	7.17	18.3	21.1	6.1	0.90	0.95	1	1	0.75	146.40	116.97	0.04	1,01	0.09	1	10.53	0.94	17.35	0.61	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	12	7.35	7.37	18.3	21.1	5.8	0.86	0.95	1	1	0.75	173.85	129.71	0.02	1,00	0.09	1	11.67	0.92	20.17	0.58	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	10	6.15	6.36	18.3	21.1	7.2	0.82	1	1	1	0.75	201.30	142.44	0.15	1,01	0.08	1	11.4	0.88	22.34	0.51	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.10. Çalışma sahasında açılan SK-4 sondaj kuyusu için, yeraltı 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 $FS_L = \tau_R / \tau_{deprem} \geq 1.10$
Derinlik(m)	N	N _{1,60}	N _{1,60f}	γ _k	γ _d	IDI%	C _N	C _R	C _S	C _B	C _E	δ _{vo}	δ _{vo'}	α	β	CRR _{M=7,5}	C _M	τ _R	r _d	τ _{deprem}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	10	7.55	7.89	18.3	21.1	7.8	1.06	0.95	1	1	0.75	118.95	84.62	0.26	1.01	0,1	1	8,46	0.95	14.25	0,59	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	12	8.46	8.6	18.3	21.1	6.5	0.99	0.95	1	1	0.75	146.40	97.35	0.06	1.01	0,1	1	9,74	0,94	17.35	0,56	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	13	8.61	8.62	18.3	21.1	5.2	0.93	0.95	1	1	0.75	173.85	110.09	0.01	1.00	0.10	1	11,01	0.92	20.17	0,55	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	16	10.56	10.75	18.3	21.1	6.7	0.88	1	1	1	0.75	201.30	122.82	0.08	1.01	0.12	1	14,74	0.88	22.34	0,66	Sıvılaşma Beklenir

4.5. Andrus Ve Stokoe (2000) Yöntemine Göre Sıvılaşma Analizi ($M_w=6,5$ İçin)

4.5.1. Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizi

Kayma dalga hızı (V_s)'na göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre zeminin sıvılaşma direnci (CRR) ve çevrimsel kayma gerilmesi (CSR) oranlanmasıyla Güvenlik Katsayıları (GK) elde edilmiştir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-0.85 aralıklarında (Çizelge 4.11) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.58-1.08 aralıklarında (Çizelge 4.12) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-2) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-0.98 aralıklarında (Çizelge 4.13) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.58-0.79 aralıklarında (Çizelge 4.14) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-1.05 aralıklarında (Çizelge 4.15) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Çalışma sahasında MASW-2 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma

analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-1.05 aralıklarında (Çizelge 4.16) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-2) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-0.96 aralıklarında (Çizelge 4.17) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-3) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.60-1.08 aralıklarında (Çizelge 4.18) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-4) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çizelge 4.11. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-1) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{s,i}(m/sn)$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (6,5)	CSR	CRR _{M=6,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	180	0.99	178.2	213.95	1.44	0.22	0.13	0.85	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1,25	182	0.96	174.72	213.35	1.44	0.24	0.12	0.72	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.92	100	173.85	129.71	1.34	194	0.94	182.36	214.30	1.44	0.26	0.15	0.84	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.3	142.44	1.14	185	0.92	170.2	214.90	1.44	0.21	0.11	0.75	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.12. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-2) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	$CV (PA/\delta v_o)^{0.25}$	VS_1 (m/sn)	$VS1^*$ (m/sn)	C_M (6,5)	CSR	$CRR_{M=6,5}$	FS_L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	6.1	0.95	100	118.95	84.62	1.41	186	1.04	193.44	213.95	1.44	0.28	0.20	1.03	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	7.3	0.94	100	146.40	97.35	1.5	192	1,01	183.82	213.35	1.44	0.2	0.15	1.08	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.7	0.92	100	173.85	110.09	1.6	190	0,98	186.20	214.30	144	0,31	0.17	0.79	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.6	0.88	100	201.30	122.82	1.64	184	0.95	174.80	214.90	1.44	0.30	0.12	0.58	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.13. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-3) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{s,i}(m/sn)$	$CV (PA/\delta v_o')^{0.25}$	$VS_1 (m/sn)$	$VS_1^* (m/sn)$	$C_M (6,5)$	CSR	$CRR_{M=6,5}$	FS_L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	185	0.99	183.15	213.95	1.44	0.22	0.15	0.98	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1.25	190	0.96	182.4	213.35	1.44	0.24	0.15	0.90	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0,92	100	173.85	129.71	1.34	189	0.94	177.66	214.30	1.44	0.26	0.13	0.72	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.3	142.44	1.14	182	0.92	167.44	214.90	1.44	0.21	0.11	0.75	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.14. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-4) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δvo)	($\delta vo'$)	$\delta vo/\delta vo'$	$V_{S,i(m/sn)}$	CV ($PA/\delta vo'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (6,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.8	0.95	100	118.95	84.62	1.41	191	1.04	198.64	213.95	1.44	0.28	0.20	0.71	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	6.5	0.94	100	146.40	97.35	1.50	186	1,01	187.86	213.35	1.44	0.2	0.15	0.75	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.2	0,92	100	173.85	110.09	1.60	183	0.98	179.34	214.30	1.44	0.31	0.17	0.79	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	6.7	0.88	100	201.30	122.82	1.64	193	0.95	183.35	214.90	1.44	0.30	0.12	0.58	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.15. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-1) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δvo)	($\delta vo'$)	$\delta vo/\delta vo'$	$V_{S,i}(m/s_n)$	CV ($PA/\delta vo'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (6,5)	CSR	CRR M=6,5	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	183	0.99	181.17	213.95	1.44	0.22	0.16	1.05	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1.25	182	0.96	174.72	213.35	1.44	0.24	0.12	0.72	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.92	100	173.85	129.71	1.34	192	0.94	180.48	214.30	1.44	0.26	0.14	0.78	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.30	142.44	1.14	185	0.92	170.20	214.90	1.44	0.21	0.11	0.75	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.16. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-2) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/s)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (6,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	6.1	0.95	100	118.95	84.62	1.41	184	1.04	191.36	213.95	1.44	0.28	0.19	0.98	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	7.3	0.94	100	146.40	97.35	1.5	193	1,01	194.93	213.35	1.44	0.20	0.21	1.05	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.7	0.92	100	173.85	110.09	1.6	190	0.98	186.20	214.30	1.44	0.31	0.16	0.74	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.6	0.88	100	201.30	122.82	1.64	194	0.95	184.30	214.90	1.44	0.30	0.15	0.72	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.17. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-3) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/s)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (6,5)	CSR	CRR _{M=6,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	183	0.99	181.17	213.95	1.44	0.22	0.14	0.92	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1,25	194	0.96	186.24	213.35	1.44	0.24	0.16	0.96	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.92	100	173.85	129.71	1.34	190	0.94	178.86	214.30	1.44	0.26	0.13	0.72	Sıvılaşma Beklenir

11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.3	142.44	1.14	185	0.92	170.02	214.90	1.44	0.21	0.11	0.75	Sıvılaşma Beklenir
-------------	-----	------	-----	------	-----	-------	--------	------	-----	------	--------	--------	------	------	------	------	--------------------

Çizelge 4.18. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-4) ve $M_w=6,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (6,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.8	0.95	100	118.95	84.62	1.41	180	1.04	187.2	213.95	1.44	0.28	0.14	0.72	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	6.5	0.94	100	146.40	97.35	1.5	183	1.01	184.83	213.35	1.44	0.2	0.15	1.08	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.2	0,92	100	173.85	110.09	1.6	180	0.98	176.4	214.30	1.44	0.31	0.13	0,60	Sıvılaşma Beklenir

11.00-11.45	1.5	0.32	6.7	0.88	100	201.30	122.82	1.64	192	0.95	182.4	214.90	1.44	0.30	0.15	0.72	Sıvılaşma Beklenir
-------------	-----	------	-----	------	-----	--------	--------	------	-----	------	-------	--------	------	------	------	------	-----------------------

4.5.2.Kayma dalga hızı(Vs) dayalı sıvılaşma analizi

Kayma dalga hızı (Vs)'na göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre zeminin sıvılaşma direnci (CRR) ve çevrimsel kayma gerilmesi (CSR) oranlanmasıyla Güvenlik Katsayıları (GK) elde edilmiştir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.52-0.59 aralıklarında (Çizelge 4.11) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.40-0.75 aralıklarında (Çizelge 4.12) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-2) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-1 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-0.99 aralıklarında (Çizelge 4.13) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir. Çalışma sahasında MASW-1 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.40-0.75 aralıklarında (Çizelge 4.14) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-0.73 aralıklarında (Çizelge 4.15) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-1.05 aralıklarında (Çizelge 4.16) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-2) sonuçlarında,

Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-0.67 aralıklarında (Çizelge 4.17) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-3) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çalışma sahasında MASW-2 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine göre kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.20-0.75 aralıklarında (Çizelge 4.18) hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-2 (SK-4) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

Çizelge 4.19. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-1) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (7,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	180	0.99	178.2	213.95	1	0.22	0.13	0.59	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1,25	182	0.96	174.72	213.35	1	0.24	0.12	0.50	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.92	100	173.85	129.71	1.34	194	0.94	182.36	214.30	1	0.26	0.15	0.58	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.3	142.44	1.14	185	0.92	170.2	214.90	1	0.21	0.11	0.52	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.20. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-2) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	r_d	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	$CV (PA/\delta v_o')^{0.25}$	VS_1 (m/sn)	$VS1^*$ (m/sn)	C_M (7,5)	CSR	$CRR_{M=7,5}$	FS_L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	6.1	0.95	100	118.95	84.62	1.41	186	1.04	193.44	213.95	1	0.28	0.20	0.71	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	7.3	0.94	100	146.40	97.35	1.5	192	1,01	183.82	213.35	1	0.20	0.15	0.75	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.7	0.92	100	173.85	110.09	1.6	190	0,98	186.20	214.30	1	0.31	0.17	0,55	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.6	0.88	100	201.30	122.82	1.64	184	0.95	174.80	214.90	1	0.30	0.12	0.40	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.21. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-3) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/s)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (7,5)	CSR	CRR _{M=6,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	185	0.99	183.15	213.95	1	0.22	0.15	0.99	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1.25	190	0.96	182.4	213.35	1	0.24	0.15	0.63	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.92	100	173.85	129.71	1.34	189	0.94	177.66	214.30	1	0.26	0.13	0.50	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.3	142.44	1.14	182	0.92	167.44	214.90	1	0.21	0.11	0.52	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.22. Çalışma sahasında açılan MASW-1 (SK-4) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	$CV (PA/\delta v_o')^{0.25}$	VS_1 (m/sn)	$VS1^*$ (m/sn)	$C_M (7,5)$	CSR	$CRR_{M=7,5}$	FS_L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.8	0.95	100	118.95	84.62	1.41	191	1.04	198.64	213.95	1	0.28	0.20	0.71	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	6.5	0.94	100	146.40	97.35	1.5	186	1,01	187.86	213.35	1	0.2	0.15	0.75	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.2	0,92	100	173.85	110.09	1.6	183	0.98	179.34	214.30	1	0.31	0.17	0.55	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	6.7	0.88	100	201.30	122.82	1.64	193	0.95	183.35	214.90	1	0.30	0.12	0.40	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.23. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-1) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (7,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.95	100	118.95	104.24	1.14	183	0.99	181.17	213.95	1	0.22	0.16	0.73	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.94	100	146.40	116.97	1,25	182	0.96	174.72	213.35	1	0.24	0.12	0.50	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.92	100	173.85	129.71	1.34	192	0.94	180.48	214.30	1	0.26	0.14	0.54	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.88	100	201.3	142.44	1.14	185	0.92	170.2	214.90	1	0.21	0.11	0.52	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.24. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-2) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (7,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	6.1	0.95	100	118.95	84.62	1.41	184	1.04	191.36	213.95	1	0.28	0.19	0.68	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	7.3	0.94	100	146.40	97.35	1.5	193	1,01	194.93	213.35	1	0.2	0.21	1.05	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.7	0.92	100	173.85	110.09	1.6	190	0.98	186.20	214.30	1	0.31	0.16	0.52	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.6	0.88	100	201.30	122.82	1.64	194	0.95	184.30	214.90	1	0.30	0.15	0.50	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.25. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-3) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/s)}$	CV ($PA/\delta v_o'$) ^{0.25}	VS ₁ (m/sn)	VS1* (m/sn)	C _M (7,5)	CSR	CRR _{M=7,5}	FS _L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.1	0.9 5	100	118.95	104.24	1.14	183	0.99	181.17	213.95	1	0.22	0.14	0.64	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	8.3	0.9 4	100	146.40	116.97	1,25	194	0.96	186.24	213.35	1	0.24	0.16	0.67	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	6.4	0.9 2	100	173.85	129.71	1.34	190	0.94	178.86	214.30	1	0.26	0.13	0.50	Sıvılaşma Beklenir
11.00-11.45	1.5	0.32	5.2	0.8 8	100	201.3	142.44	1.14	185	0.92	170.02	214.90	1	0.21	0.11	0.52	Sıvılaşma Beklenir

Çizelge 4.26. Çalışma sahasında açılan MASW-2 (SK-4) ve $M_w=7,5$ için, Kayma dalga hızı (Vs) yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizinden elde edilen sonuçlar

Derinlik (m)	Zemin Tabaka Kalınlığı (m)	PGA (g)	IDI (%)	rd	PA (Kpa)	(δv_o)	($\delta v_o'$)	$\delta v_o/\delta v_o'$	$V_{S,i(m/sn)}$	$CV (PA/\delta v_o')^{0.25}$	$VS_1 (m/sn)$	$VS1^* (m/sn)$	$C_M (7,5)$	CSR	$CRR_M =7,5$	FS_L	Sıvılaşma Potansiyeli
6.50-6.95	1.5	0.32	7.8	0.95	100	118.95	84.62	1.41	180	1.04	187.2	213.95	1	0.28	0.14	0.50	Sıvılaşma Beklenir
8.00-8.45	1.5	0.32	6.5	0.94	100	146.40	97.35	1.5	183	1.01	184.83	213.35	1	0.20	0.15	0.75	Sıvılaşma Beklenir
9.50-9.95	1.5	0.32	5.2	0,92	100	173.85	110.09	1.6	180	0.98	176.4	214.30	1	0.31	0.13	0,42	Sıvılaşma Beklenir

11.00-11.45	1.5	0.32	6.7	0.88	100	201.30	122.82	1.64	192	0.95	182.4	214.90	1	0.30	0.15	0.20	Sıvılaşma Beklenir

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, Batman kent merkezinde bir sahanın deprem sırasında dinamik yükler altında meydana gelebilecek zemin sıvılaşması analizleri gerçekleştirilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre Standard Penetrasyon Test (SPT) ve Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı (V_s) dayalı zemin sıvılaşması analiz yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Sıvılaşma analizleri $M_w=7.5$ ve $M_w=6.5$ deprem büyüklüklerine göre sıvılaşma potansiyelleri değerlendirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında; yerleşim alanındaki jeolojik formasyonlarının fiziksel özelliklerinin ve yeraltı yapısının ortaya çıkarılması amacıyla jeofizik, jeolojik ve geoteknik araştırmalar yapılmıştır. 4 adet toplamda 80 metre olmak üzere temel sondaj kuyuları açılmıştır. Sondaj kuyularının açılması sırasında geçilen zemin tabakalarının fiziksel ve mekanik niteliklerini belirlemek amacıyla SPT ve UD numuneleri alınmıştır. Bununla birlikte jeofizik çalışmalar kapsamında; 2 MASW ve 2 adet sismik (P ve S) serim çalışması yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1-) SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre, Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.86-1.23 aralıklarında 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 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.86-1.23 aralığında hesaplanmıştır.

2-) SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.73-1.23 aralıklarında 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.73-1.23 aralığında hesaplanmıştır.

3-) SK-3 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.76-1.31 aralıklarında 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.76-1.31 aralığında hesaplanmıştır.

4-) SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.81-1.25 aralıklarında 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.81-1.25 aralığında hesaplanmıştır.

5-) SK-1 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre, Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.57-0.67 aralıklarında 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 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.57-0.67 aralığında hesaplanmıştır.

6-) SK-2 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N)

ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.49-0.73 aralıklarında 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0,49-0.73 aralığında hesaplanmıştır.

7-) SK-3 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.51-0.61 aralıklarında 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.51-0.61 aralığında hesaplanmıştır.

8-) SK-4 sondaj kuyusu lokasyonu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ve yöntemine göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.55-0.66 aralıklarında 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 Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.50-11.45 m arasındaki derinlikten elde edilen Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerleri 0.55-0.66 aralığında hesaplanmıştır.

9-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-0.85 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

10-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma

analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.58-1.08 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-2) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

11-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-0.98 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

12-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.58-0.79 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

13-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-1.05 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

14-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-1.05 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

15-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.72-0.96 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

16-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 6,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.60-1.08 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

17-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.52-0.59 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

18-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.40-0.75 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-2) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

19-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-0.99 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

20-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-1 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.40-0.75 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

21-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-1) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-0.73 aralıklarında hesaplanmıştır.

Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

22-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-2) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-1.05 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

23-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-3) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.50-0.67 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

24-) Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre sıvılaşma analizi Kayma dalga hızı (V_s) dayalı sıvılaşma analizinde; MASW-2 (SK-4) profilinden elde edilen sismik hız değerlerine ve tasarım deprem büyüklüğü 7,5'a göre sondaj kuyusunda yapılan sıvılaşma analizlerinde; Güvenlik katsayıları (F_{SL}) değerleri 0.20-0.75 aralıklarında hesaplanmıştır. Dolayısıyla MASW-1 (SK-1) sonuçlarında, Güvenlik Koşulu (F_{SL}) değerlerinin 1.1'den küçük olması bu alanda sıvılaşma riski olabileceğine işaret etmektedir.

25-) Genel olarak sıvılaşma analizlerinin güvenlik faktörü değerleri incelendiğinde Standard Penetrasyon Test (SPT) ve Andrus ve Stokoe (2000) yöntemine göre kayma dalga hızı (V_s) dayalı zemin sıvılaşması analiz yöntemlerinin birbirlerini desteklediği yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

5.2.Öneriler

Sıvılaşma riski olan zeminler Vibroflotasyon (titreşimli sıkıştırma), titreşimli sıkıştırma, Prefabrik dikey dren (PVD), drenaj yöntemleri gibi yöntemler kullanılarak güçlendirilmelidir. Bununla birlikte, Zemin sıkıştırma yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerle ağır bir zeminin yüksekte düşürülmesiyle ya da titreşimli aletlerle zeminlerin sıvılaşmasını kontrol altına alınır. Jet grouting yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemle zemin içerisine çimento gibi bağlayıcı malzemeler enjekte edilir. Kazıklı temeller kullanılarak sıvılaşabilir tabakayı geçerek sağlam zemine oturtulabilir. Yapının

yükü azaltılarak zemine binen yük azaltılabilir. Zemindeki suyun etkisini azaltmak için drenaj sistemleri kurulabilir.

KAYNAKLAR

- Akkaya, H. (2017). *Kayma dalga hızları (V_s) kullanılarak Van Erciş ilçesinde üç farklı deprem durumu için sıvılaşma analizleri*.
- Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. (2000). *Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(11), 1015–1025.
- Casagrande, A. (1936). *Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills*. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 23(1), 13–32.
- Casagrande, A. (1938). *Research on the shear strength of soils*. Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, 29–33.
- Celep, Z., & Kumbasar, N. (2000). *Zemin mekaniği ve temel mühendisliği*. İstanbul: Beta Yayıncılık.
- Çavuş, M. (2004). *Gevşek kum depozitlerin sıvılaşma potansiyelinin bulanık mantık modelleme yöntemi ile değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- 69
- Çetin, K. (2018). *SPT tabanlı sismik zemin sıvılaşma tetikleme ilişkisi arasındaki farklılıkların detaylı incelenmesi*.
- Demiröz, E. (2021). *Konya Organize Sanayi Bölgesi zeminlerinin dinamik davranışlarının eşdeğer doğrusal analiz yöntemi ile araştırılması*.
- Ferritto, J. (1997). *Soil liquefaction and its effect on structures*. Earthquake Engineering Research Center, California.
- FHWA. (2002b). *Geotechnical Engineering Circular No. 5: Evaluation of Soil and Rock Properties*. Federal Highway Administration, Washington D.C.
- Güngör, A. (2007). *İzmir-Mavişehir sahasında sıvılaşma analizi (SPT, CPT, sismik kırılma, elektrik öz direnç, mikrotremör yöntemleri ile)*.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Kumar, S. (2008). *Effect of ground water level on liquefaction potential of soil*. Indian Geotechnical Journal, 38(2), 165–173.
- Lai, C. G. (1998). *Dynamic soil-structure interaction and seismic design*. Journal of Earthquake Engineering, 2(4), 637–663.
- Marcuson, W. F., Hynes, M. E., & Franklin, A. G. (2007). *Evaluation and mitigation of liquefaction hazards*. U.S. Army Corps of Engineers.

- Mollamahmutoğlu, M., & Babuçcu, G. (2006). *Zemin sıvılaşması ve etkileri üzerine bir inceleme*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 145–160.
- Nas, D. (2013). *Sıvılaşma analizi ve değerlendirilmesi üzerine bir araştırma*.
- Obermeier, S. F. (1996). *Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis*. Engineering Geology, 44(1–4), 1–76.
- Özçep, F. (2010). *Geoteknik ve jeofizik araştırmalarda sıvılaşma analizleri için Excel programı geliştirilmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Özçep, F., & Arkadaşları. (2003). *Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin farklı yöntemlerle değerlendirilmesi*.
- Özkan, M. (2017). *Zeminlerde sıvılaşma mekanizmalarının deneysel ve teorik incelenmesi*.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves (MASW)*. Geophysics, 64(3), 800–808.
- Patel, R. (2019). *Geotechnical site investigations and soil improvement methods*. International Journal of Geotechnical Engineering, 13(2), 190–198.
- Prakash, S., & Gupta, R. (1967). *Soil liquefaction and its effect on foundations*. Indian Geotechnical Conference, Delhi.
- Seed, H. B. (1966). *Strength and deformation characteristics of sand during cyclic loading*. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 92(6), 105–134.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97(9), 1249–1273.
- Sitharam, T. G., Govindaraju, L., & Sridharan, A. (2004). *Dynamic properties and liquefaction potential of soils*. Current Science, 87(10), 1370–1377.
- Şaylan, A. (2006). *Erzincan ili ve çevresinin zemin sıvılaşma potansiyelinin Kayma Dalga Hızı (Vs) verileri kullanılarak saptanması*.
- Tolon, A. (2013). *Karşılaştırmalı sayısal sıvılaşma analizi*.
- Tonaroğlu, M. (2006). *Zeminlerde sıvılaşmaya neden olan etkenler hakkında bilgisayar analizi*.
- Youd, T. L. (1984). *Liquefaction evaluation: Retrospective and prospective*. Proceedings of the ASCE National Convention, San Francisco.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., et al. (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.

Zorluer, İ., Demir, E., & Arkadaşları. (2022). *Kütahya ili merkez ilçesi mahallelerinde sivilaşma risk haritalarının oluşturulması*.