

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNLERİN SIVILAŞMASINDA TABAKALAŞMA ETKİSİNİN
SAYISAL ANALİZ İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah Uğur YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

OCAK 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNLERİN SIVILAŞMASINDA TABAKALAŞMA ETKİSİNİN
SAYISAL ANALİZ İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah Uğur YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK

OCAK 2024

Abdullah Uğur YILMAZ tarafından hazırlanan “ZEMİNLERİN SIVILAŞMASINDA TABAKALAŞMA ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZ İLE BELİRLENMESİ ” adlı tez çalışması **15.01.2024** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Geoteknik** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof.Dr.Aşkın ÖZOCAK (Danışman)**

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr.Sedat SERT**

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr.Öğr.Üyesi Kurban ÖNTÜRK**

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum **“ZEMİNLERİN SIVILAŞMASINDA TABAKALAŞMA ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZ İLE BELİRLENMESİ”** başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Abdullah Uğur YILMAZ



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi birikimini, deneyimini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarımda ve hayat boyu, her zaman yanımda olan eşim ve oğluma bana göstermiş oldukları destekten ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah Uğur YILMAZ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. ZEMİNDE SIVILAŞMA	1
1.1. Sıvılaşmanın Tanımı	1
1.2. Sıvılaşma Mekanizması	1
1.3. Sıvılaşma-Efektif Gerilme İlişkisi	2
1.4. Sıvılaşma Türleri	3
1.4.1. Akma türü sıvılaşma	3
1.4.2. Çevrimsel hareketlilik	3
1.5. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler	4
1.5.1. Zemin cinsi	4
1.5.2. Dane boyutu dağılımı	6
1.5.3. Zeminin sıklık derecesi (Bağıl birim hacim ağırlık)	7
1.5.4. Yer altı su seviyesi ve zeminin drenaj koşulları	8
1.5.5. Deprem büyüklüğü ve süresi	8
1.5.6. Sismik geçmiş	8
1.5.7. Yaşlanma ve çimentolanma	9
2. DETERMİNİSTİK YÖNTEMLERLE SIVILAŞMA OLASILIĞININ BELİRLENMESİ	11
2.1. SPT Değerlendirme Yöntemleri	11
2.1.1. Robertson ve Wride (1998) SPT değerlendirmesi	12
2.1.2. CSR değerinin bulunması	13
2.1.3. Idriss ve Boulanger (2006) SPT değerlendirmesi	14
2.2. CPT Değerlendirme Yöntemleri	16
2.2.1. Robertson ve Wride (1998) CPT değerlendirmesi	16
2.2.2. Idriss ve Boulanger (2006) CPT değerlendirmesi	17
2.3. Sıvılaşma Şiddet Parametreleri	18
2.3.1. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) yöntemi	18
2.3.2. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN) yöntemi	19
2.3.3. Sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) yöntemi	21
2.3.4. Sıvılaşma şiddetinin tahmini (IL) yöntemi	21

2.3.5. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması (LS) yöntemi	22
3. SIVILAŞMA ANALİZİNDE ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ	23
3.1. Statik Kayma Gerilmesi Etkisi	23
3.2. Çevre Basıncındaki Değişimin Etkisi	24
3.3. Bina Tepkisinin Etkisi	25
3.4. Düşey Efektif Gerilme Artışı	25
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27
5. PLAXİS-UBC3D-PLM SIVILAŞMA MODELİ VE DİĞER BÜNYE MODELLERİ	35
5.1. Giriş	35
5.2. UBC3D-PLM Modelin SPT-N Sayısına Bağlı Kalibrasyonu	38
5.2.1. Boşluk suyu basıncı hesaplanmasına dair bilgiler	40
5.2.2. P_{ref} değerinin değerlendirilmesi	40
5.3. Nümerik Çalışmalarda Kullanılan Diğer Plaxis Malzeme Modelleri	43
5.3.1. Lineer elastik model	43
5.3.2. Hardening Soil (HS) model	43
5.3.3. Hardening Soil-small Strain model	44
5.4. Dinamik Sınır Şartları	45
5.5. PSA Spektrumu	46
6. NÜMERİK MODELLEME	49
6.1. Model Geometrisi	49
6.2. Rayleigh Sönüm Parametrelerinin Belirlenmesi	55
6.2.1. HS-Small zemin modeli parametrelerinin belirlenmesi	56
6.2.2. UBC3D-PLM zemin modeli parametrelerinin belirlenmesi	57
6.3. Yükleme ve Sınır Şartları	57
6.4. Üst Tabaka Etkisinin Araştırılmasına Yönelik Olarak Belirlenen Zemin Profilleri	58
6.4.1. Analizlere dair modellerin zemin yapısı	59
6.4.2. Modellemede eleman boyutunun belirlenmesi	59
6.4.3. Analiz Öncesi Analiz Aşamalarının Belirlenmesi	61
7. ANALİZ EDİLEN MODELLERİN DETERMİNİSTİK YÖNTEM İLE DEĞERLENDİRİLMESİ	63
7.1. SPT Değerleri açısından Güvenlik Katsayılarının Hesaplanması	63
7.2. Şiddet Parametrelerine Göre Karşılaştırma Yapılması	65
7.2.1. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI)	65
7.2.2. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN)	67
7.2.3. Sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI)	68
7.2.4. Sıvılaşma şiddetinin tahmini (IL)	69
7.2.5. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması (LS)	70
7.3. Yapı Zemin Etkileşimi Doğrultusunda Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi	71
8. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	79
8.1. r_u değerinin değişimi	79
8.2. Bina Üzerindeki Noktaların Model Bazında Karşılaştırılması	84
8.3. Binasız Duruma Göre Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	86
8.4. Binalı Durumda $x=5$ m'de Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	92
8.5. Tabakaların Orta Noktasındaki Boşluk Suyu Basıncı Değişimi	99

8.6. Spektral İvme Diyagramlarının Karşılaştırılması.....	106
8.7. Deprem Yönetmeliğine Göre Göreceli Kat Ötelenmelerinin Kontrolü	108
8.8. Binanın Oturma Davranışının İncelenmesi ve Kayılma Kontrolünün Yapılması.....	118
8.9. Özet Değerlendirme	128
9. SONUÇLAR.....	131
KAYNAKLAR.....	133
ÖZGEÇMİŞ.....	137





KISALTMALAR

CRR	: Kayma Mukavemeti Oranı
CSR	: Çevrimsel Kayma Gerilmesi Oranı
FS	: Güvenlik Katsayısı
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
CPT	: Konik Penetrometre
LSN	: Sıvılaşma Şiddeti Katsayısı
LPI	: Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi
km	: Kilometre
LL	: Likit Limit
LSI	: Sıvılaşma Şiddeti İndeksi
NP	: Plastik Olmayan
PI	: Plastik İndeks
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
CPT	: Konik Penetrasyon Deneyi
IL	: Sıvılaşma Şiddetinin Tahmini
LS	: Sıvılaşma Şiddetinin Sınıflandırılması
PSV	: Spektral Hız
PSA	: Spektral İvme



SİMGELER

a_{maks}	: Yüzeydeki en büyük yatay gerilme
C_B	: Kuyu çapı düzeltme faktörü
C_N	: Efektif gerilme düzeltme faktörü
C_R	: Tij boyu düzeltme faktör
C_S	: Numune alma metodu düzeltme faktörü
C_E	: Şahmerdan enerji oranı
D_r	: Bağlı birim hacim ağırlık
M_L	: Depremi lokal büyüklüğü
M_w	: Depremi moment büyüklüğü
P_a	: Sabit referans gerilmesi
r_a	: Gerilme azaltma katsayısı
u_s	: Statik durumdaki boşluk suyu basıncı
u_d	: Dinamik durumdaki boşluk suyu fazlalığı
F_C	: İnce dane oranı düzetme katsayısı
K_σ	: Örtü yükü faktörü
K_a	: Statik kayma gerilmesi faktörü
α ve β	: İnce dane oranı düzeltme sayısı
z	: Kesit boyunca derinlik
w(z)	: Derinlik ağırlık faktörü
V_s	: Zeminin kayma hızı
v	: Poisson oranı
PL	: Sıvılaşma İhtimali
TH	: Sıvılaşma Potansiyeline Sahip Tabaka Kalınlığı
WF	: Sıvılaşabilir tabakaya olan mesafe
τ_i	: Statik kayma gerilmesi
Q	: Dane şekline göre belirlenen ampirik katsayı
p'	: Ortalama efektif normal gerilme
S_a	: Binanın doğal periyoduna karşılık gelen spektral ivme katsayısı
B	: Temel genişliği
z	: Derinlik farkı

τ_i	: Statik kayma gerilmesi
σ_v	: Toplam gerilme
σ'_v	: Efektif gerilme
r_d	: Gerilme azaltma katsayısı
z	: Metre cinsinden yüzeyden itibaren derinlik
PL	: Sıvılaşma ihtimali
TH	: Sıvılaşma potansiyeline sahip tabaka kalınlığı
WF	: Sıvılaşabilir tabakaya olan mesafe
τ_i	: Statik kayma gerilmesi
α	: Statik kayma gerilmesi
ϕ_{cv}	: Sabit sürtünme açısı
ϕ_p	: Pik sürtünme açısı
c	: Kohezyon
k_B^e	: Elastik hacim modülü
k_G^e	: Elastik kayma modülü
k_G^p	: Plastik kayma modeli
m	: Elastik hacim modülü üssü
n	: Elastik kayma modülü üssü
n	: Plastik kayma modülü üssü
Rf	: Göçme oranı
K_w^o	: Saf suyun gerçek kütleli modülü
K_u	: Zeminin kütleli modülü
K	: Hacim Modülü
G	: Kayma Modülü
$\delta_i^{(x)}$: Etkin görel kat ötelemesi
R	: Taşıyıcı Sistem davranış katsayısı
M	: Kütle
K	: Rijitlik katsayısı
ξ	: Sönüm oranı
T	: Doğal periyot

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.2. Sıvılaşmaya bağlı birim hacim ağırlık ve pik yer ivmesinin etkisi (Seed ve Idriss, 1971).	7
Tablo 2.1. SPT düzeltme katsayıları (Robertson and Wride 1998).....	12
Tablo 2.2. LPI Değişim Tablosu.	19
Tablo 2.3. Sıvılaşma şiddeti katsayısının değerlendirilmesi.	20
Tablo 2.4. Sıvılaşma şiddeti indeksinin değerlendirilmesi.....	21
Tablo 2.5. Sıvılaşma derecesi IL ile sıvılaşma şiddeti arasındaki ilişki (Tezcan ve Özdemir, 2004).	22
Tablo 5.1. Plaxis UBC3D-PLM parametreleri.	38
Tablo 5.2. Hardening soil model parametreleri.....	44
Tablo 6.1. Ortalama zemin hakim periyoduna göre hedef değerler.	55
Tablo 6.2. Analizlerde kullanılan Hs-small zemin bünye modeli parametreleri.....	57
Tablo 6.3. Analizlerde kullanılan UBC3D-PLM zemin bünye model parametreleri.	57
Tablo 6.4. Analizlerde kullanılan zemin profil bilgileri.....	58
Tablo 7.1. SPT değerleri kullanılarak güvenlik katsayılarının hesap edilmesi.	63
Tablo 7.2. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) hesabı.	66
Tablo 7.3. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN)'nin hesap edilmesi.	67
Tablo 7.4. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSI)'nin hesap edilmesi.....	68
Tablo 7.5. Sıvılaşma şiddetinin tahmini (IL)'nin hesap edilmesi.	69
Tablo 7.6. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması(LS)'nin hesap edilmesi.	70
Tablo 7.7. 0-10 Model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.	73
Tablo 8.1. 0-10 modeli için görel kat öteleme hesabı (8,5 sn).	110
Tablo 8.2. 2-8 modeli için görel kat öteleme hesabı(2,58. Sn).	112
Tablo 8.3. 4-6 modeli için görel kat öteleme hesabı(2,57. Sn).	113
Tablo 8.4. 6-4 modeli için görel kat öteleme hesabı(2,52. sn).	115
Tablo 8.5. 8-2 modeli için görel kat öteleme hesabı (2,47 sn).	116
Tablo 8.6. 10-0 modeli için görel kat öteleme hesabı (8,22 sn).	118
Tablo 8.8. 2-8 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (8,41sn).	122
Tablo 8.9. 4-6 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (6,67 sn).	123
Tablo 8.10. 6-4 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (2,06.sn).	125
Tablo 8.11. 8-2 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (2,04sn).	126
Tablo 8.12. 10-0 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (8,23.sn).	128
Tablo 8.13. Tüm modeller için elde edilen sonuçların karşılaştırması.	129



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Örnek bir drenajsız üç eksenli çevrimsel yük deneyi sonuçları	1
Şekil 1.2. Yeraltı su seviyesinin altında, gevşek zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlarda davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).	3
Şekil 1.3. Yeraltı su seviyesinin altında sıkı zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlardaki davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).	4
Şekil 1.4. Geliştirilmiş Çin kriteri (Finn vd.,1994).	5
Şekil 1.5. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilme grafiği (Seed vd.,2003).	6
Şekil 1.6. Sıvılaşmaya duyarlı dane boyut aralığı (Iwasaki, 1986).	7
Şekil 1.7. Sismik geçmişin sıvılaşma direncine etkisi (Seed, 1976).	9
Şekil 2.1. Gerilme azaltma katsayısının grafiği (Robertson and Wride, 1998)	14
Şekil 2.2. Yüksek ince dane oranı içeriğine sahip olan uyumsuz zeminler için saha vaka geçmişlerinin karşılaştırılması ve $I_c = 2.59$ (görünür $FC = \%35$) olan zemin için Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen eğri.....	18
Şekil 2.3. Temiz kumlar için hacimsel şekil değiştirme. (Ishihara ve Yoshimine, 1992).	20
Şekil 3.1. Farklı bağıl birim hacim ağırlıktaki zeminler için K_α - α ilişkisi.....	24
Şekil 3.2. Referans derinlik için serbest arazi koşullarında ve yapı etkisi altında r_d katsayısının şematik gösterimi.	26
Şekil 5.1. UBC3D-PLM hiperbolik pekleşme kuralı (Beaty ve Byrne).	35
Şekil 5.2. Akma yüzeyleri.....	36
Şekil 5.3. UBCSAND'in orijinal sıkıştırma kuralı.	41
Şekil 5.4. UBC3D-PLM tarafından farklı stres seviyelerinde fazla yük gerilme düzeltme faktörü (Boulanger, 2003b)	42
Şekil 5.5. Çeşitli yapılarda dikkate alınan kayma deformasyonları için kayma modülü değerleri.	45
Şekil 5.6. Viskoz sınır koşullarının şematik gösterimi.	46
Şekil 5.7. Bağlı serbestlik dereceli sınır koşullarının şematik gösterimi.	46
Şekil 5.8. Tek Özgürlük Derecesi Sistemi.	47
Şekil 6.1. Adapazarı SK-2 Nolu sondaj logu.	50
Şekil 6.2. Marmara deprem kaydı (ref?).	51
Şekil 6.3. Adapazarı SK-2 Nolu sondaj loguna ait analiz sonucunda r_u değerleri. ...	51
Şekil 6.4. 25 m'lik bölümün analiz sonucunun karşılaştırılması ve r_u değerlerinin gösterimi.....	52
Şekil 6.5. Model genişliğinin 600 m olduğu durum için r_u değerinin şematik gösterimi.....	53
Şekil 6.6. Model genişliğinin 800 m olduğu durum için r_u değerinin şematik gösterimi.....	53

Şekil 6.7. Model genişliğinin 1000 m olduğu durum için r_u değerinin şematik gösterimi.....	54
Şekil 6.8. 1999 Marmara depremine ait ivme girdisi.....	58
Şekil 6.10. Seçilen eleman boyutlarının gösterimi.	60
Şekil 6.11. Sonuçların karşılaştırılması maksadıyla model üzerinde seçilen noktalar.	61
Şekil 6.12. Doğal durumun gösterimi.	61
Şekil 6.13. Dinamik analizin gösterimi.....	61
Şekil 6.14. Belirlenen tüm zemin profillerinde gerçekleştirilen analizler.	62
Şekil 8.1. 0-10 nolu modelde r_u değeri.....	79
Şekil 8.2. 2-8 nolu modelde r_u değeri.....	80
Şekil 8.3. 4-6 nolu modelde r_u değeri.....	81
Şekil 8.4. 6-4 nolu modelde r_u değeri.....	82
Şekil 8.5. 8-2 nolu modelde r_u değeri.....	83
Şekil 8.6. 10-0 nolu modelde r_u değeri.....	84
Şekil 8.7. Binanın sağ alt köşesinde modellere göre düşey deplasman değişimi.	85
Şekil 8.8. Binanın sağ üst köşe noktasında modellere göre yatay deplasman grafiği.	86
Şekil 8.9. -1 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	87
Şekil 8.10. -2 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.....	87
Şekil 8.11. -3 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	88
Şekil 8.12. -4 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	88
Şekil 8.13. -5 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	89
Şekil 8.14. -6 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	90
Şekil 8.15. -7 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	90
Şekil 8.16. -8 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	91
Şekil 8.17. -9 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	91
Şekil 8.18. -10 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	92
Şekil 8.19. -1 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	93
Şekil 8.20. -2 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	93
Şekil 8.21. -3 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri..	94
Şekil 8.22. -4 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	95
Şekil 8.23. -5 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	95
Şekil 8.24. -6 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	96
Şekil 8.26. -8 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	97
Şekil 8.27. -9 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	98
Şekil 8.28. -10 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.	98
Şekil 8.29. 0-10 modeli için tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.	99
Şekil 8.30. 2-8 modeli sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi..	100
Şekil 8.31. 2-8 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.	101
Şekil 8.32. 4-6 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.	101
Şekil 8.33. 4-6 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.	102
Şekil 8.34. 6-4 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.	103

Şekil 8.35. 6-4 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi	104
Şekil 8.36. 8-2 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.	104
Şekil 8.37. 8-2 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.....	105
Şekil 8.38. 10-0 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.....	106
Şekil 8.39. 0 m’de binasız durumdaki spektral ivme grafiği.....	107
Şekil 8.40. -1 m’de binasız durumdaki spektral ivme grafiği.....	107
Şekil 8.41. 0-10 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (8,5. sn).....	109
Şekil 8.42. 0-10 modeli için kritik hasar anı (8,5.sn).....	110
Şekil 8.43. 2-8 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (8,28. sn).....	111
Şekil 8.44. 2-8 modeli için kritik hasar anı (8,28.sn).....	111
Şekil 8.45. 4-6 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (2,57. sn).....	112
Şekil 8.46. 4-6 modeli için kritik hasar anı (2,57. sn).....	113
Şekil 8.47. 6-4 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (2,52. sn).....	114
Şekil 8.48. 6-4 modeli için kritik hasar anı (2,52. sn).....	114
Şekil 8.49. 8-2 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (2,47.sn).....	115
Şekil 8.50. 8-2 modeli için kritik hasar anı (2,47.sn).....	116
Şekil 8.51. 10-0 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (8,22. sn).....	117
Şekil 8.52. 10-0 Modeli için kritik hasar anı (8,22.sn).	117
Şekil 8.53. Tüm modeller için deprem kaydı sonunda binada meydana gelen oturma grafiği.....	118
Şekil 8.54. 0-10 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (8,51.sn)	119
Şekil 8.55. 0-10 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (8,51.sn).	120
Şekil 8.56. 2-8 Modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (8,41 sn).....	121
Şekil 8.57. 2-8 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (8,41.sn).	121
Şekil 8.58. 4-6 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (6,67.sn).....	122
Şekil 8.59. 4-6 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (6,67.sn).	123
Şekil 8.60. 6-4 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (2,06.sn).....	124
Şekil 8.61. 6-4 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (2,06.sn).	124
Şekil 8.62. 8-2 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (2,04.sn).....	125
Şekil 8.63. 8-2 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (2,04.sn).	126
Şekil 8.64. 10-0 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (8,23sn).	127
Şekil 8.65. 10-0 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (8,23.sn).	127
Şekil 8.66. Ishihara (1985) tarafından önerilen abakta modellerin değerlendirilmesi.	130



ZEMİNLERİN SIVILAŞMASINDA TABAKALAŞMA ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Artan bilimsel çalışmalar ışığında sivilaşma konusunda çok sayıda araştırma yapılmakta olup güncel konulardan biri zeminlerin sivilaşma potansiyelinin belirlenmesinde üst tabaka etkisinin incelenmesidir. Bu çalışmada literatürde Ishihara (1985) tarafından önerilen ön değerlendirme abağı ve diğer araştırmacılar tarafından önerilen sivilaşma şiddet endeks değerlendirmeleri üzerine literatüre katkı sağlamak amacıyla sayısal analiz yöntemi ile tabakalaşma etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarda; sivilaşmayan bir katman altında, sivilaşma potansiyeli olan bir tabaka bulunması durumunda üzerinde yer alan yapıda oluşacak deformasyonların tespit edilmesinde sayısal analiz programının kullanılarak elde edilen sonuçların görece kat ötelenmesi, kayılma, eğilme ve oturma davranışları açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Öncelikle değerlendirmenin yapılabilmesi için Sakarya/Adapazarı'nda sivilaşan ve sivilaşmayan tabakanın yer aldığı bir sondaj logu seçilerek seçilen sondaj loguna dair deneysel parametreler elde edilmiştir.

Seçilen sondaj logunda belirtilen SM3 (Sivilaşma potansiyeli bulunmayan) zemin tabakası üstte olacak şekilde, SM4 (Sivilaşma potansiyeli bulunan) ve altında CH4 kil tabakasından oluşan zemin modeli oluşturulmuştur.

Öncelikle seçilen log kapsamında yer alan 75 m derinliğe sahip SK-2 kolonunun bir boyutlu olarak analizi literatürde yer alan "1999 Marmara Deprem kaydı" kullanılarak analiz gerçekleştirilmiş, SM3 tabakasının sivilaşmadığı, SM4 tabakasının sivilaştığı görülmüştür. Bahse konu SK-2 sondaj logunun bir boyutlu (1D) analizi öncesi -25 m kotunda nokta tanımlanarak, söz konusu noktaya dair ivme kaydı elde edilmiştir.

75 m derinliğe sahip sondaj logunun 25 m'sinde yer alan ivme kaydı bahse konu logun ilk 25 m'si modellenerek analiz gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırıldığında benzerliğin bulunduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen bir boyutlu (1D) analiz sonrasında aynı model (2D) olarak modellendiğinde zemin yüzeyinde meydana gelen ivme değerlerinin yaklaşık 2 katına yaklaşabilecek şekilde arttığı görülmüştür. Bu durumun zemin içerisinde meydana gelen sismik davranışın zemin içerisinde yansımaya sebep olması ve model genişliğinin kısa ya da yeteri kadar uzun tutulmamasından kaynaklı olabilecek şekilde sınır koşullarından kaynaklanabileceği hususu tespit edilmiştir.

Model, üst tabaka etkisinin araştırılması kapsamında sivilaşmayan tabaka altında yer alan sivilaşabilen tabaka altında bulunan kil tabakası ile oluşturulan model üzerine genişliği 10 m, yüksekliği 15 m olan bir bina modellenmiştir.

Sonrasında seçilen model genişliğinin sonuçlar üzerinde etkileri irdelenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda farklı genişliklere (600 m, 800 m ve 1000 m'de) sahip modeller yapılmıştır. Modellere dair analizler gerçekleştirilmiştir. Model genişliği 600 m olan modelde sınır koşullarından kaynaklı yüksek ivme değerlerinin

model ortasında görüldüğü gözlemlenmiştir. Model ortasında meydana gelen boşluk suyu basınçlarının, model genişliğinin 800 m olduğu model için azaldığı, model genişliğinin 1000 m olduğu modelde ise daha stabil hale geldiği görülmüştür. Sınır koşullarının model üzerinde etkisinin azaltmak maksadıyla model genişliği 1000 m olarak seçilmiştir.

Sayısal analiz için davranışın modellenmesi ile ilgili olarak literatürde yer alan UBC3D-PLM bünye modeli seçilmiştir. İlgili parametreler ilgili sayısal analiz programı tarafından hazırlanan kullanım kılavuzunda yer alan formülasyonlar kullanılarak kalibre edilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda P_{ref} değeri atmosferik basınca eşit olması maksadıyla 100 Kpa olarak kabul edildiği görülmüştür. Bu çalışmada Boulanger (2003b) tarafından K_{σ} düzeltme katsayısı ilişkisi için önerilen denklem doğrultusunda UBC3D-PLM bünye modeli kapsamında kullanılan bir model sabiti olan P_{ref} değeri her bir tabaka için kalibre edilerek, elde edilen değerleri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir.

Üst tabaka etkisinin araştırılması maksadıyla, zemin üstünde yer alan ilk 10 m'lik kısımda bulunan sıvılaşmayan tabaka kalınlığı 2'şer metre kalınlıklarla artırılması ile elde edilen toplam altı adet model için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma potansiyelinin tayininde literatürde kullanılan sıvılaşma şiddet indeks değerleri deterministik yöntemler ile tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerin tanımlamaları yapılmıştır. Belirlenen zemin profilleri doğrultusunda analizler gerçekleştirilerek model üzerinden belirlenen noktalar vasıtasıyla gerekli karşılaştırmalar yapılmaya çalışılmıştır.

Model üzerinde belirlenen noktalar üzerinde görelî kat öteleme, oturma, kaykılma ve eğilme kontrolleri açısından gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Öncelikle literatürde yer alan Ishihara (1985) tarafından önerilen ön değerlendirme abağı ile doğrultusunda değerlendirildiğinde elde edilen sayısal analiz sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Literatürde yer alan sıvılaşma şiddet indeks ölçeklemelerinin birbirleri değerlendirilmesi halinde anlamca farklı kavram üzerinden yanlış değerlendirmeye sebebiyet verebileceği anlaşılmıştır. Ishihara (1985) tarafından hacimsel birim deformasyon değerinin %1 dolayına varması kabulüne dayalı ve sadece ön değerlendirme amacıyla kullanılan abakta sonlu elemanlar yazılımı ile modellenen modellere dair analiz sonuçlarının uyumlu olduğu izlenmiştir.

Deterministik yöntemler ile elde edilen sıvılaşma şiddet ölçek değerlendirilmelerinde elde edilen sonuçların kavramsal olarak değerlendirilmesine katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Bazı sıvılaşma şiddet ölçekleme yöntemlerinin kullanılması uygulanacak proje açısından uygun olamayacağı asla göz önünden kaçırılmamalıdır. Sönüm oranının seçiminde model bazında analiz sonuçlarının büyük ölçüde etkilediği ayrıca literatürde yer alan sönüm parametrelerinin belirlenme yöntemlerinin birbirinden farklı olduğu ve birçok araştırmada sönüm değerlerinin belirlenme çalışmalarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmesi yönünde değerlendirmelerin yapıldığı görülmektedir.

Literatürde sıvılaşmayan tabakaların HS-Small olarak tanımlanması önerilmekte, ancak bu çalışmada sıvılaşan tabaka üzerinde sıvılaşmayan tabakanın sıvılaşp, sıvılaşmayan tabaka üzerindeki etkiyi simüle etmesi maksadıyla tüm tabakaların UBC3D-PLM bünye modeli ile modellenmesi sağlanmıştır. Sıvılaşmayan tabakada boşluk suyu basıncı artı değerde basınç üreterek toplam efektif gerilmeye ilave dayanım getirdiği görülmektedir. Bu durumun sıkı kumda oluşması halinde hacimsel

genişlemeye sebep olacak şekilde davranış sergilediğinden hesaplanan artık boşluk suyu basınçları +/- şeklinde işaret değiştirdiği şekilde değerlendirilmektedir.

Modeller arasında ivme değerlerinin değerlendirilmesi program tarafından elde edilen PSA diyagramları üzerinden karşılaştırılması yapılmıştır. Sıvılaşılan tabakanın olmadığı ile sıvılaşılan tabakanın olduğu modeller arasında yüzeye ulaşan ivme değerleri açısından büyük farklar olduğu görülmüştür. Bu durumun model içerisinde yer alan sıvılaşılan tabakanın yüzeye ulaşan ivme değerinde sönümlenmesinden kaynaklı daha az olacak şekilde ivme değerlerinin aktardığı görülmüştür. Yapının zemin üzerinde oturması ile ilgili olarak; sıvılaşmayan üst tabaka kalınlığı arttıkça ortaya çıkan oturma miktarında azalmaların olduğu görülmüştür.

Göreceli kat ötelenmesi açısından hasar derecelerinin tespit edilmesi; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) çerçevesinde hasar değerlendirmeleri yapıldığında ilk 10 m için sıvılaşmayan tabaka altında yer alan sıvılaşılan tabaka kalınlığı arttıkça alt yapının zarar görmesinden, ağır hasara doğru bir kademeli değerlendirme yapılmıştır. İlk 10 m'lik tabakada sıvılaşılan tabakanın var olması halinde etkisinin yüzeye ulaşması ihtimalinin yüksek olacağı düşünülmektedir.



DETERMINATION OF THE EFFECT OF STRATIFICATION ON LIQUEFACTION OF SOILS USING NUMERICAL ANALYSIS

SUMMARY

In the light of increasing scientific studies, many researches are being carried out on liquefaction, and one of the current topics is the examination of the upper layer effect in determining the liquefaction potential of soils. In this study, it is aimed to examine the stratification effect with the numerical analysis method in order to contribute to the literature on the preliminary evaluation chart suggested by Ishihara (1985) and the liquefaction severity index evaluations suggested by other researchers. In the studies carried out; It is aimed to evaluate the results obtained by using the numerical analysis program in determining the deformations that will occur in the structure above a non-liquefied layer in case there is a layer with liquefaction potential, in terms of relative storey drift, sliding, bending and settlement behaviors.

First of all, in order to make the evaluation, a drilling log containing liquefied and non-liquefied layers in Sakarya/Adapazarı was selected and experimental parameters of the selected drilling log were obtained.

A soil model was created, consisting of SM3 (without liquefaction potential) soil layer specified in the selected drilling log, on top, SM4 (with liquefaction potential) and CH4 clay layer underneath.

First of all, one-dimensional analysis of the SK-2 column with a depth of 75 m within the selected log scope was carried out using the "1999 Marmara Earthquake record" in the literature, and it was observed that the SM3 layer did not liquefy, but the SM4 layer did. Before the one-dimensional (1D) analysis of the SK-2 drilling log in question, a point at -25 m elevation was defined and an acceleration record of the said point was obtained.

When the acceleration record in the 25 m of the drilling log with a depth of 75 m was analyzed by modeling the first 25 m of the log in question and the results were compared, it was seen that there was a similarity.

After the one-dimensional (1D) analysis, it was observed that when the same model was modeled as (2D), the acceleration values occurring on the ground surface increased by approximately 2 times. It has been determined that this situation may be caused by boundary conditions such as the seismic behavior occurring in the ground causing reflection in the ground and the model width not being kept short or long enough.

Within the scope of investigating the upper layer effect, a building with a width of 10 m and a height of 15 m was modeled on the model created with the clay layer under the non-liquefiable layer and the liquefiable layer.

Afterwards, the effects of the selected model width on the results were tried to be examined. In this context, models with different widths (600 m, 800 m and 1000 m) were made. Analyzes of the models were carried out. It was observed that in the model

with a model width of 600 m, high acceleration values due to boundary conditions were seen in the middle of the model. It was observed that the pore water pressures occurring in the middle of the model decreased for the model with a model width of 800 m, and became more stable in the model with a model width of 1000 m. In order to reduce the effect of boundary conditions on the model, the model width was chosen as 1000 m.

For numerical analysis, the UBC3D-PLM body model, which is available in the literature regarding modeling of behavior, was chosen. Relevant parameters were calibrated using the formulations in the user manual prepared by the relevant numerical analysis program. In the studies in the literature, it has been observed that the P_{ref} value is accepted as 100 Kpa in order to be equal to atmospheric pressure. In this study, the P_{ref} value, which is a model constant used within the scope of the UBC3D-PLM constitutive model, was calibrated for each layer in line with the equation suggested by Boulanger (2003b) for the K_σ correction coefficient relationship, and analyzes were carried out on the obtained values.

In order to investigate the upper layer effect, numerical analyzes were carried out for a total of six models obtained by increasing the non-liquefied layer thickness in the first 10 m above the ground by 2 meters. Liquefaction severity index values used in the literature to determine liquefaction potential were determined by deterministic methods. Definitions of the obtained values were made. Analyzes were carried out in line with the determined soil profiles and necessary comparisons were tried to be made through the points determined on the model.

Necessary comparisons were made on the points determined on the model in terms of relative storey drift, settlement, shifting and bending controls. First of all, when evaluated in line with the preliminary evaluation chart suggested by Ishihara (1985) in the literature, it was seen that it was compatible with the numerical analysis results obtained.

It has been understood that if the liquefaction severity index scalings in the literature are evaluated together, they may lead to incorrect evaluation based on different concepts. It has been observed that the analysis results of the models modeled by Ishihara (1985) with the Abakta finite element software, which is based on the assumption that the volumetric deformation value reaches around 1% and is used only for preliminary evaluation, are compatible.

An attempt was made to contribute to the conceptual evaluation of the results obtained in the liquefaction intensity scale evaluations obtained with deterministic methods. It should never be overlooked that the use of some liquefaction intensity scaling methods may not be suitable for the project to be implemented. It is seen that the selection of the damping ratio is greatly affected by the analysis results on a model basis, and also that the methods of determining the damping parameters in the literature are different from each other and in many studies, evaluations have been made to state that the studies on determining the damping values need to be improved.

In the literature, it is recommended to define non-liquefied layers as HS-Small, but in this study, all layers were modeled with the UBC3D-PLM body model in order to simulate the effect of the non-liquefied layer on the non-liquefied layer. It is seen that the pore water pressure in the non-liquefied layer produces positive pressure and adds additional strength to the total effective stress. If this situation occurs in tight sand, it

behaves in a way that causes volumetric expansion, so the calculated residual pore water pressures are considered to change sign as +/-.

The acceleration values between the models were evaluated and compared using the PSA diagrams obtained by the program. It has been observed that there are large differences in terms of acceleration values reaching the surface between models without a liquefied layer and with a liquefied layer. It has been observed that this situation transfers acceleration values to a lesser extent due to the damping of the liquefied layer in the model at the acceleration value reaching the surface. Regarding the structure's settlement on the ground; It has been observed that as the thickness of the non-liquefied upper layer increases, the amount of settlement that occurs decreases.

Determining the degree of damage in terms of relative storey drift; When damage assessments were made within the framework of the Turkish Building Earthquake Regulation (TBDY), a gradual assessment was made from damage to the infrastructure to severe damage as the thickness of the liquefied layer under the non-liquefied layer for the first 10 m increased. It is thought that if there is a liquefied layer in the first 10 m layer, its effect will have a high probability of reaching the surface.



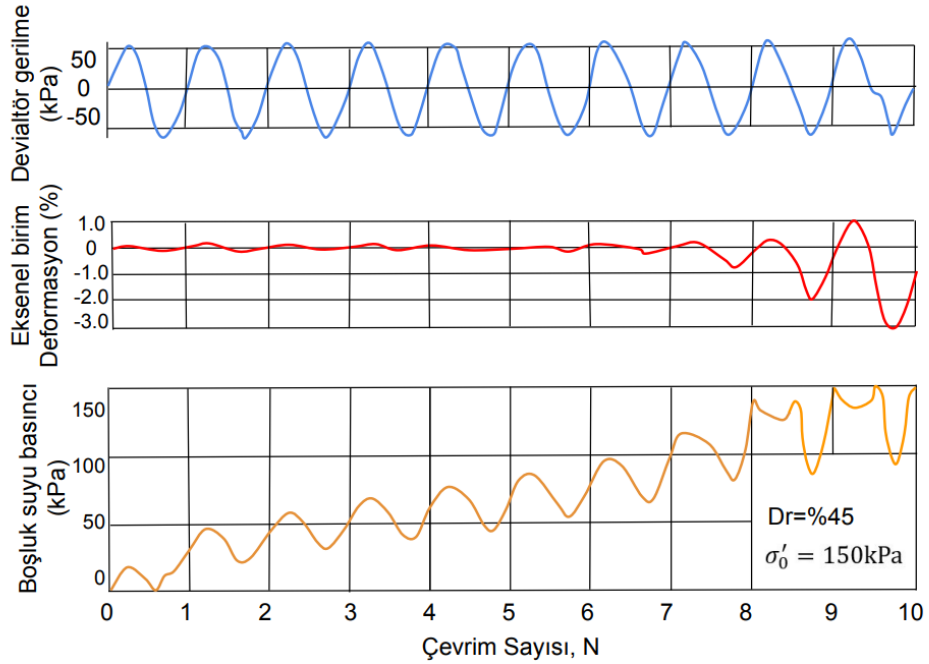
1. ZEMİNDE SIVILAŞMA

1.1. Sıvılaşmanın Tanımı

Literatürde yer alan kaynakların bazılarında sıvılaşmanın statik şartlarda da oluşması ifade edilmekle beraber, kuvvetli yer sarsıntıları altında zeminin drenajsız davranması sonucu artan boşluk suyu basıncının zeminde önemli bir kayma direnci azalması oluşturması ve zeminin sıvı gibi davranması olarak ifade edilmektedir. (Mollamahmutoğlu, Babuçu, 2006).

1.2. Sıvılaşma Mekanizması

Sıvılaşma durumu laboratuvar şartlarında genellikle dinamik basit kesme deneyi ve dinamik üç eksenli basınç deneyleri ile araştırılmaktadır. (Özkan, 2017).



Şekil 1.1. Örnek bir drenajsız üç eksenli çevrimsel yük deneyi sonuçları

Şekil 1.1 incelendiğinde çevrim sayısına bağlı olarak; deviatör gerilme, eksenel birim deformasyon, boşluk suyu basınç değerlerine ait değişimler grafik bazında gösterilmektedir. Görüldüğü üzere deviatör gerilme periyodik olarak uygulanmış, boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye ulaşması ile eksenel birim deformasyon

grafisinde büyük genlik değişimlerinin meydana geldiği görölmektedir. Bu durum sıvılaşmanın başladığı an olarak kabul edilir.

Gevşek ve sıkı kuru kum üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde gevşek kumda kayma gerilmesi arttıkça daha sıkı bir duruma geçtiği, sıkı kum üzerinde yapılan deney sonucunda ise gevşek durumuna yani hacim artması eğilimine geçmesi üzerine Skempton “Deney sırasında hemen hemen hiç hacim değişikliği olmaması için zeminin başlangıçtaki boşluk oranı ne olmalıdır?” sorusunu “kritik boşluk oranı” olarak açıklamıştır.

Kritik boşluk oranı ile sıvılaşma olgusu arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Eğer zeminin boşluk oranı kritik boşluk oranından fazla ise zemin, deprem kaynaklı kayma gerilmelerine maruz kaldığında, hacim azalması yönünde davranış sergileyeceğinden zemin içerisinde boşluk suyu basıncının artması ile sıvılaşma oluşabilecektir. Ancak zeminin boşluk oranı kritik boşluk oranından daha küçük bir değer ise hacim artması meydana geleceğinden sıvılaşmaya karşı depremin süresine bağlı olarak sabit olmayan bir dirençten söz edilebilecektir (Özkan, 2017). Diğer bir deyişle doğun gevşek kohezyonsuz bir zeminde hacimsel büzölme meydana gelmesi sonucunda boşluk suyu basıncı artmakta ve zemin sıvı özellikli bir davranış yapısı altına girmektedir.

Statik şartlarda;

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_s \quad (1.1)$$

Dinamik şartlarda;

$$\sigma'_v = \sigma_v - (u_s + u_d) \quad (1.1a)$$

$$(u_s + u_d) = \sigma_v \Rightarrow \sigma'_v = 0 \quad (1.1b)$$

σ_v : toplam gerilme

σ'_v : efektif gerilme

u_s : statik durumda boşluk suyu basıncı

u_d : dinamik durumda boşluk suyu basınç fazlalığı

1.3. Sıvılaşma-Efektif Gerilme İlişkisi

Doğun zemin koşullarında zeminde artan boşluk suyu basıncı etkisi altında zeminin geçirimlilik katsayısına bağlı olarak boşluk suyu basıncının sönümlenme süresi

değişmektedir. Boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile efektif gerilmelerde artış meydana gelmekte ve zemin daha sıkı bir yapı kazanmaktadır (Sönmezer, 2019).

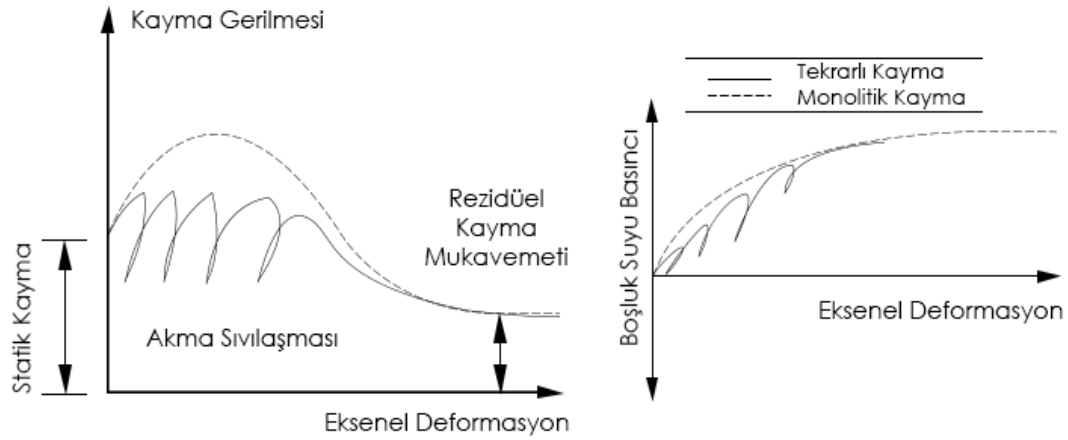
1.4. Sıvılaşma Türleri

Sıvılaşma “akma türü sıvılaşma” ve “çevrimsel hareketlilik” olmak üzere iki kavram ile ifade edilmektedir.

1.4.1. Akma türü sıvılaşma

Zeminin statik dengesi için gerekli olan kayma gerilmesinin, sıvılaşma anındaki zeminin rezidüel dayanımından büyük olması sonucunda meydana gelir. Büyük ve ani yer değişimlerine sebep olmaktadır. “Tam sıvılaşma” olarak da ifade edilebilmektedir (Mollamahmutoğlu, Babuçu, 2006).

Gevşek zeminlerde sıvılaşma öncesinde sahip olduğu statik kayma gerilmesinin sıvılaşma sonrasında zeminin daha dirençsiz bir yapıya büründüğü, boşluk suyu basıncının doğrudan bir artış eğiliminde olduğu durumu şekil 1.2’de gösterilmektedir.

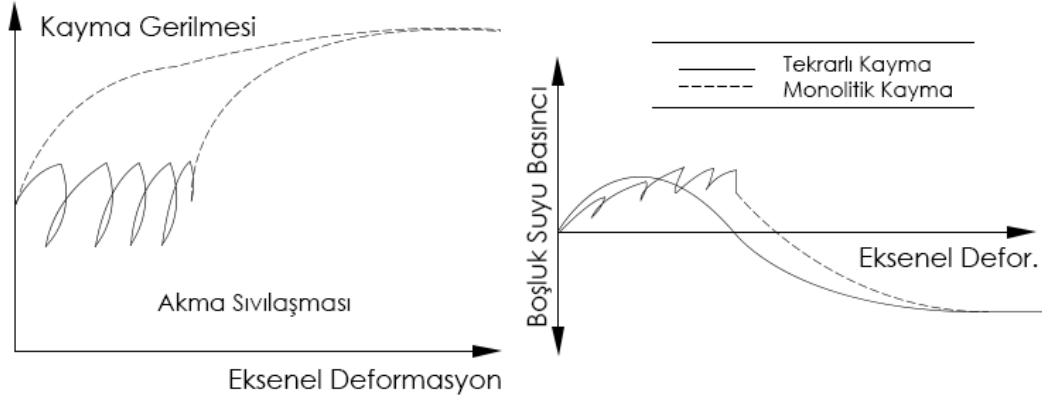


Şekil 1.2. Yeraltı su seviyesinin altında, gevşek zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlarda davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçu, 2006).

1.4.2. Çevrimsel hareketlilik

Zeminin statik dengesi için gerekli olan kayma gerilmesi değerinin, sıvılaşma anındaki zeminin dayanımından küçük olması olarak ifade edilmektedir. Artan boşluk suyu basıncı altında düz bir zeminde kum kaynamalarına sebep olarak büyük oturmalara, az eğimli zeminlerde ise yanal yayılma eğilimi gösteren sıvılaşma türüdür. “Kısmi sıvılaşma” olarak ifade edilebilmektedir (Mollamahmutoğlu, Babuçu, 2006).

Sıkı zeminlerde sıvılaşma öncesinde sahip olduğu statik kayma gerilmesinin sıvılaşma sonrasında zeminin daha dirençli bir yapıya büründüğü, boşluk suyu basıncının önce bir artış eğiliminde sonrasında azalma eğiliminde olduğu durum şekil 1.3’de gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Yeraltı su seviyesinin altında sıkı zeminin drenajın yeterli olmadığı durumdaki davranışı (Mollamahmutoglu ve Babuçcu, 2006).

1.5. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Arazi ve laboratuvar deneyleri ile yapılan çalışmalar ve deprem anında meydana gelen sıvılaşma olgusu doğrultusunda yapılan gözlemler neticesinde sıvılaşmaya sebep olan faktörlerin ortaya konulmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

1.5.1. Zemin cinsi

Önemli bir kohezyon değerine sahip olmayan zeminler sıvılaşmaya yatkın olan zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminler “temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan silt ve çakıllar” arazide temiz halde bulunmadıklarından barındırdıkları ince dane oranına göre birtakım kriterler belirlenerek sıvılaşma olgusuna etkisi araştırılmaktadır.

İnce daneli ve düşük plastisiteli zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesine yönelik olarak geliştirilen Çin kriterine (Wang, 1979) göre, likit limit değerinin %35’den küçük, kil yüzdesinin %15’ten küçük olması ile su muhtevası değerinin, likit limit değerinin %90’ından büyük olması şartlarının tamamının karşılanması halinde zeminlerin sıvılaşabileceği söylenmiştir (Şekil 1.4).

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1. 0,005 mm'den küçük dane yüzdesi | $\leq 15 \%$ |
| 2. Likit Limit, LL | $\leq 35 \%$ |
| 3. Su Muhtevası | $\geq 0,9 \times LL$ |

Şekil 1.4. Geliştirilmiş Çin kriteri (Finn vd.,1994).

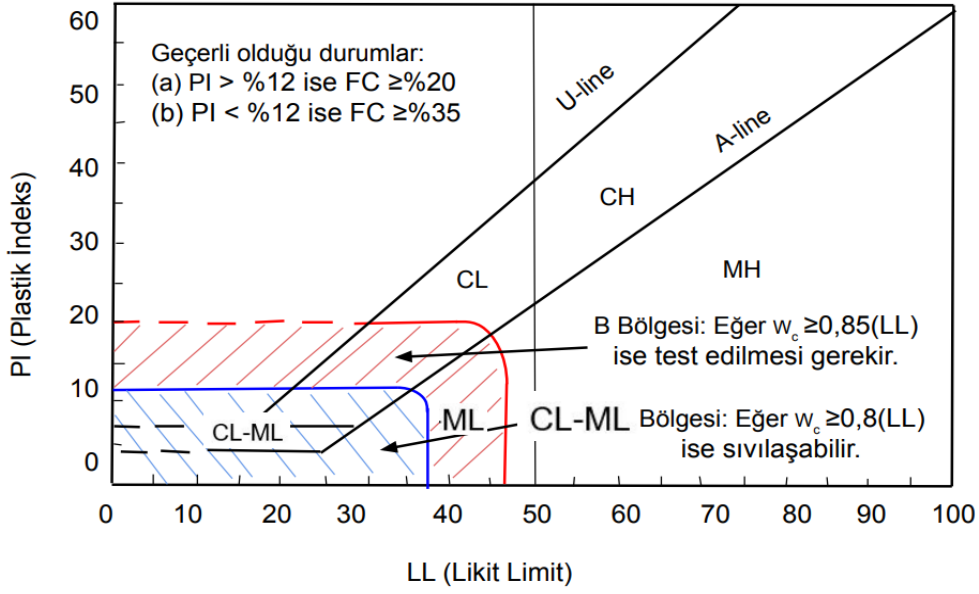
Kum ile ince tane karışımları üzerinde Andrew ve Martin (2000) tarafından yapılan sınıflama potansiyellerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışma neticesinde zeminin likit limit değerinin %32'den küçük, kil içeriğinin %10'dan küçük olması sonucunda zeminin sınıflanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Diğer sonuçlar Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Siltli ve killi kumların sınıflama özelliği (Andrew ve Martin, 2000).

	Kil İçeriği < %10	Kil İçeriği \geq %10
LL < 32	Sınıflanabilir	İleri çalışma gerekir
LL \geq 32	İleri çalışma gerekir	Sınıflanmaz

Siltlerin sınıflama potansiyelinin belirlenebilmesi amacıyla siltli kumlu bir yapıya sahip Adapazarı bölgesi için meydana gelen sınıflamanın olduğu zeminler incelenerek Bol ve diğ (2010) tarafından Çin kriterinin belirlendiği gibi literatürde Adapazarı kriteri olarak yerini almaktadır. Adapazarı kriterinde özetle; kil oranının %15'den az, likit limit değerinin %33'den az, sıvılık indisinin 0.9'dan yüksek ve D50 değerinin 0.02 mm'den yüksek olması olarak belirlenmiştir.

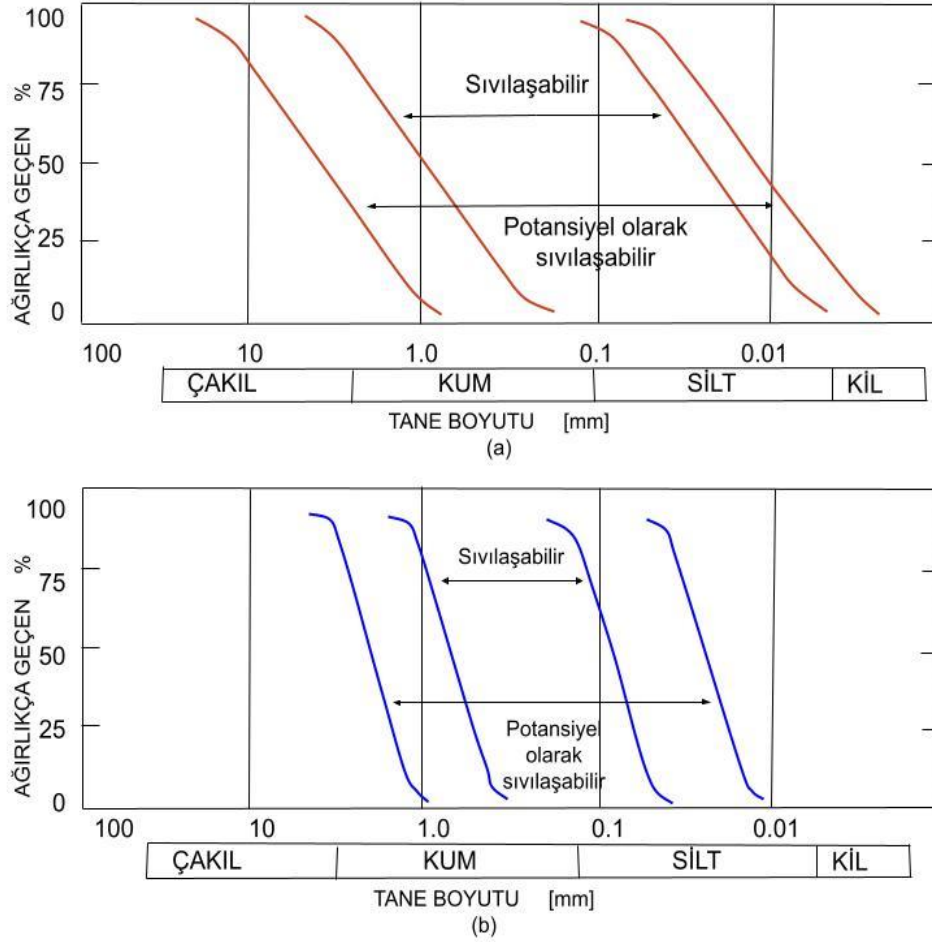
Seed vd. (2003) tarafından gerçekleştirilen ince daneli zeminlerin sınıflama potansiyelinin tespit edilmesine yönelik Şekil 1.5'de gösterilen grafik ortaya konmuştur.



Şekil 1.5. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilme grafiği (Seed vd.,2003).

1.5.2. Dane boyutu dağılımı

İshihara tarafından sıvılaşma potansiyelinin; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, siltli ve çakıl olan zeminlerde olduğu ifade edilmekle beraber maden atıklarının temiz kumlardan bile daha fazla sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 1.6'da sıvılaşma potansiyeli yüksek dane dağılım eğri aralığı gösterilmektedir (Iwasaki, 1986).



Şekil 1.6. Sıvılaşmaya duyarlı dane boyut aralığı (Iwasaki, 1986).

1.5.3. Zeminin sıkılık derecesi (Bağıl birim hacim ağırlık)

Zeminin sıkılığı, sıvılaşmanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği doğrultusunda bize birtakım fikirler verebilmektedir. Seed ve İdriss (1971) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda zeminin sıkılığı ile sıvılaşma potansiyeli arasında Tablo 1.2’de yer alan bağıntı ortaya konulmuştur.

Tablo 1.2. Sıvılaşmaya bağıl birim hacim ağırlık ve pik yer ivmesinin etkisi (Seed ve İdriss, 1971).

Pik Yer İvmesi	Sıvılaştırılabilirlik			
	Az	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
0,10 g	Dr > %54	%33 <Dr < %54	%17 <Dr < %33	Dr < %17
0,15 g	Dr > %73	%48 <Dr < %73	%22 <Dr < %48	Dr < %22
0,20 g	Dr > %85	%60 <Dr < %85	%28 <Dr < %60	Dr < %28
0,25 g	Dr > %92	%70 <Dr < %92	%37 <Dr < %70	Dr < %37

İvme değeri arttıkça, sıvılaşma potansiyel derecesini belirleyen bağıl birim hacim ağırlık değeri de artmaktadır.

1.5.4. Yer altı su seviyesi ve zeminin drenaj koşulları

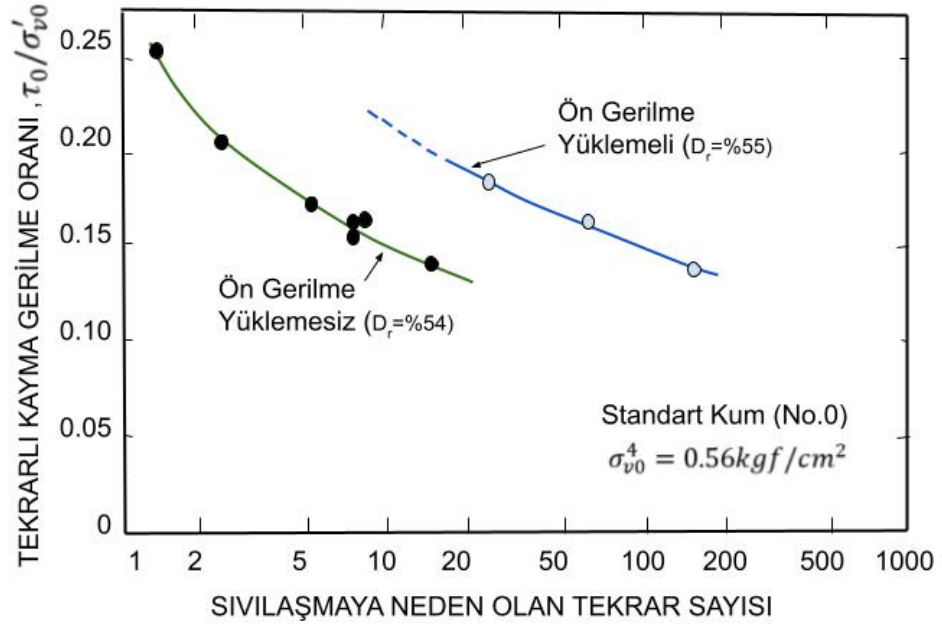
Aşırı boşluk suyu basıncının hızlı sönümlenmesi sonucunda zeminin sıvılaşmayabileceği ifade edilerek çok yüksek geçirimsizliğe sahip zemin tabakalarına komşu olunması halinde ise sıvılaşma potansiyelinin azalacağı ifade edilmektedir (Mollamahmutoğlu, Babuçcu, 2006). Hidrolik rejim dikkate alındığında, sıvılaşma analizinde geçmişte kaydedilmiş en yüksek yer altı su seviyesi kullanılmalıdır.

1.5.5. Deprem büyüklüğü ve süresi

Sıvılaşmanın laboratuvar ortamında temsil edilebilmesi, deney bünyesinde yer alan tekrarlı çevrim sayısı ile boşluk suyu basınçlarının artması neticesinde büyük genlikli hacimsel değişimlerin gözlemlenmesidir. Maksimum yer ivmesinin büyük oluşu da sıvılaşma riskini artıran bir parametre olduğundan dolayı sıvılaşma ile deprem büyüklüğünün doğru orantılı olduğu aşikardır. Bilinen en uzun deprem olma özelliği ile 1964 Alaska depremi ($M_w=9,2$; $M_L=8,4$; süre: 240 s) incelendiğinde sıvılaşmanın 90'ncı saniyede belirlediği belirlenmiştir. Tezcan ve Özdemir (2004) tarafından yapılan çalışmada deprem süresi 90 saniye ve altında olsaydı, teorik olarak sıvılaşmanın gerçekleşmesinin söz konusu olmayacağı bildirilmiştir

1.5.6. Sismik geçmiş

Seed (1976) tarafından ortaya konulan ve Şekil 1.7'de sunulan çalışma incelendiğinde zeminin maruz kaldığı tekrarlı yüklemeler ile sıvılaşmaya karşı daha dirençli bir duruma geçtiği görülmektedir.



Şekil 1.7. Sismik geçmişin sıvılaşma direncine etkisi (Seed, 1976).

1.5.7. Yaşlanma ve çimentolanma

Genç zemin çökellerinin sıvılaşma hassaslığı, eski zemin çökellerine kıyasla daha büyüktür (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Yoshimi vd. (1989), uzun süre çevre basıncının etkidiği zeminlerin zamanla sıvılaşma direncini artırdığını göstermiştir.



2. DETERMİNİSTİK YÖNTEMLERLE SIVILAŞMA OLASILIĞININ BELİRLENMESİ

Sıvılaşma potansiyeline sahip zemin tabakalarının sıvılaşacağıının tespit edilmesine yönelik literatürde birçok yöntem yer almaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları, devirsel gerilme oranının tespit edilmesinde kullanılan standart penetrasyon (SPT) deneyi ile koni penetrasyon (CPT) yöntemleridir.

Devirsel gerilme oranı yaklaşımının bir diğer adı “yaklaşık yöntem” olarak isimlendirilmektedir. 1971 yılında Seed ve İdriss tarafından yayımlanan bu yöntem en fazla 15 m derinlik için ön görülen ampirik bir hesap yöntemidir. Bu yöntemle sıvılaşma direncinin belirlenmesi için iki değişkenin hesaplanması veya tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunlar deprem esnasında zeminde meydana gelebilecek gerilme oranının (CSR) belirlenmesi ile direnecek gerilme oranının (CRR) SPT, CPT deneyleri ile tespit edilmesidir. Sıvılaşma riskinin olmadığı durum için gerekli güvenlik sayısının (CRR/CSR) değerinin 1 veya 1,1 olması gerektiği yönünde bilgiler yer almaktadır.

Deprem Yüklerinin Tanımlanması: Zemin tepki analizleri ile zemin tabakasının farklı derinliklerde kayma gerilmesi değerlerinin zamanla değişimi belirlenmektedir. Böylelikle depremin süreksiz ve düzensiz özellikleri karakterize edilmektedir. Yaklaşık yöntemde ise deprem esnasında oluşabilecek maksimum kayma gerilmesinin %65’inin alınması ile üniform kayma gerilmeleri elde edilir (Mollamahmutoğlu, Babuçu, 2006).

Temiz Kum Eşdeğeri Düzeltmesi: FC (ince dane) içeriğine bağlı olarak yapılan düzeltme işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.1. SPT Değerlendirme Yöntemleri

Arazi deneyleri içerisinde sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesine yönelik en çok tercih edilen yöntemdir.

2.1.1. Robertson ve Wride (1998) SPT değerlendirmesi

Arazide ölçülen SPTN değerlerini, numune alıcısının tipi, tij uzunluğu, hangi tür şahmerdan kullanıldığı, efektif gerilmenin büyüklüğü, enerji oranı, kullanılan tijin çapı etkilemektedir. Deneyin yapıldığı derinlikteki ince dane dağılım yüzdesi de SPT verilerini etkilemektedir. Bu yüzden aşağıdaki formüldeki SPT verilerini düzeltme işlemi denklem 2.1 ile yapılmaktadır.

$$(N_1)_{60} = N_M * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (2.1)$$

Burada, N_m ölçülen SPT darbe sayısı, C_N efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü (Denklem 2.1), C_R , C_S , C_B ve C_E sırası ile tij boyuna göre, standart olmayan numune alıcı için, sondaj kuyusu çapına göre ve tokmak oranına göre düzeltme faktörleridir. Bu düzeltmelere ilave olarak ince dane oranına (FC) göre düzeltmenin yapılması gerekmektedir.

$$C_N = \left(\frac{P_A}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,5} \quad (2.1a)$$

SPT değeri için düzeltme katsayıları Tablo 2.1'de sunulmaktadır.

Tablo 2.1. SPT düzeltme katsayıları (Robertson and Wride 1998)

Faktör	Alet Değişkeni	Terim	Düzeltilme
Üst Tabaka Yünü	---	C_N	$(PA/\sigma'_{v0})^{0.5}$
Üst Tabaka Yünü	---	C_N	$C_N \leq 1.7$
Şahmerdan Enerji Oranı	Donat (makaralı) tipi şahmerdan	C_E	0.5-1.0
Şahmerdan Enerji Oranı	Güvenli Şahmerdan	C_E	0.7-1.2
Şahmerdan Enerji Oranı	Otomatik düşülü Donut (Makaralı) Şahmerdan	C_E	0.8-1.3
Kuyu Çapı	65-115 mm	C_B	1.0
Kuyu Çapı	150 mm	C_B	1.05
Kuyu Çapı	200 mm	C_B	1.15
Tij Boyu	< 3 m	C_R	0.75
Tij Boyu	3-4 m	C_R	0.8
Tij Boyu	4-6 m	C_R	0.85
Tij Boyu	6-10 m	C_R	0.95
Tij Boyu	10-30 m	C_R	1.0
Numune Alma Yöntemi	Standart numune alıcı (kılıfı)	C_S	1.0
Numune Alma Yöntemi	Standart numune alıcı (kılıfı)	C_S	1.1-1.3

P_a = yaklaşık 100 kPa değerindeki referans gerilmesi σ'_{vo} P_a ile aynı birime sahip düşey efektif gerilmedir. Düzeltme katsayısı 1.7 değerini aşmamalıdır.

Elde edilen düzeltilmiş SPT değerlerine son olarak ince dane oranı düzeltmesi yapılması gerekmektedir (Denklem 2.2).

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (2.2)$$

Burada α ve β katsayıları hesapları ince dane oranına göre aşağıdaki gibi yapılmaktadır (Denklem 2.2a-e).

$$\alpha = 0 \quad FC \leq 5\% \quad (2.2a)$$

$$\alpha = \exp \left[1.76 - \left(\frac{190}{FC^2} \right) \right] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (2.2b)$$

$$\alpha = 5 \quad FC \geq 35\% \quad (2.2c)$$

$$\beta = 1.0 \quad FC \leq 5\% \quad (2.2ç)$$

$$\beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1,000)] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (2.2d)$$

$$\beta = 1.2 \quad FC \geq 35\% \quad (2.2e)$$

Elde edilen değer ile;

$$CRR_{7.5} = \left[\frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{\{10(N_1)_{60} + 45\}^2} - \frac{1}{200} \right] \quad (2.3)$$

Denklem 2.3 kullanılarak $CRR_{7.5}$ hesap edilmektedir. $(N_1)_{60} < 30$ olduğu durumlar dışında zemin sıvılaşmaz olarak değerlendirilmektedir.

2.1.2. CSR değerinin bulunması

Aşağıdaki formül kullanılarak zemin tabakalarında deprem esnasında oluşması muhtemel ortalama kayma gerilmesinin ilgili katmandaki efektif gerilmeye oranını ifade eden CSR hesap edilmektedir.

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (2.4)$$

Denklem 2.4 yer alan ifadeler aşağıda belirtildiği gibidir;

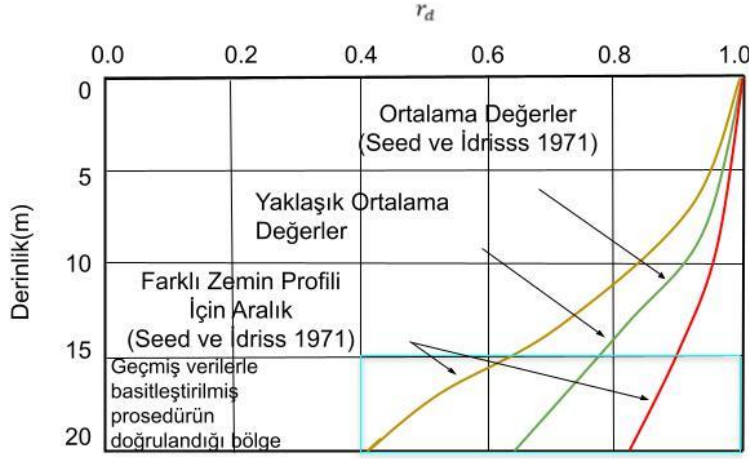
a_{max} : yüzeydeki en büyük yatay gerilme,

σ_{vo} : toplam düşey gerilme,

σ'_{v0} : efektif düşey gerilme,

r_d : gerilme azaltma katsayısı

z : metre cinsinden yüzeyden itibaren derinliktir.



Şekil 2.1. Gerilme azaltma katsayısının grafiği (Robertson and Wride, 1998)

2.1.3. Idriss ve Boulanger (2006) SPT değerlendirmesi

Yapılan çalışmalar neticesinde ilgili eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$(CSR)_{M=7.5} = \frac{CSR}{MSF} = 0.65 \left(\frac{\sigma_{v0} a_{max}}{\sigma'_{v0}} \right) \frac{r_d}{MSF} \frac{1}{K_G} \quad (2.5)$$

R_d değeri, α ve β katsayısına bağlı olarak aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır (Denklem 2.6, 2.6a, 2.6b).

$$Ln(r_d) = \alpha(z) + \beta(z)M \quad (2.6)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (2.6a)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (2.6b)$$

Formülde yer alan z ile; tabakanın metre cinsinden derinliği, M ile; moment büyüklüğü değeri ifade edilmektedir. Yukarıdaki (Denklem 2.6a-b) $z < 34$ olduğu durumlar için geçerlidir. Derinlik $z \geq 34$ m ise r_d değeri denklem 2.6c ile hesap edilmektedir.

$$r_d = 0.12 \exp(0.22M) \quad (2.6c)$$

Idriss 1971 tarafından yapılan çalışmalarda aşağıda sunulan (Denklem 2.7, 2.7a) eşitlikler üzerinde çalışılmıştır.

$$MSF=6.9\exp\left(\frac{-M}{4}\right)-0.058 \quad (2.7)$$

$$MSF \leq 1.8 \quad (2.7a)$$

Örtü yükü düzeltme katsayısı ile ilgili Boulanger (2003), Boulanger ve Idriss (2004) tarafından aşağıda (Denklem 2.8 ve 2.9) sunulan eşitlikler ifade edilmektedir.

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln\left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_A}\right) \leq 1.0 \quad (2.8)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 17.3D_R} \leq 0.3 \quad (2.9)$$

Idriss ve Boulanger (2003) tarafından yapılan sınıvlaşma çalışmalarında $(N_1)_{60}$, D_R arasındaki korelasyon aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir;

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (2.10)$$

Sonrasında Boulanger ve Idriss (2004) tarafından yapılan çalışmalar ışığında denklem 2.11'deki şekliyle revize edilmiştir.

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60}}} \quad (2.11)$$

Efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü (C_N) Liao ve Whitman (1986a) tarafından önerilen 2.20 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$C_N = \left(\frac{P_A}{\sigma'_{v0}}\right)^{0.5} \quad (2.12)$$

Ancak bu çalışmada Boulanger (2003) için de önerilen yaklaşım kullanılmıştır.

$$C_N = \left(\frac{P_A}{\sigma'_{v0}}\right)^m \quad (2.13)$$

Burada üst m doğrusal olarak D_R ile bağıntılıdır (Denklem 2.13a).

$$m = 0.784 - 0.52D_R \quad (2.13a)$$

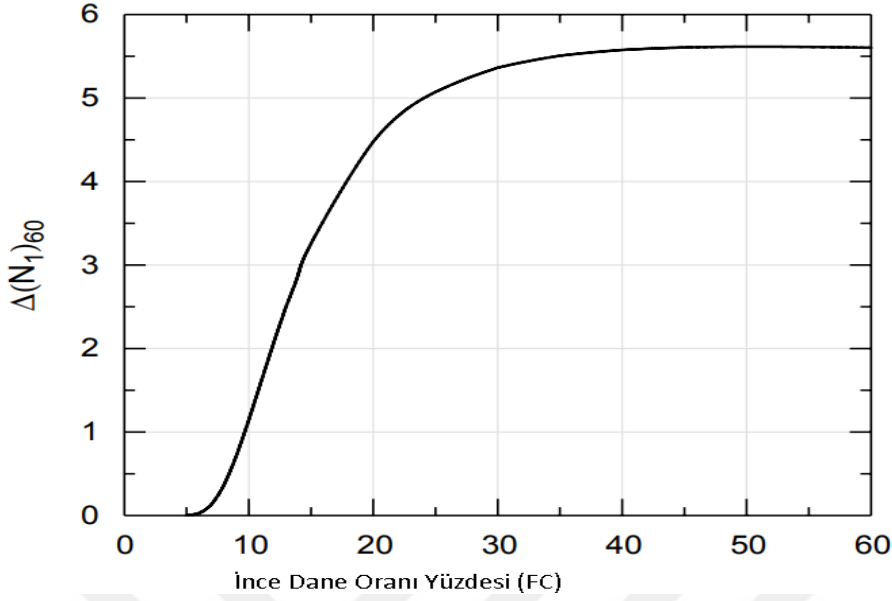
Boulanger ve Idriss (2004) için C_N düzeltme faktörü $(N_1)_{60}$ parametresine bağlı olarak;

$$C_N = \left(\frac{P_A}{\sigma'_{v0}}\right)^a \leq 1.7 \quad (2.14)$$

$$a = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60}} \quad (2.14a)$$

Bu formül $(N_1)_{60}$ 'un en fazla 46 olduğu değerler için güvenilirdir.

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2,8 \right\} \quad (2.15)$$



Şekil 2.2. İnce Dane Oranı - $\Delta(N_1)_{60}$ Değişimi

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (2.16)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC+0.1} - \left(\frac{15.7}{FC+0.1} \right)^2 \right) \quad (2.16a)$$

2.2. CPT Değerlendirme Yöntemleri

Koni penetrasyon deneyi (CPT) sonuçları kullanılarak farklı yöntemler ile sıvılaştırma potansiyeli analizi yapılabilmektedir.

2.2.1. Robertson ve Wride (1998) CPT değerlendirmesi

Temiz kumlar için önerilen denklem 2.17, 2.18, 2.18a ve 2.18b kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılabilmektedir (Robertson and Wride, 1998).

$$(q_{c1N})_{cs} < 50 \rightarrow CRR_{7.5} = 0.833 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1,000} \right] + 0.05 \quad (2.17)$$

$$50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \rightarrow CRR_{7.5} = 93 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1,000} \right]^3 + 0.08 \quad (2.18)$$

$$q_{c1N} = C_Q \left(\frac{qc}{Pa} \right) \quad (2.18a)$$

$$C_Q = \left(\frac{PA}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (2.18b)$$

Kil zeminler için n=1, temiz kumlarda n=0.50, ince dane içeriğine sahip kumlarda n=0.50-1.00 arasında alınarak işlemler tesis edilmektedir.

Zemin indeksi zemin tipini ifade eden “n” değerine bağlı olarak hesaplanmalıdır. (Denklem 2.19, 2.19a ve 2.19b).

$$I_C = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (2.19)$$

$$Q = \left[\frac{(q_c - \sigma_{v0})}{P_A} \right] \left[\left(\frac{P_A}{\sigma'_{v0}} \right)^n \right] \quad (2.19a)$$

$$F = \left[\frac{f_s}{(q_c - \sigma_{v0})} \right] \times 100 \% \quad (2.19b)$$

Denklem 2.20 kullanılarak siltli kumlar için normalize edilmiş penetrasyon direnci (q_{c1N}), aşağıdaki ilişkiyle eşdeğer bir temiz kum değerine (q_{c1N})_{CS} çevrilmelidir.

Öncelikle n=1 kabul edilerek yapılan hesaplarda bulunan Q değeri kullanılarak I_C değeri hesap edilir ve bu değer 2.6'dan küçük ise n=0.5 alınarak hesaplar tekrarlanır ve I_C değeri aynı şekilde, 2.6'dan küçükse “n” değeri için yapılan tahmin doğrudur. 2,6'dan büyük ise n=0.7 alınarak I_C tekrar hesaplanır ve sıvılaşma analizlerinde kullanılır.

$$(q_{c1N})_{CS} = K_C q_{c1N} \quad (2.20)$$

$$I_C \leq 1,64 \rightarrow K_C = 1.0 \quad (2.20a)$$

$$I_C > 1,64 \rightarrow K_C = -0.403I_C^4 + 5,581I_C^3 - 21,63I_C^2 + 33,75I_C - 17,88 \quad (2.20b)$$

Zemin katmanının sıvılaşmaya karşı direnci denklem 2.21 ve 2.22 eşitlikleri vasıtasıyla hesaplanabilmektedir.

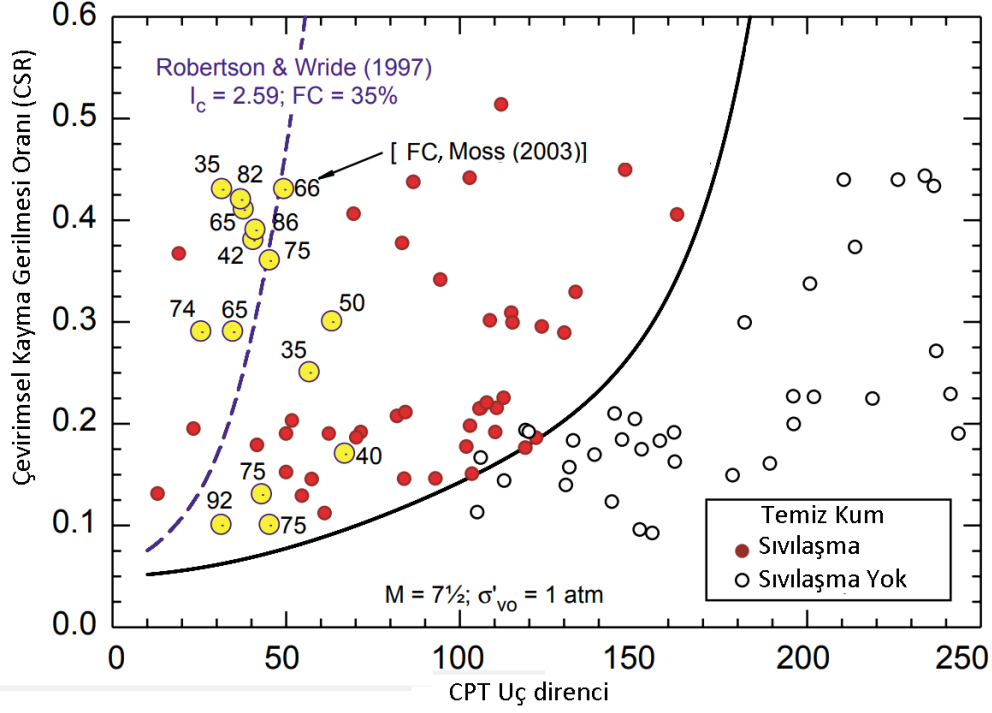
$$q_{c1N,cs} < 50 \rightarrow CRR_{7.5} = \frac{0.833q_{c1N,cs}}{1000} + 0.05 \quad (2.21)$$

$$50 \leq q_{c1N,cs} < 160 \rightarrow CRR_{7.5} = 93 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (2.22)$$

2.2.2. Idriss ve Boulanger (2006) CPT değerlendirmesi

CRR denklem 2.23 kullanılarak hesap edilmektedir.

$$CRR = \exp \left\{ \frac{q_{c1N}}{540} + \left(\frac{q_{c1N}}{67} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1N}}{80} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1N}}{114} \right)^4 - 3 \right\} \quad (2.23)$$



Şekil 2.2. Yüksek ince dane oranı içeriğine sahip olan uyumsuz zeminler için saha vaka geçmişlerinin karşılaştırılması ve $I_c = 2.59$ (görünür $FC = \%35$) olan zemin için Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen eğri.

Boulanger ve Idriss (2004) için C_N düzeltme faktörü $(N_1)_{60}$ parametresine bağlı olarak denklem 2.24 ile hesaplanmaktadır.

$$C_N = \left(\frac{P_A}{\sigma'_{vo}} \right)^\beta \leq 1.7 \quad \beta = 1.338 - 0.249(q_{C1N})^{0.264} \quad (2.24)$$

2.3. Sıvılaşma Şiddet Parametreleri

Sıvılaşmanın meydana gelip gelmeyeceğinin yanı sıra meydana gelmesi halinde oluşacak hasar durumunu ortaya koymak maksadıyla araştırmacılar tarafından birtakım şiddet parametrelerinin hesaplanmasına yönelik ampirik denklemler ortaya atılmaktadır.

2.3.1. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) yöntemi

Iwasaki ve diğ. (1982) tarafından LPI metodu olarak literatürde yer kazanan ve araştırmacılar tarafından en çok kullanılan LPI metodu ile sıvılaşma potansiyeli için farklı risk seviyelerine karşılık belirtilen değerler Çizelge 2.2'de sunulmaktadır.

Tablo 2.2. LPI Değişim Tablosu.

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)	Sıvılaşma Potansiyel Derecesi
0	Çok Düşük
$0 < LPI \leq 5$	Düşük
$5 < LPI \leq 15$	Orta
$LPI > 15$	Yüksek- Çok Yüksek

20 metre derinlik için aşağıda sunulan (denklem 2.25) ilgili eşitlik sıvılaşma potansiyel durumunu değerlendirmek maksadıyla geliştirilmiştir.

$$LPI = \int_0^{20} Fw(z)dz \quad (2.25)$$

Eşitlikte;

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

$$F=0 \quad FS > 1 \text{ için}$$

Burada, derinlik ağırlık faktörü $w(z)=10-0.5z$, z ise derinliği ifade etmektedir.

2.3.2. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN) yöntemi

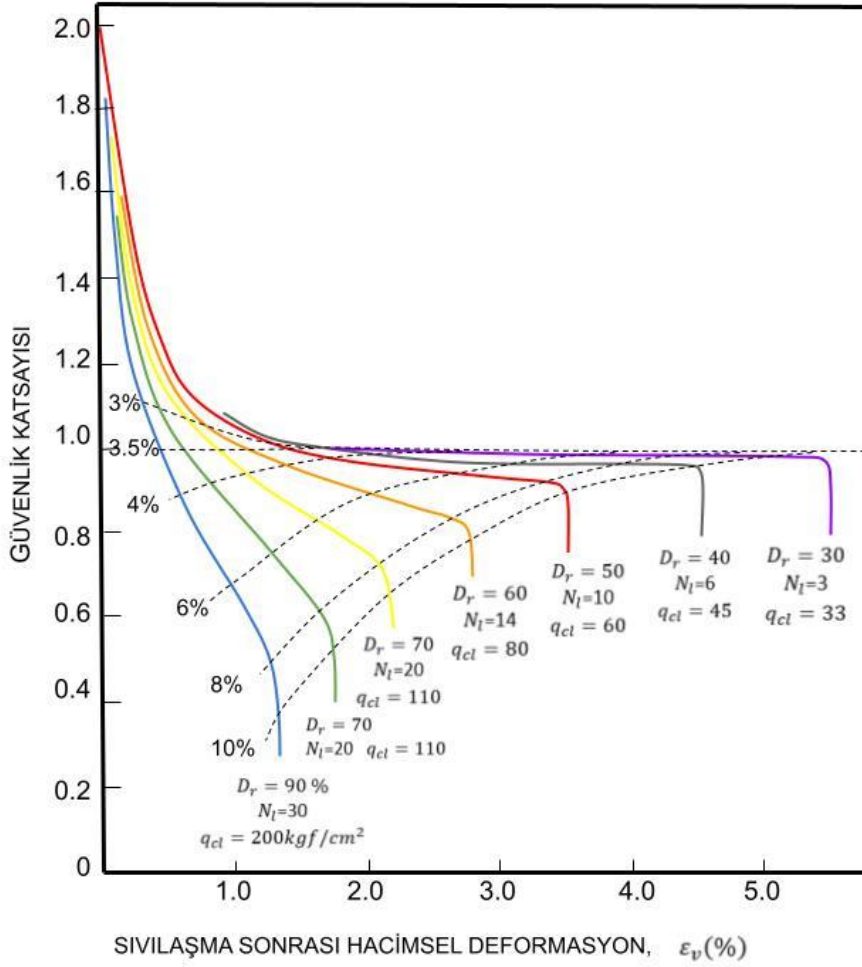
Yeni Zelanda’da 2011 yılında meydana gelen depremler neticesinde sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) doğrultusunda yapılan hesapların arazideki durumla uyumlu olmadığı görüldüğünden Tonkin ve Taylor (2013) tarafından literatürdeki eksikliği gidermek maksadıyla sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) tanımlanmıştır.

Sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) aşağıda sunulan denklem 2.26 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (2.26)$$

Burada ε_v , değerlendirilen tabaka için hacimsel şekil değiştirmeyi, “ z ” ise derinliği ifade etmektedir.

Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından hacimsel şekil değişim yüzdesinin ortaya konulabilmesi amacıyla oluşturulan ve Şekil 2.4’de sunulan grafik literatürdeki yerini almaktadır.



Şekil 2.3. Temiz kumlar için hacimsel şekil değiştirme. (Ishihara ve Yoshimine, 1992).

Van Ballegooy ve diğ. (2014) tarafından yapılan sıvılaşma sonrasında arazi üzerinde meydana gelen hasar etkilerini belirlemede; sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının 1'den büyük olduğu durumda bile değerlendirmeye alınması hususu, LPI ile LSN arasındaki farkı ortaya koyduğu gibi arazi üzerinde yapılan karşılaştırma sonucunda sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 2.3. Sıvılaşma şiddeti katsayısının değerlendirilmesi.

Sıvılaşma Şiddeti Katsayısı (LSN)	Sıvılaşma Potansiyeli
$0 < LSN \leq 10$	Sıvılaşma yok
$10 < LSN \leq 20$	Sınırlı sıvılaşma
$20 < LSN \leq 30$	Orta derece sıvılaşma
$30 < LSN \leq 40$	Orta-yüksek derece sıvılaşma
$LSN > 50$	Aşırı derece sıvılaşma

2.3.3. Sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) yöntemi

Adapazarı'ndan 263 adet bölgeden elde edilen veriler ile oluşturulan zemin tabakaları üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde Yılmaz (2004) tarafından Iwasaki (1982) temel alınarak denklem 2.27 ortaya çıkartılmıştır.

$$LSI = \int_0^{20} PL.TH.WF \quad (2.27)$$

PL = Sıvılaşma İhtimali

TH = Sıvılaşma Potansiyeline Sahip Tabaka Kalınlığı

WF= Sıvılaşabilir tabakaya olan mesafe

Seed (2001) tarafından PL değeri için aşağıdaki denklem önerilmektedir.

$$P_L = \Phi \left(\frac{\left((N_1)_{60} * (1 + 0.004 * FC) - 13.32 * \ln(CSR) - 29.53 * \ln(M_W) - 3.7 * \ln(\sigma'_{\theta}) + 0.05 * FC + 44.97 \right)}{2.70} \right) \quad (2.27a)$$

WF değerinin hesabı için denklem 2.27b kullanılmaktadır.

$$WF = 10 - 0.5z \quad (2.27b)$$

Tablo 2.4. Sıvılaşma şiddeti indeksinin değerlendirilmesi.

Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI)	Sıvılaşma Potansiyeli
0 < LSI < 0,35	Sıvılaşma Potansiyeli Çok Düşük
0,35 < LSI < 1,30	Sıvılaşma Potansiyeli Düşük
1,3 < LSI < 2,5	Sıvılaşma Potansiyeli Yüksek
LSI < 2,5	Sıvılaşma Potansiyeli Çok Yüksek

2.3.4. Sıvılaşma şiddetinin tahmini (IL) yöntemi

Iwasaki (1986) tarafından sıvılaşma şiddetinin tahminine yönelik yapılan çalışma neticesinde;

$$I_L = \sum (1 - F_{LR}) * W(Z) * Z \quad (1.28)$$

$$W(Z) = 10 - 2/3 * Z \quad (1.28a)$$

Formülleri doğrultusunda gerekli işlemlerin tesis edilmesinden sonra aşağıda sunulan Tezcan ve Özdemir (2004) tarafından tanzim edilen çizelge marifetiyle araştırma yapılacak bölgede sıvılaşma potansiyelinin derecesinin tespit edilmesine yönelik çalışmalar yapılabilmektedir.

Tablo 2.5. Sıvılaşma derecesi IL ile sıvılaşma şiddeti arasındaki ilişki (Tezcan ve Özdemir, 2004).

Sıvılaşma Derecesi	0	4-10	8-20	>20
Sıvılaşma Potansiyeli	Çok Düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek

2.3.5. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması (LS) yöntemi

LPI Yöntemine göre güvenlik sayısı değerinin 1,2 olması halinde zeminin sıvılaşmayacağı şeklinde değerlendirme yapılmasının tartışılabilir bir durum oluşturduğuna bahisle Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) tarafından yapılan çalışma ile Chen ve Juang (2003) çalışmaları önerilmektedir. Bu yöntem ile özetle;

$$L_S = \int_0^{20} P_L(z)W(z)dz \quad (2.29)$$

$$GS \leq 1,411 \text{ için;} \quad P_L = \frac{1}{1+(GS/0,96)^{4,5}} \quad (2.29a)$$

$$GS > 1,411 \text{ için;} \quad P_L = 0 \quad (2.29b)$$

Tablo 2.6. Chen ve Juang (2000)'e göre sıvılaşma potansiyeli sınıflandırması.

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

3. SIVILAŞMA ANALİZİNDE ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

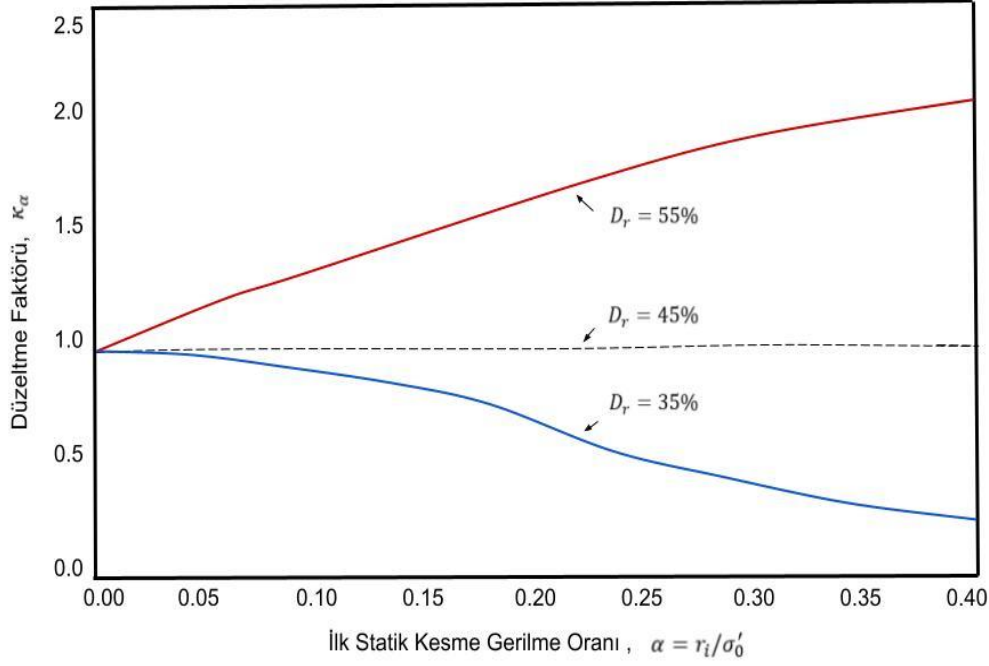
Sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesine yönelik analizlerde genellikle zemin tabakalarının yatay ve eğimsiz kabulü ile çalışmalar yapılmaktadır. Eğimli bir arazi üzerinde konumlandırılmış bir yapının var olması olası bir sıvılaşma durumunda hasarlar çok daha fazla olabilecektir (Çetin ve Unutmaz, 2004).

İnşa edilen bir yapının temelini zemine aaktardığı yükleme neticesinde oluşacak kayma gerilmeleri zemin dayanımını olumsuz olarak etkilerken, inşa sonrasında meydana gelecek gerilme artışları ile sıvılaşmaya karşı direncin artması beklenmektedir.

3.1. Statik Kayma Gerilmesi Etkisi

Statik kayma gerilmesi (τ_i) ile efektif gerilmenin (σ_{v0}') birbirine oranı; statik kayma gerilmesi etkisi (α) ile ifade edilir.

Sıkı kum ile gevşek kumun drenajlı ve drenajsız olma durumuna göre sıvılaşma potansiyeli açısından davranış modelleri önceki başlıklar altında incelenmişti. CSR değerinin sıklık durumuna göre ilgili grafikten ilk statik kayma gerilmesi oranı(α) değerine karşılık gelen K_α okunarak, eşdeğer çevrimsel gerilme oranı için düzeltme katsayısına ulaşılabilmektedir. Şekil 3.1'de Seed (1983) tarafından önerilen K_α - α ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Farklı bağıl birim hacim ağırlıktaki zeminler için K_α - α ilişkisi.

3.2. Çevre Basıncındaki Değişimin Etkisi

Çevre basıncındaki artış zeminin dayanım mukavemetini arttıracığından sıvılaşmaya karşı bir direnç oluşturmaktadır. Bu direncin değerlendirmeye alınabilmesi için aşağıda sunulan denklem 3.1 ile düzeltilmiş CRR değeri hesaplanabilmektedir. Bu düzeltme faktörü K_σ ile gösterilmektedir.

$$CRR = CRR_{\sigma=1, \alpha=0} \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha \quad (3.1)$$

Boulangier ve Idriss (2004) tarafından denklem 3.1a ve 3.1b tavsiye edilmektedir.

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{v0'}}{P_a}\right) \leq 1.0 \quad (3.1a)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 17.3 \cdot D_R} \leq 0.3 \quad (3.1b)$$

Temiz kum için önerilen $N_{1,60}$, q_{c1N} ve D_R korelasyonu;

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{1,60}}{46}} \quad (3.2)$$

$$D_R = 0.478(q_{c1N})^{0.264} - 1.063 \quad (3.3)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{N_{1,60}}} \quad (3.4)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1N})^{0.264}} \quad (3.5)$$

3.3. Bina Tepkisinin Etkisi

Yapıdan kaynaklı oluşacak kayma gerilmelerinin tespit edilmesinde denklem 3.6 kullanılmaktadır.

$$\tau \approx 0.65 \cdot 0.8 \frac{S_a}{g} \cdot \frac{W}{B} \quad (3.6)$$

W= Yapının ağırlığı,

S_a = Binanın doğal periyoduna karşılık gelen spektral ivme katsayısı

B= Temel genişliği

3.4. Düşey Efektif Gerilme Artışı

Arazi üzerinde yapı veya herhangi bir yükten kaynaklı olarak derinliğe bağlı olarak zemin içerisinde düşey efektif gerilme artışı meydana gelmektedir.

Yapının zemin üzerinde oluşturduğu iyileştirme sonrası için zeminin deprem esnasında meydana gelecek kayma gerilmelerine göstereceği direncin değişmediği kabulü ile zeminin depremden kaynaklı alacağı kayma gerilmelerinin değerlendirilmesinde kullanılan CSR'a ait formülde gerilme artışları ilgili denkleme eklendiğinde CSR değerinin azalma eğiliminde olduğu bununda sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının artması ile sonuçlanacağı şeklinde değerlendirilmektedir.

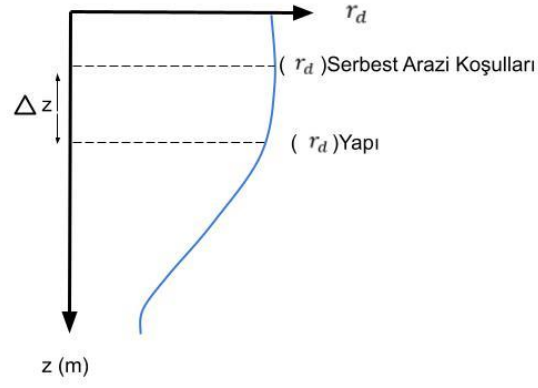
$$CSR_{yapı} = 0.65 r_d \frac{(\sigma_{v0} + \Delta\sigma)}{(\sigma_{v0}' + \Delta\sigma)} \frac{a_{max}}{g} \quad (3.7)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3.8)$$

Derinliğe bağlı hesaplanan r_d katsayısı, toplam ve efektif gerilmelerin hesabında kullanılan denklem 3.9 ile bir derinlik farkı (Δz)'nin dikkate alınması gerekmektedir.

$$\Delta z = \frac{\Delta\sigma}{\gamma} \quad (3.9)$$

Şekil 3.2'te sunulan r_d katsayısı grafiği üzerinde (Δz) değeri de göz önünde bulundurulduğunda r_d katsayısı açısından CSR değerinde bir azalmanın görüleceği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2. Referans derinlik için serbest arazi koşullarında ve yapı etkisi altında r_d katsayısının şematik gösterimi.



4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dülger (2015)'in yaptığı çalışmada sıvılaşma ile ilgili hasarların tahminine yönelik çeşitli bünye modelleri geliştirilmiş ve bu bünye modellerinin doğrulanması amacıyla nümerik analiz sonuçlarının, laboratuvar ve arazi verileri ile karşılaştırılması yöntemiyle çalışmanın Plaxis programında yer alan UBCSAND bünye modelinin kullanıcı tanımlı hale getirilmesinden sonra özellikle kumun sıvılaşma tahmini için UBC3D-PLM (Basit efektif gerilme modeli) adını alan sıvılaşma modeli kullanılarak nümerik analiz yapılması amaçlanmıştır. Velacs santrifüj model sonuçları ile nümerik modellemede elde edilen boşluk suyu basınç artışları ve ivme değerleri karşılaştırılarak girdi parametrelerinin etkisi hesaplanmıştır. Ayrıca eğimli arazide yapılan santrifüj deney sonuçları ile nümerik analiz sonucunda elde edilen boşluk suyu basınç artışları karşılaştırılmıştır. Daha sonra üzerinde deprem sırasında alınmış boşluk suyu değerleri tutulan Wildlife arazisi nümerik olarak modellenmiş ve boşluk suyu basınç artışları karşılaştırılmıştır. 1999 Kocaeli depremi sırasında Carrefoursa arazisi üzerinde meydana gelen sıvılaşma olan bölgede jet-grout iyileştirilmesi ile ilgili nümerik inceleme çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak; santrifüj modeli ile ilgili olarak karşılaştırılan boşluk suyu basınç artışlarının ve kayıt edilen ivme değerlerinin uyumlu olduğu, ancak arazide kayıt edilen deplasmanların biraz fazla çıktığı görülmüştür. Wildlife arazisinde ölçülen boşluk suyu basınçlarının artış zamanının nümerik analizde biraz geç başladığı ancak değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. SPT-N sayıları belirli oranda artırılarak boşluk suyu basınçlarının neden geç başladığı araştırılmış ancak tespit edilememiştir. Jet-grout iyileştirmenin sağladığı yararın Plaxis çözümleri ile pek anlaşılamadığı ifade edilmiştir (Dülger, 2015).

Özenç (2019)'in çalışmasında günümüze kadar meydana gelmiş olan depremler sonucunda sıvılaşma kaynaklı yapısal hasarların tespiti ile ilgili birçok çalışmanın yapıldığı ifade edilerek zemine ait parametrelerin değiştirilmesi sonucunda yüzeysel temelde meydana gelen oturma ve dönme davranışlarının incelenmesi amacıyla; Plaxis programı üzerinde model sınırı 160 m x 40 m olacak şekilde 5 zemin katmanı ve üzerinde 1 adet betonarme bina düşünülerek oluşturulan modelde parametrelerin "soil test" özelliği kullanılarak elde edilen sonuçların, laboratuvardan elde edilen

sonuçlarla karşılaştırılması, hassasiyet analizinin yapılması ve PM4SAND bünye modeli kullanılarak parametre analizlerin yapılması işlemleri tesis edilmiştir. Sonuç olarak; PM4SAND modelinin parametrelerinde olası bir hatanın daha farklı sonuçlar meydana getirdiği görülmekle beraber PM4SAND bünye modelinin, UBCSAND modeline göre parametrelerinin daha karmaşık ve hassas olduğu ifade edildiğinden hata yapma olasılığının fazla olduğundan bahsedilmektedir. Hassaslık analizi sonucunda Kayma Modülü Katsayısı ve Büzülme Oranı sonuçlarını direkt değiştirdiği görüldüğünden SPT sayılarının belirlenmesinin büyük önem arz ettiğine değinilmiştir. Parametre analizleri sonucunda; boşluk suyu basınçlarında bariz farklılıkların görüldüğü ifade edilerek Plaxis Kullanım Kılavuzunda da yer aldığı şekli ile PM4SAND bünye modeli için drenajlı bir bölge oluşturma eyleminin öneminden bahsedilmektedir (Özenç, 2019).

UBC3D-PLM modelinin düşük çevre basınçları altında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının, yüksek çevre basınçları altında oluşan artık boşluk suyu basınçlarına göre çok daha iyi modellendiğine değinilerek ilgili model ile sıvılaşma başlangıcının modellenebildiği belirtilmiştir. UBC3D-PLM bünye modeli ile ilgili literatür araştırmalarında genellikle artık boşluk suyu basınçlarının incelendiği ve ivme zaman ilişkisi üzerinden detay verilmediği, boşluk suyu basıncının sönüm etkisi incelenmediği, sönüm etkisinin göz önüne alınıp alınmadığından bahsedilmiştir. Plaxis UBC3D-PLM bünye modeli kullanılarak Rayamojhi (2015) tarafından geliştirilen model santrifüj deneylerinden bir tanesi seçilerek modelleme yapılmış, analiz aşamasında öncelikle Ko prosedüre göre hesaplar yapılarak, sıvılaşacak zemin hardening soil olarak model üzerinden analiz yapılarak UBC3D-PLM bünye modeli tanımlanarak analiz aşamasına geçildiğine değinilerek, boşluk suyu basınçları ile ilgili olarak; sönümlenmenin meydana gelmediği, sıvılaşmanın başlama zamanı ile boşluk suyu basınç değerlerinin model ile uyumlu olduğu, sıvılaşma analizinden sonra ilave bir konsolidasyon adımı uygulanması neticesinde artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesinin mümkün olabileceği ifade edilmiştir (Özener, 2019).

Samsun ilinin Atakum ilçesinde bulunan inceleme alanında belirli deprem büyüklüğü ve buna bağlı belirlenen en büyük yatay ivme değerleri için sıvılaşma potansiyelinin, derinliğe bağlı olarak araştırılması ve ilgili oturmaların hesaplanması amaçlanan çalışmada; sahadan elde edilen veriler ile Basitleştirilmiş Yönteme göre sıvılaşma analiz sonuçları ile Diana nümerik analiz programı/ Towhata-İai bünye modeli ile

yapılan analiz sonuçlarının ilgili ivme ve deprem büyüklüklerine göre inceleme sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır (Ertek, 2015). Çalışmada oturma hesapları; İshihara ve Yoshimine (1992) ile Tokimatsu ve Seed (1986) yöntemlerine göre ilgili deprem büyüklükleri ve ivme değerlerine göre hesap edilmiştir. Oturma miktarları ile ilgili olarak; iki hesap yöntemi ile hesaplanan oturma miktarlarının müsaade edilebilir limitlerin çok üzerinde olduğu ifade edilmiştir.

İzmir Bayraklı bölgesinde kazı esnasında elde edilen silt-kum karışımı üzerinde farklı ince dane oranlarına sahip numuneler üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde, silt içeriği için %40 eşik değerinin önemi belirlenmiş, %40'a kadar olan ince dane oranının artması durumunda CSR değerinde artma, %40'dan fazla ince dane oranına sahip numuneler üzerinde ince dane içeriğinin artması durumunda CSR değerinde azalma görüldüğü ifade edilmektedir. Ayrıca hacimsel deformasyon miktarının ince dane oranı ile arttığı, yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur (Karakan, 2016).

Kuru numuneler üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneyinde numunelerin bilgisayar sistemi ile kontrollü sabit hacim altında kesilmesi durumunda düşey gerilmenin eş değer drenajsız boşluk suyu basıncına eşit olduğu, numunelerin kuru olması halinde bile eşdeğer boşluk suyu basınç değerinin hesaplanabildiği ifade edilmekle birlikte; sıvılaşmanın başlama anının numunenin sıklık değeri ile güçlü bir bağ bulunduğu, göreceli sıklık değerindeki artışın CSR değerinde azalmaya sebep olduğu ifade edilmektedir (Eseler Bayat, 2017).

İtalya'daki 2012 Emilia Romagna Depremi sonrasında hasar gören bir banka binasının zemininde yer alan düşük plastisiteli (ince dane oranı %40-%70) siltli kumlu tabaka üzerinde yapılan inceleme neticesinde, yapıdan kaynaklı başlangıç statik kayma gerilmesi değeri ile sıvılaşmaya karşı direncin olumsuz etkilendiği ifade edilmektedir. Literatürde yer alan e-CRR ilişkisi bakımından önerilen korelasyonların %30 hata payının olabileceğine dikkat çekilmektedir. Ayrıca ince dane değerlendirilmesinde %35 değerinin eşik değer kabul edilerek gerekli kıyaslama çalışmalarının yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir (Porcino, 2019).

Kumlu zeminlerin statik koşullarda sıvılaşma potansiyelinin irdelenebilmesi için drenajsız üç eksenli basınç deneyinin yapılması gerektiği ifade edilerek vaka analizleri incelendiğinde gevşek kumlu zeminlerin silt içerdiği belirtilmektedir. Silt-kum zeminlerin statik şartlarda sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesine yönelik yapılan

çalışmalarda ince dane oranı %0-%25 arasında tutularak deneyler gerçekleştirildiğinde ince dane oranı arttığında sıvılaşma potansiyelinin arttığı görülmektedir. Ancak temiz kuma silt ilave edildiğinde, bilindiği gibi sıvılaşma direncini artırmak yerine ince dane oranı diğer temiz kum numunelerine göre büyük olan numunede sıvılaşma direncinin en küçük çıkmasına yol açtığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda üniformluk katsayısı üzerinden karşılaştırma yapıldığında sıvılaşma direncini belirlemede etkin bir parametre olmadığı sonucuna varılmıştır. Hacimsel sıkışabilir olarak isimlendirilen, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirleme açısından başka bir değerlendirme yöntemi olarak kullanılması tavsiye edilmektedir (Etminan, 2016).

Boşluk boyutu 10^{-4} ile 10^{-1} mm arasında değişen numuneler üzerinde yapılan araştırma neticesinde Adapazarı kriteri ile “sıvılaşır” olarak çıkan numunelerin bazılarının zemin-su karakteristik eğrileriyle (SWCC) elde edilen boşluk dağılım eğrileri oluşturulmuştur. Sıvılaşma potansiyelinden söz edilebilmesi için zemindeki boşluk boyutunun 10^{-3} mm’den büyük olması gerektiği ifade edilmektedir. Adapazarı kriterine göre %8’den fazla kil içeren ve sıvılaşma potansiyeli bulunan numunelerin boşluk boyutuna göre yapılan değerlendirme neticesinde, boşluk boyutunun sınır değerden düşük olmasından dolayı sıvılaşmaz kabul edilebileceği değerlendirilerek; sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde boşluk geometri ve boyutlarının çok büyük bir öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır (Kanbur, 2011).

Çin Kriteri yerine evrensel olabilecek, 1999 Marmara Depremi sonrasında ortaya konulan “Adapazarı kriteri” Çin kriterinin geliştirilmiş hali olarak ifade edilebilir. Çin kriterinde olduğu gibi kıvam limitleri ve sıvılık indisi değerlerine ilave olarak ortalama dane boyu ile kil içeriği değerlerinin öneminden bahsedilmektedir (Sert ve Özocak, 2013).

İnce daneli zeminin deprem yükü altında davranışının daha iyi tespit edilmesiyle ilgili olarak “Piezocone testi” ile boşluk suyunun dağılım eğrileri ortaya konularak sönümlenmenin %90’ına karşılık gelen sürenin 300 saniyeden düşük olması halinde sıvılaşmadan bahsedilmesi gerektiği mütalaa edilerek gerekli değerlendirmeler neticesinde, artan kil içeriğine bağlı olarak sönümlenme sürelerinin arttığı görülmüş, bazı silt numunelerin laboratuvar ortamında hazırlanmasının güç olmasından bahsedilerek bu siltler için (Robertson,1990) tanzim edilen sınıflandırma grafiğinde 4 ve 5 numaralı bölge kapsamında sıvılaşabilir olarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Sert ve Özocak, 2013).

Siltlerin değerlendirilmesinde kumsu ve kilisi olarak iki farklı şekilde düşünülmesi gerektiği ve kumsu siltler üzerinde sıvılaşma potansiyelinin bulunduğu ifade edilmektedir. Ancak dinamik yükler altında kilisi silt ve killerde yumuşama probleminin bulunduğu hususuna dikkat edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Siltlerde sönümlenme eğrileri ile radyal konsolidasyon katsayılarının hesaplanarak boşluk dağılımının karakteristik özelliklerinin ortaya konulduğu çalışma neticesinde; boşluk dağılım grafiğinde %50'lik kısımda okunan boşluk çapı değeri 0,0004 mm'den küçük olan zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençli oldukları, kil oranının artması ile radyal konsolidasyon değerinin düştüğü, Adapazarı kriterlerinde yer alan kil içeriğinin %10'dan küçük olma kriterinin; yapılan deneyler sonucu hazırlanan sönüm grafiğinin davranış biçimini büyük oranda değiştirdiği, %10'dan az kil içeren numunelerde sönüm eğrisinin başlangıçtan itibaren yumuşak bir eğim ile düştüğü, %10'dan fazla kil içeren zeminlerde ise başlangıçta boşluk suyu basıncının arttığı sönüm eğrisinin ise parabolik bir şekle sahip olduğu görüldüğünden sıvılaşma potansiyeli taşımayacağı görüşü ifade edilmektedir (Özocak ve Tapan, 2014).

Zeminin sıvılaşmaya karşı gösterdiği direnç ile içerdiği silt miktarı arasındaki ilişkinin belirlenmesine yönelik yapılan başka bir çalışmada %5-%10-%30 oranlarında öğütülmüş silis silti ve doğal silt kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda öğütülmüş silis silti kullanılarak hazırlanan numunelerde artan ince dane miktarına karşılık numunenin sıvılaşmaya gösterdiği direncin arttığı, doğal siltte ise %5 ince dane oranında yükseldikten sonra %10 ve %30 ince dane oranlarında sıvılaşmaya karşı direncin azaldığı görüldüğünden, bu oranın kum ile siltin %50'sine karşılık gelen dane çapı oranı ile ilişkili olduğunun yanı sıra siltlerin şekil özellikleri ile ilgili olduğu görüşü ifade edilmektedir (Sönmezer, 2020).

İnce tane içeriğinin artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin düştüğünün ortaya konulduğu başka bir çalışmada efektif tane çapı ile geçirimsizlik katsayısı, içsel sürtünme açısı ve devirsel gerilme oranı arasındaki ilişkinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmada özetle; içsel sürtünme derecesi ve rölatif yoğunluğun artmasıyla devirsel gerilme oranının arttığı görülmüş, geçirimsizlik katsayısı ile herhangi bir bağıntı kurulamadığı ifade edilmektedir (Yılmaz, 2006).

İnce dane miktarı için eşik değerin %35 olarak ifade edildiği başka bir çalışmada; %35 ince dane oranına kadar sıvılaşmaya karşı direncin arttığı ve sonrasında ise azaldığı ortaya konulmuştur. Bununla birlikte eşik değerin her numune için hesaplanabilmesine

yönelik olarak boşluk oranı ve ortalama dane çap oranları arasında bir bağıntı önerilmektedir (Papadopoulou ve Tıka, 2008).

Altı adet gerçekleştirilen santrifüj deney sonuçları incelendiğinde; boşluk suyu basınçlarının artması ve tabakalar içerisine yerleştirilen ivme ölçer cihazları ile tutulan santrifüj kayıtlarından gevşek zemin özelliklerinin yer aldığı anlaşılacakla birlikte sarsıntılar sonucunda sıkı zemin tabakalarında su basıncının etkisi ile tepe noktalarında kaynamaların olması ve çatlakların genişlemesi ile zemin geçirimsizlik katsayısının değişebileceğinin ifade edildiği çalışmada gerçekleştirilen santrifüj deneylerinin sıvılaşma gerçekleşme mekanizmasını başarılı bir şekilde ortaya koyduğundan ileride yapılacak çalışmalar açısından güvenli sonuçların elde edilebileceği ifade edilmektedir (Kutter, 1992).

Başka bir santrifüj deneyinde düşey drenaja imkân sağlanması neticesinde şekil değişiminin fazla olduğu görülmüş ancak meydana gelen kum kaynama dağılımlarının orantısız olduğu, düşey drenaj kuyularında ise yapılan aşırı boşluk suyu ölçümlerinin ise aynı olduğu görülmektedir (Brennan, 2015).

UBC3D-PLM modelinin artık boşluk suyu basınçlarının düşük çevre basınçları altında çok daha iyi modellendiğine değinilerek ilgili model ile sıvılaşma başlangıcının modellenebildiği belirtilmiştir (Özener, 2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), sıvılaşan tabakanın 20 m'den fazla olması halinde sıvılaşmanın dikkate alınmamasını vurgulamaktadır. Sıvılaşma potansiyeli içeren tabakanın ilk 20 metre içinde yer alması halinde zemin sınıfı ZF seçilir ve bölgeye en az 11 deprem kaydını içeren özel deprem kaydı üzerinden yeni tepki spektrumlarının oluşturulması istenir. Bazı durumlarda uzmanlar tarafından nümerik analiz yapılma şartı aranmaktadır.

Diğer bir çalışmada deterministik yöntemler elde edilen sıvılaşma şiddet indeks değerlerinin nümerik analiz programında yer alan UBC3D-PLM (Basit efektif gerilme modeli) bünye modelinden elde edilen sonuçların karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma neticesinde; sıvılaşma şiddet indeks değerlendirmelerinin (çok yüksek, az, sınırlı vb.) birbirinden farklı olduğu, değerlendirme açıklamaları önündeki kavram kargaşasının açıklanması doğrultusunda literatüre katkı sunulması amaçlanmaktadır.

Temel ortamında dinamik yüklemeye maruz kalan farklı zemin türlerinin sıvılaşma davranışı üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar rapor edilmiş, sıvılaşmanın kumun deformasyona karşı direncine bağlı olduğu ve uygulanan kayma gerilmesinin hacmi azaltabileceğini veya yapıyı çökertebileceğini gösterilmiştir (Amini and Qi, 2000; El Fiky et al., 2020; Ibrahim, 2014; Lee, 2007; Mokhtar et al., 2014; Rollins and Seed, 1990; Vaid and Thomas, 1995; Yoshimi, 1967; Zeghal and Elgamal, 1994).

Sıvılaşma ayrıca dane boyutu, şekil, başlangıç gerilme durumuna bağlıdır. Depremlerden kaynaklanan düzensiz tekrarlı yüklemeler dinamik sıvılaşmanın en yaygın sebebidir (Ahmed and Al Shayea, 2017).

Dinamik yüklemelerinin neden olduğu zemin sıvılaşmasının sayısal modellenmesinin çok karmaşık bir iş olmasından dolayı Plaxis'te uygulanan UBC3D-PLM modelinin kullanımı ve doğrulanması, drenajsız üç eksenli dinamik yükleme deneyi ile çevrimsel basit kesme deneyinden elde edilen verilerin karşılaştırılması neticesinde boşluk suyu basınçlarının yüksek doğrulukta tahmin edilebildiği sonucuna varılmıştır (Petelas, 2012).

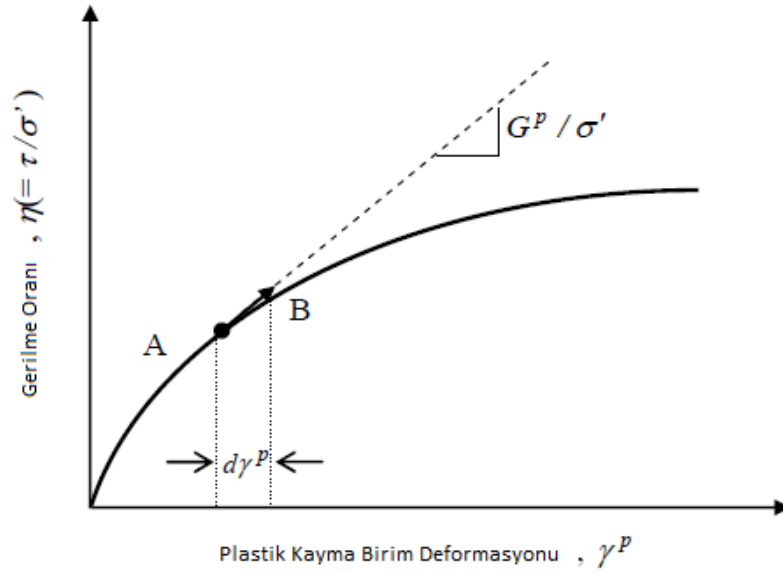
Petrol ve gaz boru hatlarının sismik tehlike altında her zaman endişe kaynağı olmasından kaynaklı olarak zeminlerin sıvılaşmasına bağlı olarak uygulayıcılara ve akademisyenlere çeşitli araştırmalar yapılması için vaka geçmipleri, analitik yöntemler, model testleri ve simülasyon sonuçları toparlanarak belli hususlarda ihtiyaç duyulacak noktalar vurgulanmıştır (M.Castiglia, 2020).



5. PLAXİS-UBC3D-PLM SIVILAŞMA MODELİ VE DİĞER BÜNYE MODELLERİ

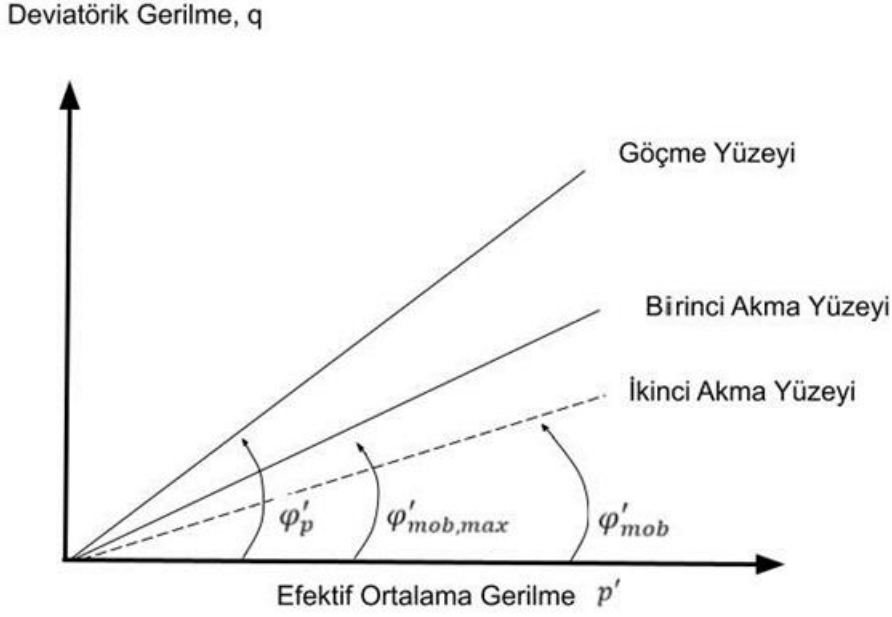
5.1. Giriş

Depremi meydana gelmesi ile zemin tabakaları içerisinde sismik dalgaların ilerlemesi neticesinde olası sıvılaşma davranışının tespit edilmesine yönelik olarak bünye modelleri geliştirilmiştir. Bu bölüm bünye modelinin içeriğinde yer alan tanımlamalardan yararlanılarak hazırlanmıştır. Bu modelleri genellikle efektif gerilme modelini baz almakta, boşluk suyu basınçlarının doğru değerlendirilebilmesi maksadıyla pekleşme kuralını uygulamaktadır. (Şekil 5.1)



Şekil 5.1. UBC3D-PLM hiperbolik pekleşme kuralı (Beaty ve Byrne).

UBC3D-PLM model davranışında akma yüzeyleri mobilize sürtünme açısına ulaşıldığında izotropik pekleşmeden kaynaklı olarak sürekli tekrarlanır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Akma yüzeyleri.

Kritik akma yüzeyi Denklem 5.1. yardımıyla ifade edilir.

$$f_m = \frac{\sigma'_{max} - \sigma'_{min}}{2} - \left(\frac{\sigma'_{max} - \sigma'_{min}}{2} + c' \cot \varphi'_p \right) \sin \varphi_{mob} \quad (5.1)$$

Modelin elastik davranışa yönelik ilgili parametreleri K_B^e elastik hacim modülü, K_G^e elastik kayma modülü denklem 5.2 ve 5.3 ile bulunmaktadır.

$$K_B^e = k_B^e \cdot P_A \cdot \left(\frac{p'}{P_A} \right)^{me} \quad (5.2)$$

$$K_G^e = k_G^e \cdot P_A \cdot \left(\frac{p'}{P_A} \right)^{ne} \quad (5.3)$$

Burada p' efektif gerilme, P_A referans gerilme (100 kPa olarak alınır) ve k_B^e , k_G^e sırasıyla hacim ve kayma modülü sayısal değerleri ve me , ne rijitliğe bağlı oran olarak ifade edilmektedir.

Modelin plastik davranışını temsilen bulunacak kayma deformasyon artışı $\delta\gamma_p$, denklem 5.4 ile ifade edilir. G^* değeri denklem 5.5 ile bulunabilmektedir.

$$\delta\gamma_p = \frac{1}{G^*} \delta \sin \varphi_{mob} \quad (5.4)$$

$$G^* = k_G^p \cdot \left(\frac{p'}{P_A} \right)^{np} \left\{ \left(1 - \frac{\sin \varphi_{mob}}{\sin \varphi'_p} \right) R_f \right\}^2 \quad (5.5)$$

Buradaki K_G^p plastik kayma deformasyon modülü sayısı, φ_{mob} mobilize sürtünme açısı, φ_p pik sürtünme açısı, p' efektif gerilme, n_p plastik kayma modülü üssü olarak tanımlanmaktadır. Pekleşme kuralı kapsamında φ_{mob} mobilize sürtünme açısının bulunmasına dair formül Denklem 5.6'da verilmektedir.

$$d\sin\varphi_{mob} = 1,5 K_G^p \cdot \left(\frac{p}{p_A}\right)^{n_p} \cdot \frac{p_A}{p_m} \cdot \left(1 - \frac{\sin\varphi_{mob}}{\sin\varphi_{peak}} \cdot R_f\right)^2 d\lambda \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'da yer alan $d\lambda$ plastik birim deformasyon çarpanı, n_p plastik kayma modülü üssü, R_f göçme oranıdır.

Ayrıca modelde birleşik olmayan akma kuralını temsilen Denklem 5.7'de sunulan formül kullanılmaktadır.

$$g = q - \alpha(p' + c \cot\varphi_p) \quad (5.7)$$

Burada,

$$\alpha = \frac{\sqrt{3} \sin \psi_m}{\cos\theta + \frac{\sin\theta \cdot \sin\psi}{\sqrt{3}}} \quad (5.8)$$

ile ifade edilir. Denklemde yer alan g plastik potansiyel fonksiyonu, ψ_m dilatasyon açısı, q deviatörük gerilme, p' efektif gerilme ve $\theta=30^\circ$ durumu ile Drucker Prager kriterine göre yüzey basınç noktası sabitleştirilmiştir.

Akma kuralı ise Denklem 5.9 ve Denklem 5.10 kullanılarak ifade edilebilir.

$$d\varepsilon_v = \sin \psi_m \cdot d\gamma_p \quad (5.9)$$

$$\sin \psi_m = \sin \varphi_m - \sin \varphi_p \quad (5.10)$$

Burada, $d\varepsilon_v$ hacimsel birim deformasyon artışı, $d\gamma_p$ plastik kayma birim deformasyon artışı, ψ_m mobilize dilatasyon açısı, φ_{cv} sabit şiddetteki sürtünme açısı, φ_m mobilize sürtünme açısı, φ_p pik sürtünme açısıdır.

Pekleşme kuralı basitleştirilmiş kinematik pekleşme kuralının ve ikincil akma yüzeyinin kullanıldığı UBC3D-PLM'de uygulanmaktadır. Plastik kayma modülü değeri ikincil yükleme için izleyen pekleşme kuralına göre her bir çevrimden sonra artmaktadır. Plastik kayma modülü sayısı bağıntısı denklem (5.11)'de verilmiştir.

$$K_G^p = K_G^p \left(4 + \frac{n_{cross}}{2}\right) hard f ac_{hard} \quad (5.11)$$

Buradaki n_{cross} , test başlangıcında oluşan yarım çevrim sayısı olup hard ise gevşek zeminler için pekleşmeyi doğrulama faktörü ve f_{achard} pekleşme kuralının düzetme faktörü olarak ifade edilir.

$$hard = \min(1; \max(0,5; 0,1(N_1)_{60})) \quad (5.12)$$

Plastik kayma modülü sıkı kumlar sıkı zeminler için SPT ($N_{1,60}$) değerlerine bağlı olarak sınırlandırılmıştır. (N_1)₆₀ çok sıkı kumlar için 60 değeri alınabilir. Bu kural direkt basit kesme deney sonuçlarından belirlenmiştir.

$$K_{G,max}^p = K_G^e \cdot (\max N_1^2_{60,max}) \cdot 0,003 + 100 \quad (5.13)$$

5.2. UBC3D-PLM Modelin SPT-N Sayısına Bağlı Kalibrasyonu

Arazi ve laboratuvar ortamında doğrudan belirlenemeyen model parametrelerinin tespitinde bünye modelinin kullanım kılavuzunda birtakım korelasyonlar önerilmektedir. Tablo 5.1’de de UBC3DPLM sayısal modelinde kullanılan malzeme parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Plaxis UBC3D-PLM parametreleri.

ϕ_{cv}	Sabit sürtünme açısı
ϕ_p	pik sürtünme açısı
c	Kohezyon
k_B^e	PA=100kpa referans seviyesindeki zemin elastik hacim modülü
k_G^e	PA=100kpa referans seviyesindeki zemin elastik kayma modülü
k_G^p	Drenajlı plastik kayma modeli
k_B^e, k_G^e, k_G^p	Sırasıyla referans elastik kayma,hacim modülü ve elastik kayma modülü katsayıları
m_e	Elastik hacim modülü üssü
n_e	Elastik kayma modülü üssü
n_p	Plastik kayma modülü üssü
R_f	Göçme oranı
f_{achard}	Pekleşme faktörü
$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş, SPT değeri
f_{acpost}	Rijitlik azalma sırasında kayma modülünün değerinin minimum şiddetinin belirlenmesi faktörü

Model parametreleri SPT darbe sayısı (N_1)₆₀ değerine dayanmaktadır. Kalibrasyon için denklem 5.14-5.19 önerilmektedir.

$$k_G^e = 21,7 \cdot A \cdot (N_1)_{60}^{0,333} \quad (5.14)$$

$$k_B^e = k_{Ge} \cdot \alpha \quad (5.15)$$

$$k_G^p = k_{Ge} \cdot (N_1)_{60}^2 \cdot 0,003 + 100 \quad (5.16)$$

$$\phi_p = \phi_{cv} + (N_1)_{60} / 10 \quad (5.17)$$

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

$$\phi_p = \phi_{pi} + \max(0,0 ; ((N_1)_{60} - 15)/5) \quad (5.18)$$

Burada,

k_G^e , k_B^e , k_G^p : elastik kayma, hacim modülü ve plastik kayma modülü sayıları,

A: 15-20 arasında değer alan sabit katsayı,

α : 0,7-1,3 arasında sabit katsayı,

$(N_1)_{60}$: Düzeltilmiş SPT darbe sayısı

ϕ_{cv} : Sabit sürtünme açısı

ϕ_{pi} : Pik sürtünme açısı

m_e , n_e için 0,5 sabit değeri, n_p için ise 0,4 değerleri kullanılması önerilir. Göçme oranı R_f ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$R_f = 1,1 \cdot (N_1)_{60}^{-0,15} \quad (5.19)$$

Göçme oranı R_f değeri ise genel olarak 0,99 değerinden küçük değerler alır. f_{achard} değerinin 0,45, dinamik hesaplamalar için 0,1 olarak kullanılması (Byrne vd., 1987) önerilmektedir. Sıvılaşma sonrası davranışın tespitine yönelik olarak f_{acpost} değerinin 0,2 ile 1 arasında seçilmesi gerekmektedir.

Bağıl birim hacim ağırlık değerinin tespit edilmesine yönelik korelasyon çalışması denklem 5.20'de sunulmaktadır.

$$Dr = [(N_1)_{60}/C_d]^{0,5} \quad (5.20)$$

C_d ise 36 ile 60 arasında değişen değerler almaktadır.

5.2.1. Boşluk suyu basıncı hesaplanmasına dair bilgiler

Etkin gerilme analizinde drenajsız davranışı belirtmek, etkin model parametreleri kullanılarak mümkündür. Zemin katmanlarının malzeme davranış tipini (drenaj türü) Drenajsız A veya Drenajsız B olarak tanımlayarak gerçekleştirilmektedir.

$$p_w = p_{steady} + p_{excess} \quad (5.21)$$

$$n = \frac{e_0}{1+e_0} \quad (5.22)$$

Burada e_0 , genel zemin özelliklerinde belirtilen başlangıç boşluk oranını temsil etmektedir. Drenajsız A veya Drenajsız B malzeme davranışı için denklem 5.23 ve 5.24 kullanılır.

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3(v_u - v')}{(1-2v_u)(1+v')} \quad (5.23)$$

$$K' = \frac{0.495 - v'}{1+v'} 300K' \geq 30K' \quad (5.24)$$

Bu nedenle, K_w/n en azından $v' \leq 0.35$ ve $\alpha_{biot} = 1$ için $30K'$ 'den büyük olmalıdır. Bu değer, saf suyun gerçek kütleli modülü K_w^0 (2.10^6 kN/m²) ile eşit veya daha düşüktür.

Drenaj tipi Drenajsız A veya Drenajsız B olarak ayarlandığında, PLAXIS otomatik olarak zemini bütün olarak (zemin iskeleti + su) kaplayan bir içsel süzülmeden kütleli modülü olan K_u 'yu varsayar ve toplam gerilme hızları ile etkili gerilme hızları ve aşırı boşluk basıncı hızları arasında ayırım yapar.

Toplam gerilme:

$$\dot{p} = K_u \dot{\epsilon}_v \quad (5.25)$$

$$K_u = \frac{2G(1+v_u)}{3(1-2v_u)} \quad G = \frac{E'}{2(1+v')} \quad (5.26)$$

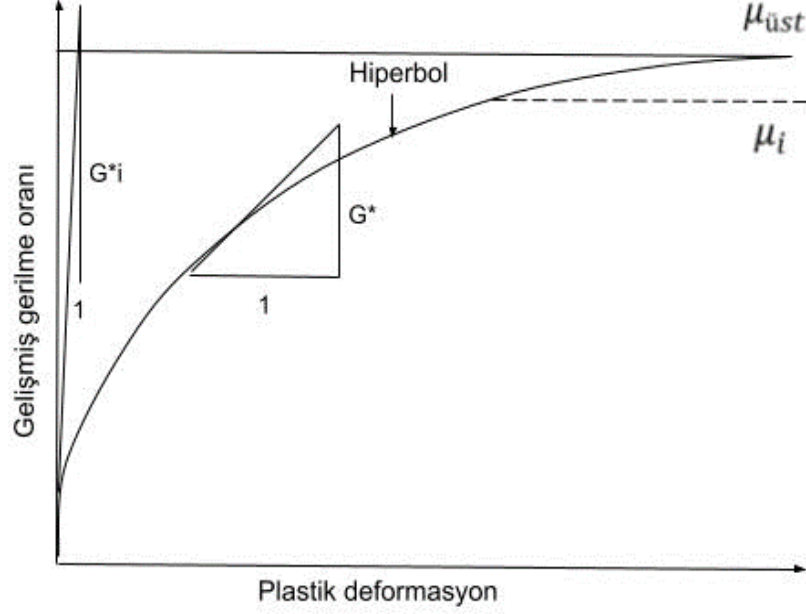
Poisson oranı katı maddeler için 0,495 kullanılır ve sıkışmaz kabul edilir. Eşdeğer poisson oranının belirlenmesi ile suyun kütle modülünü belirlenmesi sağlanır ve aşırı boşluk suyu basınçlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

5.2.2. P_{ref} değerinin değerlendirilmesi

PLAXIS sıvılaşma modelinin UBC3D-PLM 07 Haziran 2013 tarihli yayınında yer alan denklem 5.27 ve 5.28 ile ilgili pekleşme kuralına dair grafik Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

$$K = K_B^e P_A \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{me} \quad (5.27)$$

$$G = K_G^e P_A \left(\frac{p}{P_{ref}} \right)^{ne} \quad (5.28)$$



Şekil 5.3. UBCSAND'in orijinal sıkıştırma kuralı.

P_{ref} model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ortalama efektif gerilmeyi temsil eden bir model sabiti anlamına gelmektedir. UBC3D-PLM bünye modelinde P_{ref} değeri bir model sabitidir. Hardening Soil-small Strain model de P_{ref} değeri σ_3 olarak kullanılmakta, yani yatay toprak basıncına eşittir. Ancak UBC3D-PLM [22] tarafından modelin pekleşme kuralını tanımlarken ifade ettiği deplasmana bağlı grafikte kayma modüllerinin hesap yöntemleri ile değerlendirildiğinde, P_{ref} değerlerinin model parametrelerinin belirlenmesi aşamasında numune çevresinde uygulanan yaklaşık ortalama efektif gerilme değerini ifade eden ve her bir tabaka için tanımlanması gereken bir sabit değeri ifade etmektedir.

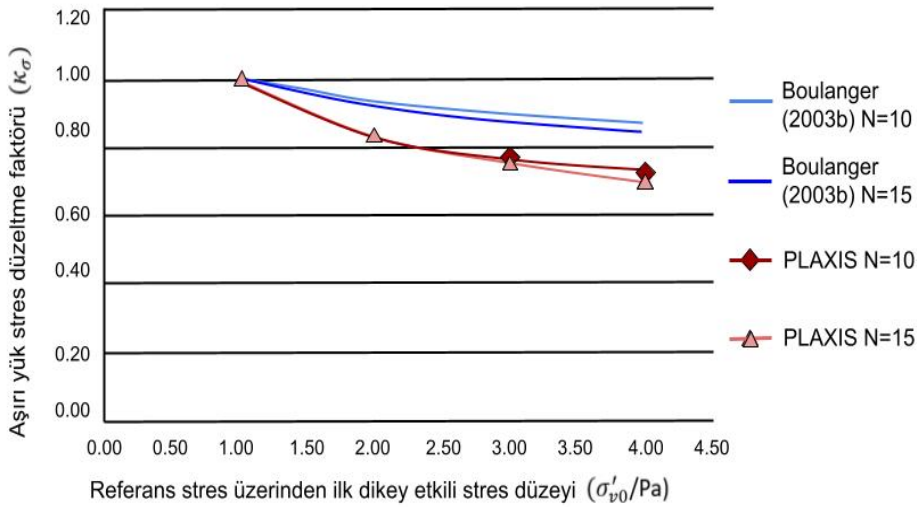
İlk olarak Seed (1983) tarafından tanıtılan bir düzeltme faktörü olan K_σ için uygun değerler hakkında farklı öneriler bulunmaktadır. Bu öneriler çoğunlukla laboratuvar testlerine dayanmaktadır, farklı araştırmacıların önerdiği değerler arasında büyük bir dağılım bulunmaktadır. Bu farklar elde edilen örneklerin ve farklı tekniklerle sahadan alınan örneklerin çevrimsel mukavemet oranındaki farklılıklarla açıklanabilir. (Makra, 2013)

Bu durumda kullanılan K_σ ilişkisi Boulanger (2003b) tarafından denklem 5.29 önerilmiştir:

$$K_\sigma = C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma_{vcl}}{p_a}\right) \leq 1.1 \quad (5.29)$$

Tüm önceki ilişkiler için SPT penetrasyon direnci kullanıldığından, C_σ 'nin değeri aynı zamanda aşağıdaki denklem 5.30 kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60}}} \leq 0.3 \quad (5.30)$$



Şekil 5.4. UBC3D-PLM tarafından farklı stres seviyelerinde fazla yük gerilme düzeltme faktörü (Boulanger, 2003b)

UBC3D-PLM'deki aşırı gerilme etkisini belirlemek için farklı gerilme seviyelerinde drenajsız koşullarda DSS testleri gerçekleştirilmiştir.(Boulanger, 2003b) Tüm testlerde $K_0=0,5$ varsayımı korunmuştur. Testler iki farklı SPT penetrasyon değerinde gerçekleştirilmiştir, $(N_1)_{60}=10$ ($D_r \approx 46\%$) ve $(N_1)_{60}=15$ ($D_r \approx 57\%$). Şekil 5.4'de farklı stres seviyelerindeki K_σ değerleri, Boulanger (2003b) tarafından verilen teorik değerlerle karşılaştırılmıştır.

K_0 , sükunetteki yanal toprak basıncı katsayısının etkisi önemlidir ve genellikle Ishihara (1985) tarafından verilen denklem 5.31 ile ifade edilir.

$$CRR_{K_0 \neq 1} = \frac{1+2K_0}{3} CRR_{K_0=1} \quad (5.31)$$

Denklem 5.31, tüm birim hacim ağırlık değerlerinde K_0 azaldıkça çevrimsel direnç oranının azaldığını göstermektedir. Aynı bağıl birim hacim ağırlık değerinde efektif

gerilme değeri artarsa zeminin sıvılaşması zorlaşmaktadır. Ancak gevşek kumlarda ($(N_1)_{60} < 10$) için $K_0=1.0$ olduğundaki durumdaki CRR ile, sıkı kumlarda ise $K_0=0.5$ 'den çok daha küçük olduğundan UBC3D-PLM'nin bu kalibrasyon eğilimi açısından takip edilmemektedir (Makra, 2013).

Bu çalışmada P_{ref} değerinin mevcut gerilme değerlerinde doğrusal belirlenmediği ifade edilmesine rağmen farklı bir bakış açısı geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen model için P_{ref} değerleri her 2 m'lik tabaka için ortalama efektif gerilme değerleri göz önüne alınarak Boulanger (2003b) tarafından önerilen formül kapsamında kalacak şekilde tespit edilerek modellenmiş, gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

5.3. Nümerik Çalışmalarda Kullanılan Diğer Plaxis Malzeme Modelleri

Plaxis kullanım kılavuzunda öncelikle Hardening Soil Model veya Hardening Small Strain Model ile başlangıç durumu belirlemeye yönelik statik analiz yapılması, dinamik analiz öncesi ise UBC3D-PLM bünye modeli atanarak gerekli sınır koşulları ve dinamik yükleme altında analizlerin yapılması önerilmektedir.

5.3.1. Lineer elastik model

Bu model, Hooke kuralını kullanan birim deformasyon artışının, gerilme artışıyla ilgili olan basit bir modelidir. Kaya gibi yüksek rijitliğe sahip malzemelerin davranışını modellemede kullanılır. Bu modelin en basit halinde iki basitleştirme yapılmıştır. Bunlar sabit bir elastisite modülünün kullanılması ve zeminin göçtükten sonra limitsiz genişleme eğiliminde olmasıdır. Gerçek davranışta, zemin göçtükten sonra, zeminin boşluk oranı kritik bir değere ulaşmakta ve genişleme sona ermektedir.

5.3.2. Hardening Soil (HS) model

Farklı geoteknik problemlerde uygulanabilen bir bünye modelidir. Döngüsel bir yükleme durumunda zemin rijitliği, gerilmeye bağlı doğrusal olmayan davranışla karakterize edilir. Zemin davranışının tamamen elastik kabul edilebileceği maksimum gerilme çok küçüktür. Dinamik davranışlar için bu modelden üretilen HS small modeli ve The Generalized Hardening Soil modeli bulunmaktadır.

Hardening Soil modelinde, m parametresinin değerlendirilmesi önemlidir. Zemin tabakasının davranışını büyük ölçüde etkileyen bu model; kazı, dolgu ve inşaat aşamasının modellenmesinde faydalıdır.

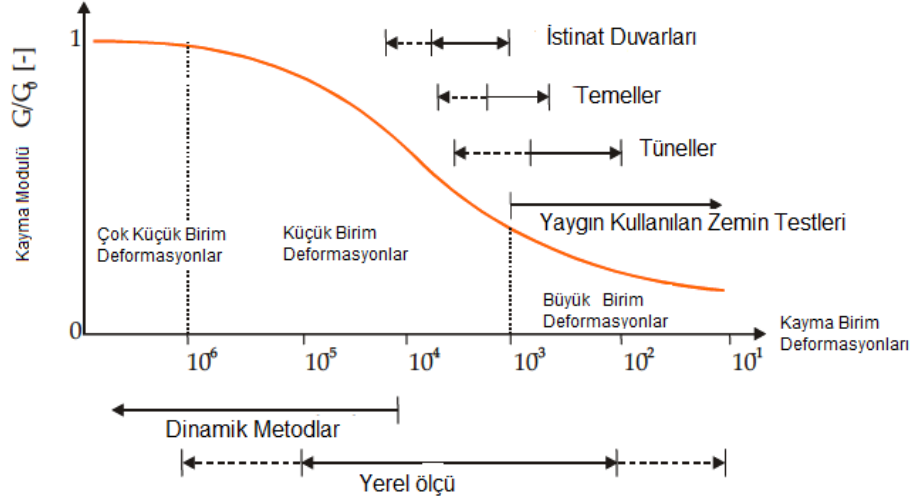
Hardening Soil Modelin çalışma prensibi ile; yumuşak ve sert zeminlerin davranışı modellenebilir. Kayma ve sıkışma pekleşmesinden kaynaklı geri gelmeyen şekil değiştirmeler modellenebilir.

Tablo 5.2. Hardening soil model parametreleri.

Mohr Coulomb Göçme Kriterine Göre Göçme Parametreleri	
c (kPa)	Efektif kohezyon
φ ($^{\circ}$)	Efektif sürtünme açısı
Ψ ($^{\circ}$)	Dilatasyon açısı
Rijitlik Parametreleri	
E_{50}^{ref} (kPa)	Deviator gerilme etkisinde oluşan şekil değiştirme için referans deformasyon modülü
E_{oed}^{ref} (kPa)	Referans ödometre modülü
E_{uref} (kPa)	Referans elastik boşaltma / tekrar yükleme modülü
M	Gerilme bağımlı rijitlik parametresi
Geliştirilmiş Diğer Parametreler	
ν_{ur}	Boşaltma / tekrar yükleme poisson oranı (0,2)
p_{ref} (kPa)	Referans gerilme
K_0^{nc}	Normal konsolide zeminler için sükunetteki toprak basıncı katsayısı ($K_0^{nc}=1-\sin\varphi$)
R_f	Göçme Oranı ($R_f=0,9$)

5.3.3. Hardening Soil-small Strain model

Dinamik analizde sıvılaşmayan tabakalar için kullanılan Plaxis modeli HS small strain modeldir. Bu model sıvılaşmanın beklenilmediği kil, sıkıştırılmış dolgu gibi zeminler için kullanılabilir. Hardening soil modelle kıyaslandığında küçük birim deformasyon artışıyla onun doğrusal olmayan davranışını hesaba katar. Şekil 5.3'te Hardening soil-small modelin dikkate aldığı kayma modülü-deformasyon değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Çeşitli yapılarda dikkate alınan kayma deformasyonları için kayma modülü değerleri.

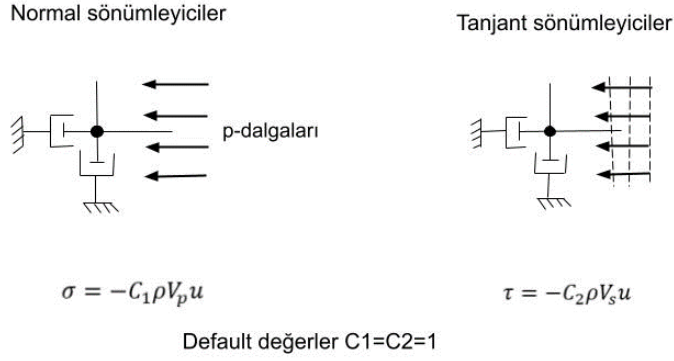
Hardening soil modelden farkı ise iki adet ek rijitlik parametresi eklenmesidir. Bunlar, G_0 =Sınır ve çok küçük deformasyonlardaki kayma modülü ve,

$\gamma_{0.7}=G_0$ 'ın yaklaşık %70 azaltılması ile oluşan sekant kayma modülü (G_s) olduğu değerdeki kayma birim şekil değiştirme değeridir.

5.4. Dinamik Sınır Şartları

Dinamik sınırlar, araziden uzak davranışı modellemek için analizlerdeki etki alanını arazideki duruma benzetmek için kullanılır. Viskoz sınırlar ve serbest alan (free field) sınırlar olarak adlandırılır. Çevrimsel sınırlar ise bağlanmış (*tied*) serbestlik derecesi (sadece yatay sınırlar için geçerli) sınırlardır. Plaxis 2D 'de tanımlanmış sınırlarda standart emici (*absorbent*) sınırlar, modelin sol, sağ ve alt kenarlarında emici sınırlar olarak tanımlanabilmektedir. Sınır koşullarının kullanımının sismik saha tepki analizleri için bazı sınırlamaları vardır. Bunun için özel deprem sınır koşulları geliştirilmiştir.

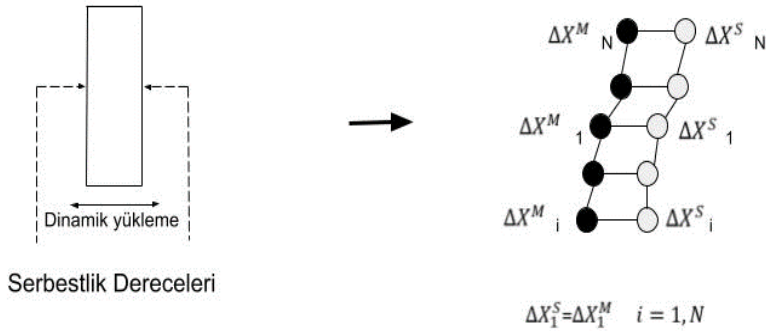
Viscos sınır koşullarının şematik gösterimi Şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.6. Viskoz sınır koşullarının şematik gösterimi.

Viskoz sınırların dinamik kaynağın model içerisinde olması halinde kullanılması, deprem gibi kaynağı model dışarısında olan dinamik modeller için sınır koşulları tabanda uyumlu alan, kenarlarda serbest alan kullanılması önerilmektedir.

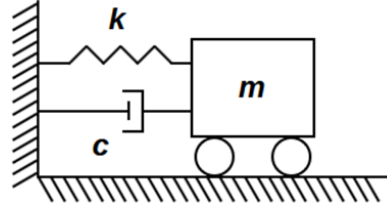
Bağlı serbestlik dereceleri olan sınırlardaki yaklaşımına dair şema Şekil 5.7’de sunulmuş olup, modelin sağ ve sol sınırlarının depremde aynı yer değiştirmeye sahip olduğu göz önüne alınır. Bu amaç için, sonlu eleman ağının yan kenarlarında düğüm noktalarının aynı yer değiştirmeleri yapması sağlanır. Sonlu eleman ağın yan kenarlarındaki yatay düğüm yer değiştirmelerinin çevrimsel bir simetri varmış gibi birlikte hareket etmeleri sağlanır. Bu sınır koşulları bir boyutlu dalga yayılımı problemlerinde arazideki durumu daha iyi modellemektedir.



Şekil 5.7. Bağlı serbestlik dereceli sınır koşullarının şematik gösterimi.

5.5. PSA Spektrumu

Deprem sırasında zemin titreşimi, üstündeki yapının zorlamalı titreşimlere maruz kalmasına neden olur. Yapı, basit bir model olan tek serbestlik derecesine sahip bir sistem olarak idealize edilebilir. Bu modelde, bir noktada yoğunlaştırılmış bir kütle m , bir rijitlik k ve bir sönüm oranı ξ ile karakterize edilir. Yapısal elemanlara bağlı olarak meydana gelen enerji kaybı, hızdan bağımlı viskoz etkiler aracılığıyla simüle edilir.



Şekil 5.8. Tek Özgürlük Derecesi Sistemi.

Göreceli yer değiştirme tepki spektrumunda SD:

$$S_D = |u|_{max} \quad (5.32)$$

PSV (*Pseudo Spectral Velocity*) ve PSA (*Pseudo Spectral Acceleration*), göreceli yer değiştirme tepki spektrumu ile aşağıdaki denklem 5.33 ve 5.34 aracılığıyla ilişkilidir:

$$PSV = \omega_0 \cdot S_D \quad (5.33)$$

$$PSA = \omega_0^2 \cdot S_D \quad (5.34)$$

Burada ω_0 , yapının doğal açısal frekansını temsil eder, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$. PSV ve PSA, sahte nicelikler olarak belirtilir çünkü sönümlü bir sistemde, maksimum göreceli hız ($|\dot{u}|_{max}$) ile maksimum mutlak ivme ($|\ddot{u} + \ddot{u}_g|_{max}$) tam olarak örtüşmez.

Maksimum tepki, tepki spektrumunun y ekseninde çizilirken, doğal periyot T ise x ekseninde temsil edilir. Bu eksen, yapı rijitliği k ve kütle m hakkında bilgi içerir ve aşağıdaki denklem 5.35'de gösterildiği gibi:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.35)$$

k değeri değiştirilerek, belirli bir sönüm oranı ξ için o spesifik deprem sinyali altında tüm olası tek serbestlik dereceli sistemlerin tepkisi elde edilebilir. Tipik olarak, betonarme yapılar için, sönüm büyük ölçüde bölme duvarları gibi yapısal olmayan unsurlardan kaynaklandığından, ξ genellikle %5 olarak ayarlanır. Daha yüksek değerler, örneğin yapı tabanı amortisörlerle izole edildiğinde, tepki spektrumunda y değerlerinin düşük olduğu durumlar gibi diğer özel durumlar da kullanılabilir.

PSA dikkate alındığında, üstündeki yapının doğal titreşim periyoduyla eşleşen Y ekseninde okunan değer, yapının tabanında maksimum kesme gerilmesini hesaplamak için kullanılır.

$$F_{max} = m \cdot PSA = \frac{PSA}{g} \omega \quad (5.36)$$

burada g yer çekimi ivmesini ve w ise yapının ağırlığını ifade eder.

Tepki spektrumunu oluşturmak için, eğri yöneticisinde PSA sekmesinde yatay ivme (a_x), dikey ivme (a_y) veya ivmenin mutlak değeri (vektörel uzunluk) arasından bir seçim yapılmalıdır. Ardından, yapısal sönüm oranı ξ ile yapının maksimum doğal periyodu T belirtilmelidir.



6. NÜMERİK MODELLEME

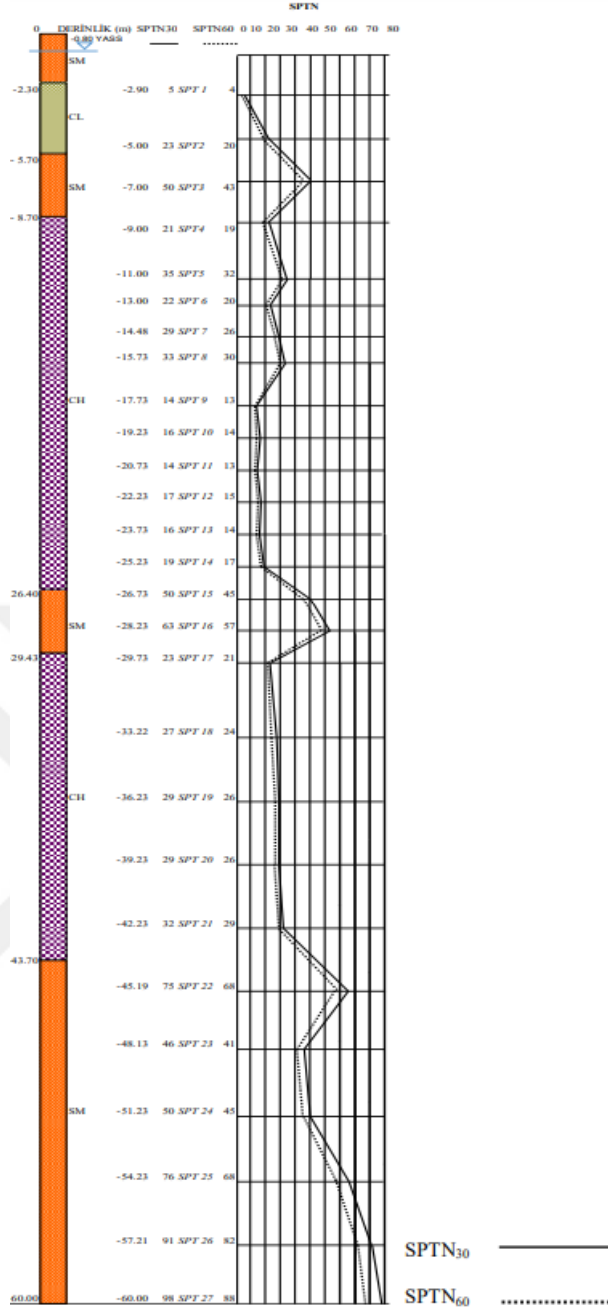
Çalışma kapsamında öncelikle “1999 Kocaeli Depreminde Adapazarı’nda Yapı Yüğü Altında Zemin Davranışı” adlı doktora tezinde (Nomaler, 2018) yer alan ve içerisinde sıvılaşılan ve sıvılaşımayan tabakaların beraber yer aldığı SK-2 numaralı sondaj logu seçilerek, bahse konu logda belirtilen SM3 (Sıvılaşıma potansiyeli bulunmayan) zemin tabakası üstte olacak şekilde SM4 (Sıvılaşıma potansiyeli bulunan) ve altında CH4 kil tabakasından oluşan zemin tabakası oluşturulmuştur.

Bahse konu doktora tezi kapsamında yer alan 75 m derinliğe sahip SK-2 kolonunun bir boyutlu analizi literatürde yer alan Marmara Deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SM3 sıvılaşımayan tabakanın sıvılaşımadığı, SM4 sıvılaşılan tabakanın sıvılaştığı görülmüştür. Bahse konu SK-2 sondaj logunun bir boyutlu (1-D) analizi öncesi -25 m kotunda nokta tanımlanarak, söz konusu noktaya dair ivme kaydı elde edilmiştir. 75 m derinliğe sahip sondaj logunun 25 m’inde yer alan ivme kaydı kullanılarak bahse konu logun ilk 25 m’si modellenerek analiz gerçekleştirildiğinde sonuçların aynı olduğu görülmüştür.

Model üst tabaka etkisinin araştırılması amacıyla sıvılaşımayan tabaka altında, sıvılaşılabilen tabaka ve onun altında kil tabakasından oluşan zemin kesiti üzerine genişliği 10 m, yüksekliği 15 m olan bir yapı modellenmiştir. Sonrasında model genişliğinin sonuçlar üzerinde etkileri irdelenmeye çalışılmış, farklı genişliklerle (600 m, 800 m ve 1000 m) analizler gerçekleştirilmiş 1000 m ve üzerinde sınır koşullarının model üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. Model genişliği 1000 m olarak belirlenmiştir. Analizlerde statik durumlar için HS-Small, dinamik durumlar için UBC3D-PLM seçilmiştir.

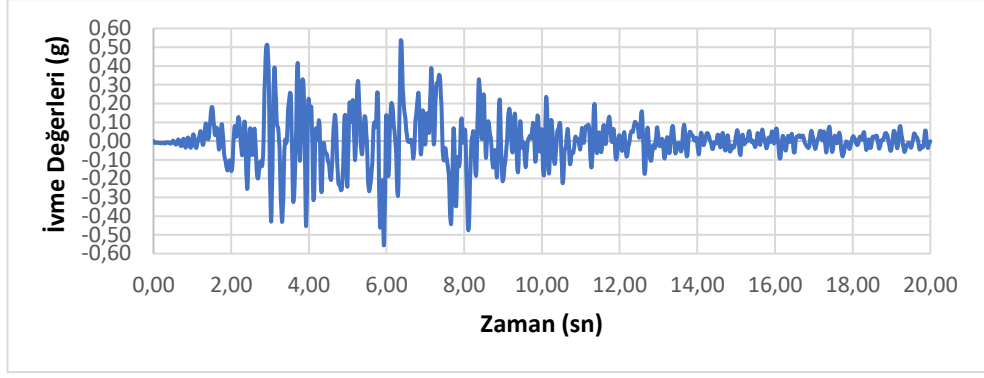
6.1. Model Geometrisi

Nomaler (2018)’de yer alan SK2 sondaj logu Önalp ve Özocak, 2000’de incelenen , 1999 depremi öncesinde yapılan sondaj logu ile birleştirilerek derinliği 60 m’ye uzatılan kesitin modellenmesi 1D Boyutlu olarak yapılmış, Nomaler (2018)’de verilen HS-Small parametreleri malzeme özellikleri olarak tanımlanmıştır.



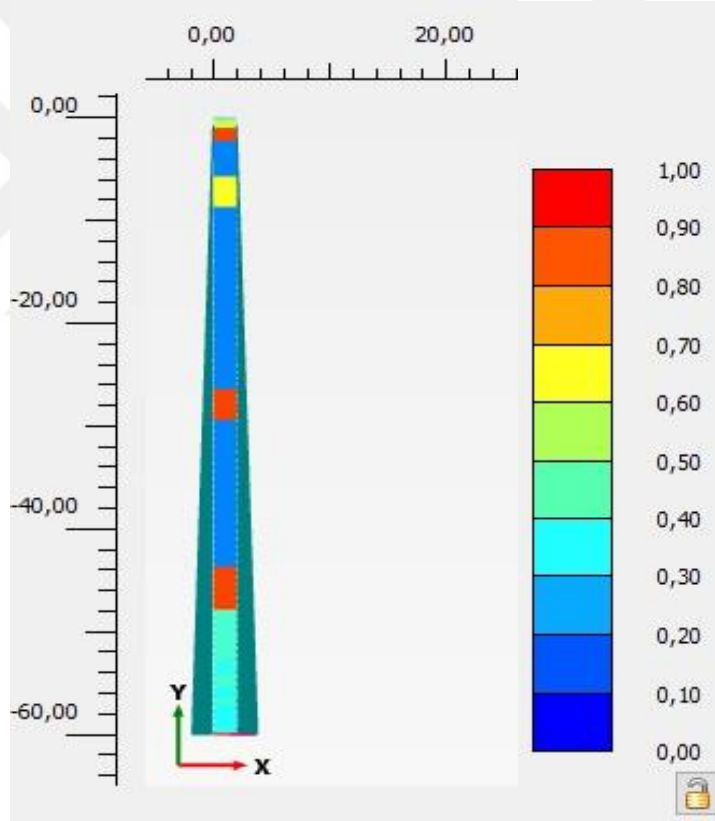
Şekil 6.1. Adapazarı SK-2 Nolu sondaj logu.

Dinamik analiz aşamasında ise UBC3D-PLM bünye modeli atanarak SPT-N darbe sayılarına bağlı olarak model parametreleri seçilmiş, literatürde yer alan 1999 Marmara depremi özellikleri kullanılmıştır. Şekil 6.2’de sunulmuştur.



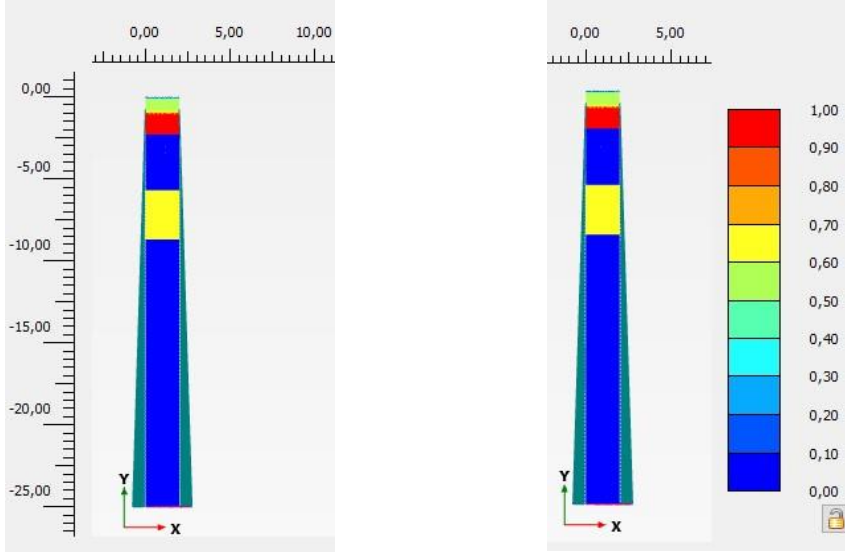
Şekil 6.2. Marmara deprem kaydı (ref?).

Gerçekleştirilen analiz 1D boyutlu analiz sonucunda, artık boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye oranını gösteren şema şekil 6.3’de gösterilmiş olup, SPT-N değerinin düşük olduğu durumda ru değerinin 0,7 değerinde yukarıda olduğu görülmektedir.



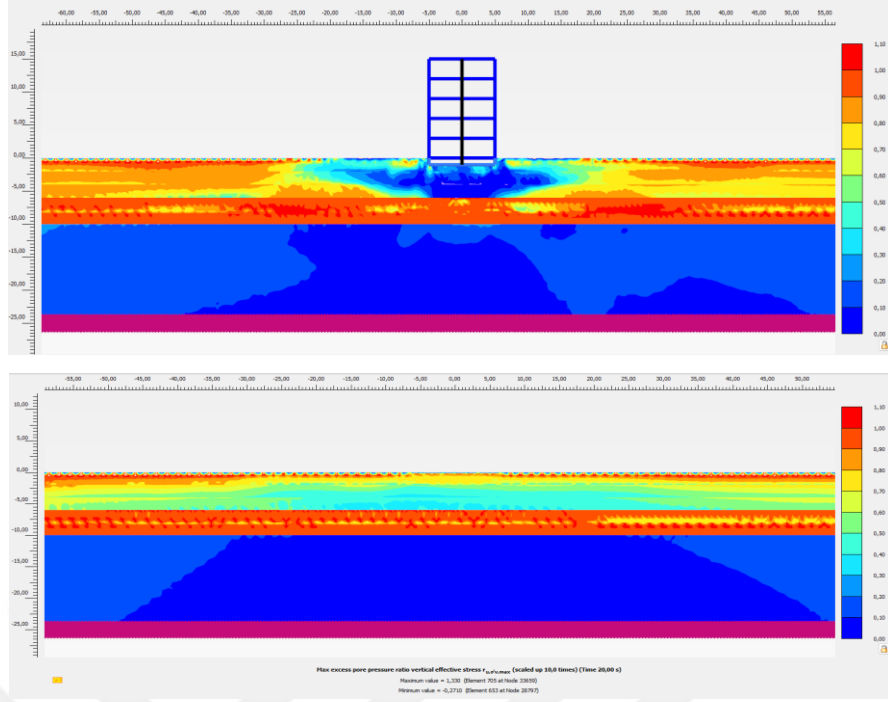
Şekil 6.3. Adapazarı SK-2 Nolu sondaj loguna ait analiz sonucunda ru değerleri.

SK-2 sondaj logunda öncelikle 60 m’de analiz yapılarak, 25 m’deki ivme kaydı elde edilmiş müteakiben ilk 25 m lik bölümün analizleri gerçekleştirilmesi sonrasında sonuçların aynı olduğu görülmüştür. Sonuçlar Şekil 6.4’de sunulmuş olup, sol tarafta 25 m’lik 1D boyutlu analiz sonucu gösterilmekte, sağ tarafta 60 m’deki analiz sonuçları gösterilmektedir.

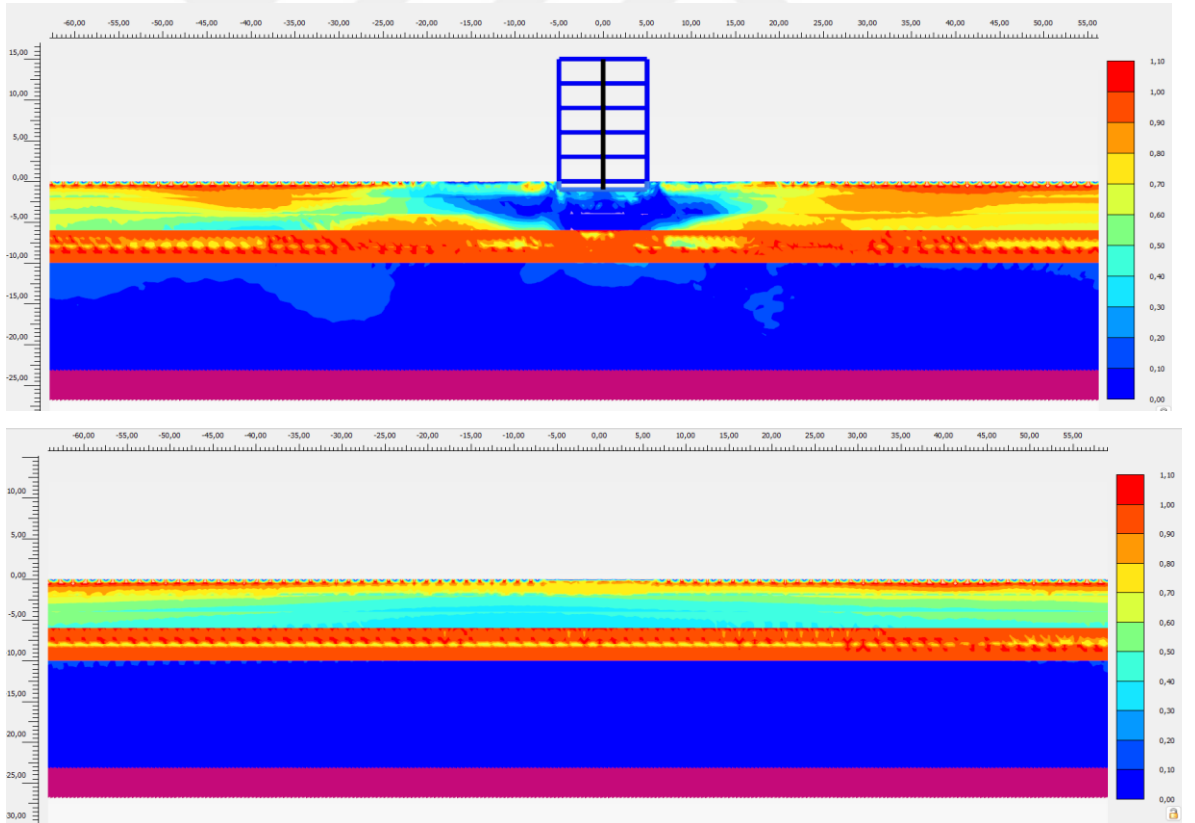


Şekil 6.4. 25 m'lik bölümün analiz sonucunun karşılaştırılması ve r_u değerlerinin gösterimi.

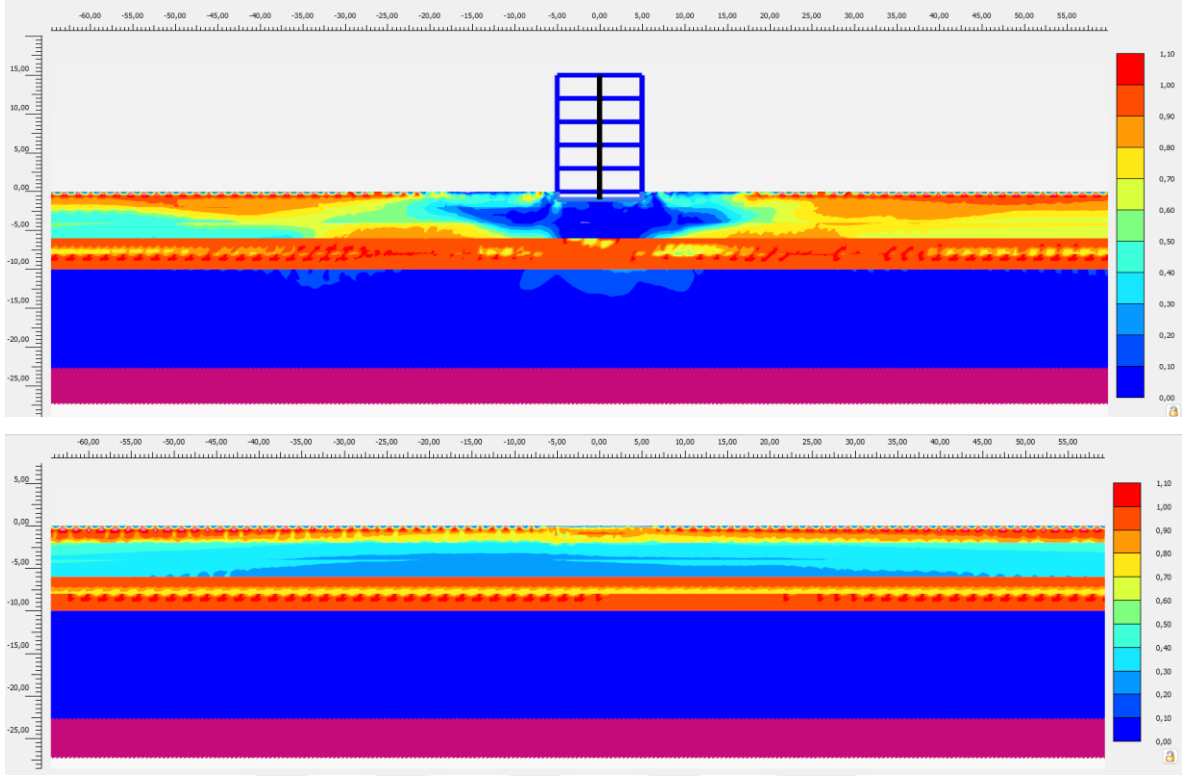
SK-2 sondaj logunda yer alan SM (sıvılaşmayan zemin tabakası), SM4 (sıvılaşan zemin tabakası) ve CH4 (kil tabakası) ile oluşturulan zemin profili üzerinden tabaka etkisi araştırılmaya çalışılmıştır. Model genişliği ile ilgili olarak; 10 m derinliğinde SM3 sıvılaşmayan tabaka ve 15 m derinliğinde CH4 kil tabakasından oluşturulan modelin sınır koşullarından etkilenmemesi için 600 m, 800 m ve 1000 m seçilerek deneme analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 6-5 - 6,7'de sunulmuştur. Model genişliği artıkcça sınır koşullarının model ortasında oluşturduğu etkinin azaldığı görülmektedir. Dinamik analizlerde model genişliğinin fazla olması kenarlardan yansıyan deprem etkisinin toplanmasını önlemektedir.



Şekil 6.5. Model genişliğinin 600 m olduğu durum için r_u değerinin şematik gösterimi.



Şekil 6.6. Model genişliğinin 800 m olduğu durum için r_u değerinin şematik gösterimi.



Şekil 6.7. Model genişliğinin 1000 m olduğu durum için r_u değerinin şematik gösterimi.

r_u değeri artık boşluk suyu basıncının düşey efektif gerilmeye oranını ifade etmektedir. Literatürde r_u değerinin 0,7'den büyük olması sıvılaşmanın olduğu şeklinde kabul edilmektedir. (Petalas A, 2012) Şekillerde turuncu ve kırmızı renk ile gösterilen bölümlerde sıvılaşmanın meydana geldiği görülmektedir. 600 m genişliğe sahip modelde sıvılaşmayan SM3 tabakasının bile sınır koşullarından etkilenerek model ortasında sıvılaştığı, 800 m genişliğe sahip model de ise binasız durumda sıvılaşmayan tabakada orta bölüme doğru sıvılaşmaların görüldüğü ve bu hususun model üzerinde yer alacak binayı etkileyebileceği değerlendirildiğinden 1000 m olacak şekilde modelleme tercih edilmiştir.

Model içerisinde yer alan bina, bodrum kat zemin altında 1 m kalacak şekilde, kat yükseklikleri 3 m olmak üzere 5 katlı olarak seçilmiş, model parametreleri ve tasarımında Plaxis Tutorial-0 numaralı örnek kapsamındaki yer alan veriler kullanılmıştır. Model yüksekliği, 15 m kil tabakası üzerinde 10 m sıvılaşabilen-sıvılaşmayan tabaka üzerine 15 m yüksekliğinde bir bina olmak üzere toplam 40 m'dir. Model genişliği ise 1000 m'dir.

6.2. Rayleigh Sönüm Parametrelerinin Belirlenmesi

Plaxis 2D yazılımında malzemelerin sönüm oranı sayesinde kalıcı-plastik şekil değiştirmelerin modellenmesine olanak sağlayan Rayleigh sönüm parametrelerinin yer aldığı görülmektedir. (Petalas A, 2012)Plaxis (2015) tarafındanUBCSAND modelinin histerik sönüm hesaplama özelliğinden dolayı zemin sönüm oranlarının %0,5-%2 arasında seçilmesinin önerilmektedir. Çalışmalarda sönüm oranları % 0,5 olarak alınmıştır. Hedef -1 değeri oluşturulan model bazında zemin hakim periyodu aşağıdaki denklem 6.2 kullanılarak tespit edilmiştir.

$$V_{S,ort} = \frac{h_i}{\sum V_i} \quad (6.1)$$

$$f_1 = \frac{V_{S,ort}}{4H} \quad (6.2)$$

Hedef-2 değerinin belirlenmesi için ilgili deprem kaydının tanımlanma menüsünden “Fourier Spectra” sekmesinden deprem kaydının etkili olduğu frekans değeri 13 olarak okunmuş olup bu değeri kapsayan frekans modunu kullanmak için depremin etkili frekansının zemin hakim periyoduna bölünmesi ile elde edilen sayıyı en yakın tek sayıya yuvarlamasıyla elde edilen sayının zemin hakim periyodu ile çarpılması sonucunda elde edilen değerlerin kullanılması sağlanmıştır (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. Ortalama zemin hakim periyoduna göre hedef değerler.

Ortalama Zemin Hakim Periyoduna Göre Hedef Değerler						
F1	2,52	2,226148	1,993671	1,805158	1,649215	1,518072
13/F1	5,15873	5,839683	6,520635	7,201587	7,88254	8,563492
Tek Sayıya Yuvarlama	7	7	7	9	9	9
F2=Tek Sayı *						
F1	17,64	15,58304	13,9557	16,24642	14,84293	13,66265

Gömülü taşıyıcı sistemlerde, zemin ile beraber hareket edeceğinden sönüm oranı olarak sistemin sönüm oranı ve frekansı kullanılmış, zemin dışında yer alan taşıyıcı sistemde ise sönüm oranı %5, hedef 1 değeri olarak taşıyıcı sistemin periyodu olan 1 değeri baz alınarak hedef 2 nin tespit edilmesi sağlanmıştır. (Özener,2019)

$$C = M\alpha + \beta K \quad (6.3)$$

Burada C= sönüm matrisi, M=kütle matrisi, K=rijitlik matrisi olarak ifade edilmektedir. $\omega = 2\pi F$ olmak üzere; $\alpha = 2\xi \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}$ $\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_1 + \omega_2}$ şeklinde söz konusu değerler hesap edilmektedir.

Rayleigh sönüm katsayılarının belirlenmesi, zemin yapısı içindeki sönümün, sistem tepkisinin hem büyüklüğünü hem de şeklini belirleyici bir etkisi olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Ancak, bu alandaki araştırmalara rağmen, sönüm parametrelerinin belirlenmesi için evrensel olarak kabul edilmiş bir prosedür geliştirme çabaları sınırlı başarıyla sonuçlanmıştır. Sonlu eleman analizi gibi yöntemlerde, Rayleigh sönümü, sistemdeki sönümün etkilerini değerlendiren uygun parametrelerden biri olarak kullanılır. Rayleigh sönüm parametreleri, sönümün hem kütle matrisi hem de sistem rijitlik matrisi içerisinde etkili olduğu prensibini temel alır. Rayleigh alfa (α) parametresi, sistem sönümünde kütle etkilerini ifade eder. Bu değer, düşük frekans bölgelerindeki sönümü belirler. Yani, alfa değeri arttıkça düşük frekanslardaki sönüm artar.

Rayleigh beta ise (β), sistem sönümünde rijitlik etkilerini ifade eder. Bu parametrenin yüksek değerleri, yüksek frekans bölgelerinde daha fazla sönüm olacağını gösterir. Yani, beta değeri arttıkça yüksek frekanslardaki sönüm artar.

6.2.1. HS-Small zemin modeli parametrelerinin belirlenmesi

Literatürde, bazı sıvılaşma analizleri yapılırken sıvılaşmayan zeminlerin dinamik analiz aşamasında da HS-Small Zemin Modelinin tanımlandığı görülmüştür. Ancak bu çalışma kapsamında tüm katmanlar için dinamik analiz aşamasında UBC3D-PLM bünye modeli tanımlanmıştır. Dinamik analiz aşamasında sıvılaşan tabaka üstünde yer alan sıvılaşmayan tabaka etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda model üzerinde yer alan yapının periyodunun bulunması içinde kullanılan HS-Small zemin modeline göre tabakaların girdi parametreleri Tablo 6.2'de verildiği gibidir.

Tablo 6.2. Analizlerde kullanılan Hs-small zemin bünye modeli parametreleri.

Model Parametreleri	Birim	SM4	SM3	CH4
γ_n	kN/m ³	18,00	19,00	17,07
ν_{ur}	-	0,20	0,20	0,20
$(N_1)_{60}$	-	7	52	12
E_{50}^{ref}	kPa	25200	60000	6501
E_{oed}^{ref}	kPa	25200	60000	5201
E_{ur}^{ref}	kPa	75600	180000	19504
c	kPa	1	1	110
ϕ	Derece	29,5	35	0
$\gamma_{0,7}$	kPa	0,000158	0,0001	0,000301
G_0^{ref}	-	88560	128000	81184

6.2.2. UBC3D-PLM zemin modeli parametrelerinin belirlenmesi

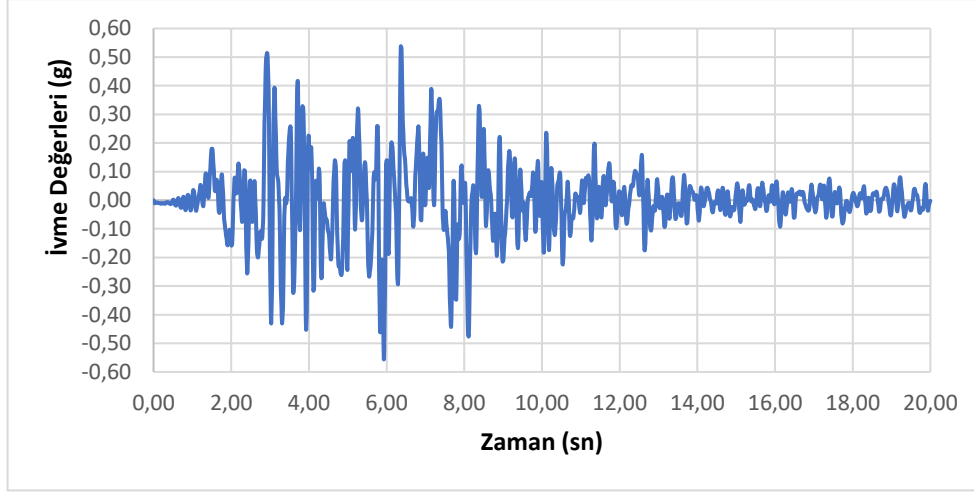
İlgili bünye modeline ait kullanım kılavuzunda SPT-N değerine bağlı yer alan korelasyon üzerinden parametreler tespit edilmiştir. Bu kapsamda UBC3D-PLM zemin modelinde tabakalara dair girdi parametreleri Tablo 6.3.de sunulmuştur.

Tablo 6.3. Analizlerde kullanılan UBC3D-PLM zemin bünye model parametreleri.

Model Parametreleri	Birim	SM4	SM3	CH4
γ_n	kN/m ³	18,00	19,00	17,07
K_B^e	kPa	580	1132	1290
K_G^e	kPa	829	1617	992
K_G^p	kPa	221	13220	528
m_e	-	0,50	0,50	0,50
n_e	-	0,50	0,50	0,50
n_p	-	0,40	0,40	0,40
φ_{cv}^o	Derece	29,50	35,00	1,00
φ_p^o	Derece	30,20	48,00	2,20
c	kPa	1,00	1,00	110,00
$(N_1)_{60}$	-	7,00	52,00	12,00
f_{dens}	-	1,00	1,00	1,00
f_{Epost}	-	0,20	0,20	0,20

6.3. Yükleme ve Sınır Şartları

Literatürde 1999Marmara depremine dair bulunan veriler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem kaydı 2000 adımdan oluşan 20 sn süren bir deprem kaydıdır. Deprem kaydı gösterimi Şekil 6.8’de sunulmuştur.



Şekil 6.8. 1999 Marmara depremine ait ivme girdisi.

Düşey sınırlarda sınır koşulu olarak “*free-field*”, alt sınır koşulu olarak “*compliant base*” olarak tanımlanmıştır.

6.4. Üst Tabaka Etkisinin Araştırılmasına Yönelik Olarak Belirlenen Zemin Profilleri

Üst tabaka etkisinin araştırılması kapsamında ilk 10 m içerisinde yer alan sıvılaşmayan – sıvılaşabilen tabaka üzerinde 2 m’lik değişimler yapılarak sonuçların irdelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Sıvılaşmayan tabaka (SM3) ve sıvılaşabilen tabaka (SM4) tabakalarının 10 m derinlik içindeki kalınlıkları Tablo 6.4’de verilmiş olup bu tabakaların altında 15 m kil tabakası olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiş, üst tabaka etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

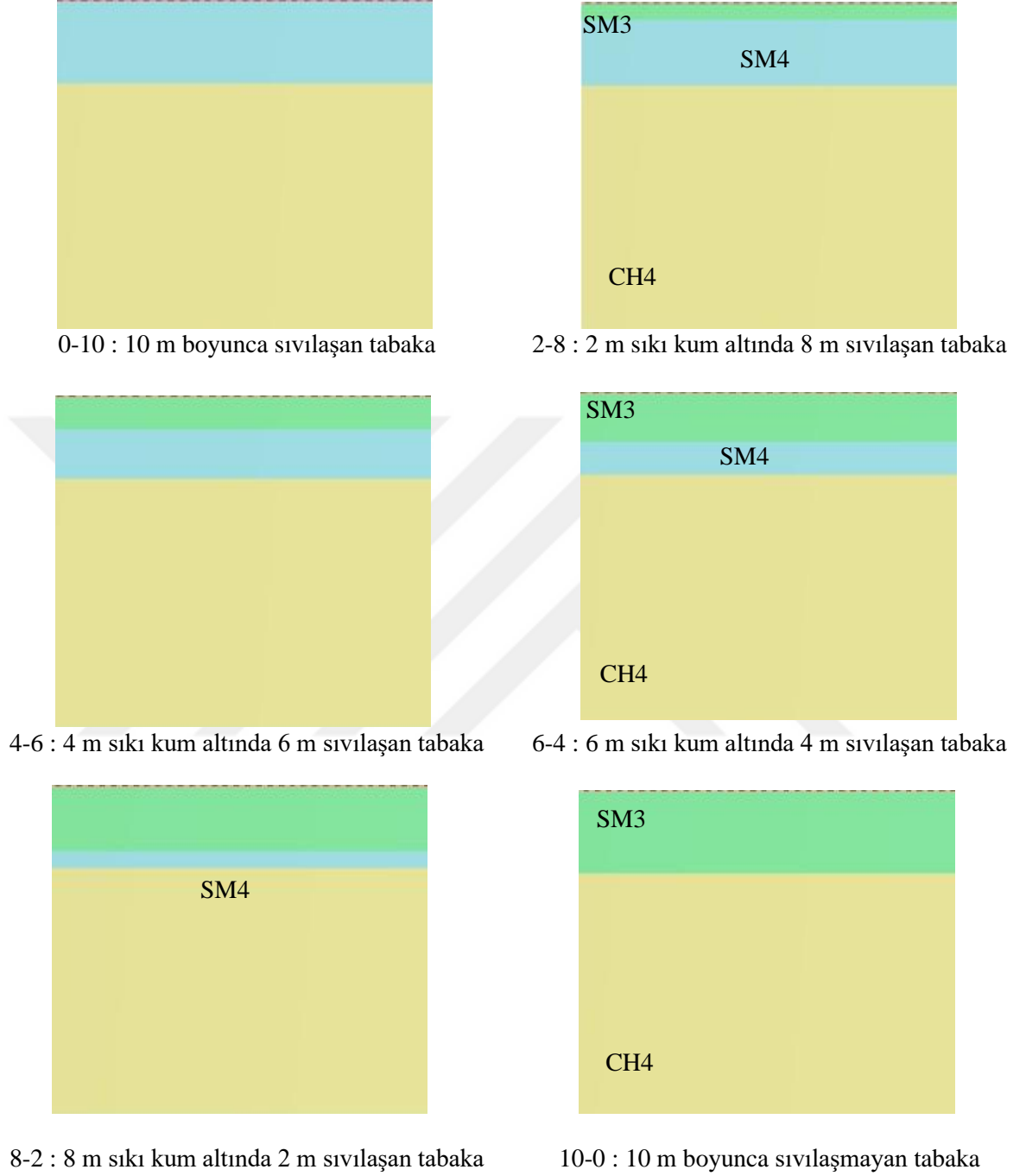
Tablo 6.4. Analizlerde kullanılan zemin profil bilgileri.

Analiz No.	Sıvılaşmayan tabaka kalınlığı	Sıvılaşan tabaka kalınlığı	Toplam Kalınlık
1	0 m	10 m	10 m
2	2 m	8 m	10 m
3	4 m	6 m	10 m
4	6 m	4 m	10 m
5	8 m	2 m	10 m
6	10 m	0 m	10 m

Analizler Plaxis 2D yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

6.4.1. Analizlere dair modellerin zemin yapısı

Model zemin yapıları şekil 6.9’da sunulmuştur.



Şekil 6.9. Analizi gerçekleştirilen zemin profilleri.

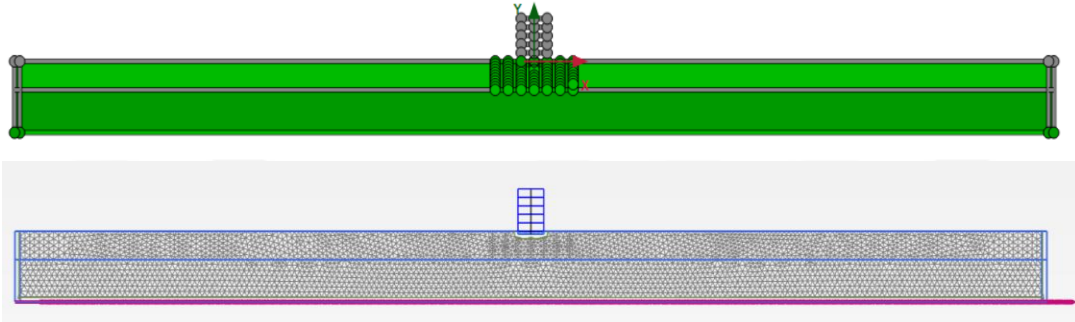
6.4.2. Modellemede eleman boyutunun belirlenmesi

Greif (2015) yapmış olduğu çalışmalarda deprem etkisinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için tanımlanan modelde minimum 8 düğüm noktasının bulunması halinde denklem 6.4’in kullanılabileceğini ifade etmiştir.

$$\text{Ortalama eleman boyutu} \leq \frac{V_{s,min}}{2.f_{max}} \quad (6.4)$$

Çalışmanın amacına uygun olarak hesaplanan eleman boyutu üzerinden; binanın davranışını daha iyi modelleyebilmek adına literatürde yer alan denklem 6.5 kullanılarak binaya yakın olan bölümlerde eleman küçültülmesi işlemi yapılmış, gerekli kalite kontrolleri sağlanmıştır.

$$\text{Ortalama eleman boyutu} \leq \frac{V_{s,min}}{8.f_{max}} \quad (6.5)$$

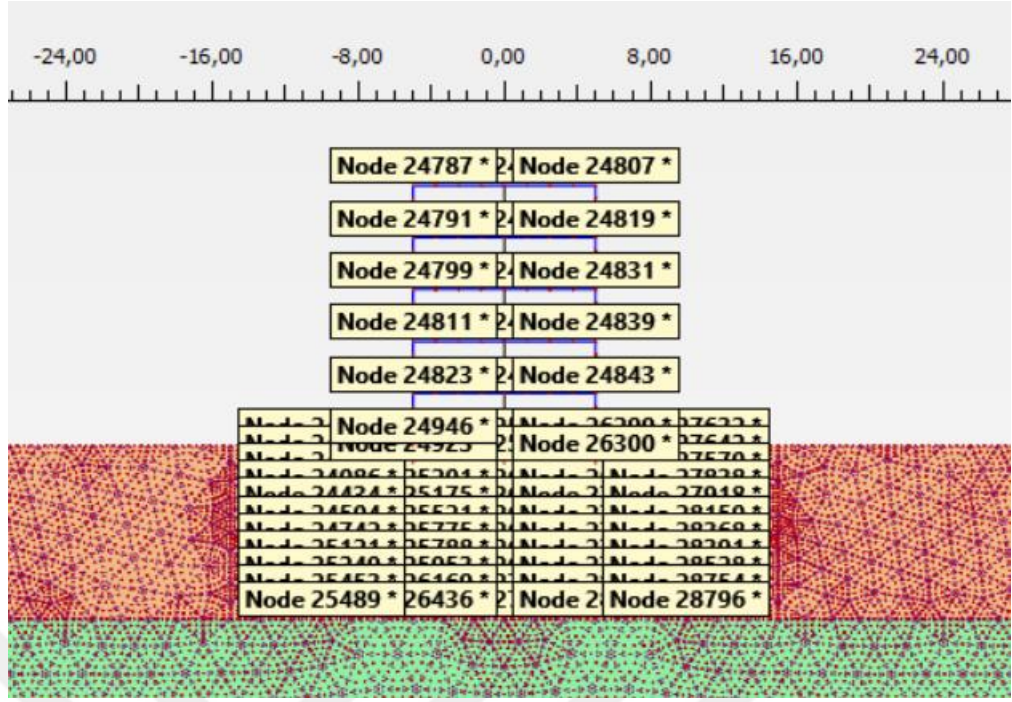


Şekil 6.10. Seçilen eleman boyutlarının gösterimi.

Minimum kayma dalgası hızı 105 m/s için hesaplar göz önüne alındığında eleman boyutu;

$$\frac{V_{s,min}}{2.f_{max}} = 2 \text{ m olarak bulunur.}$$

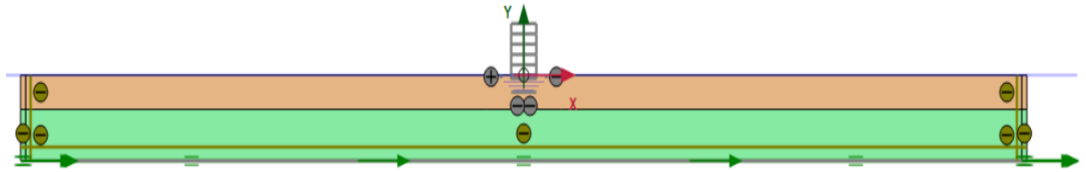
Model üzerinde bina davranışının iyi modellenebilmesi ve gerçekleştirilen dinamik analiz altında zeminde meydana gelen sıvılaşmanın irdelenebilmesi amacıyla seçilen noktalar ağ durumu şeki 6.11’de gösterilmiştir.



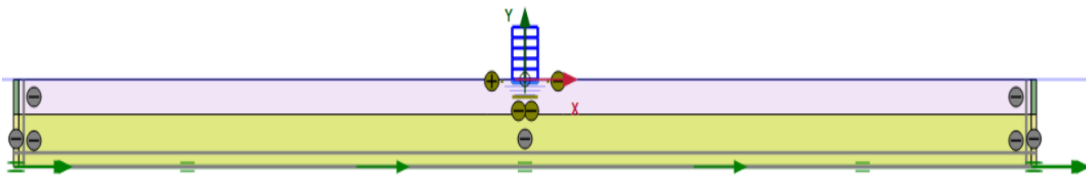
Şekil 6.11. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla model üzerinde seçilen noktalar.

6.4.3. Analiz Öncesi Analiz Aşamalarının Belirlenmesi

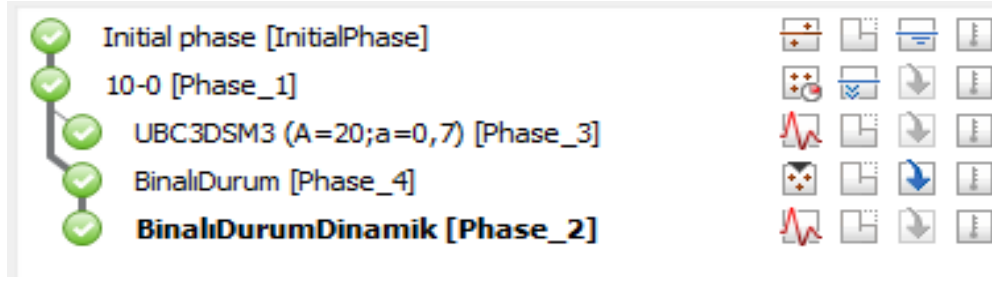
Zemin modellerinde doğal durum şekil 6.12’de, dinamik analiz aşaması şekil 6.13’de gösterilmiştir. Zemin modellerinde gerçekleştirilen analizler şekil 6.14’de sunulmuştur.



Şekil 6.12. Doğal durumun gösterimi.



Şekil 6.13. Dinamik analizin gösterimi.



Şekil 6.14. Belirlenen tüm zemin profillerinde gerçekleştirilen analizler.

7. ANALİZ EDİLEN MODELLERİN DETERMİNİSTİK YÖNTEM İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1. SPT Değerleri açısından Güvenlik Katsayılarının Hesaplanması

Elde edilen modeller için sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının hesaplanması amacıyla sıvılaşmayan tabaka için SPT-N değeri 52, sıvılaşan tabaka için SPT-N değeri 7 alınmıştır. Bahse konu değerler denklem 2.7'nin kullanılması ile CRR değerleri hesaplanmıştır. SPT-N>30 olduğu durumda güvenlik katsayısı 1 kabul edilmiş, CRR değeri hesap edilmemiştir. Sıvılaşan tabaka için hesap edildiğinde CRR değeri 0,088 olarak çıkmaktadır. CSR değeri için denklem 2.8 kullanılarak her bir model için hesaplar yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.1. gösterilmiştir. Tablo 7.1'de SPT-N değeri 30'dan büyük olduğu için güvenlik katsayısı hesap edilmemiş, 1 kabul edilmiştir.

Tablo 7.1. SPT değerleri kullanılarak güvenlik katsayılarının hesap edilmesi.

0-10 Modeli İçin Güvenlik Katsayısı Hesap Tablosu						
a_{max} (g)	Z (m)	BHA (kN/m ³)	Gerilme (kN/m ²)	Efektif Gerilme (kN/m ²)	CSR (-)	GS (-)
0,4	1	18	18	8,19	0,57	0,15
0,4	2	18	36	16,38	0,56	0,16
0,4	3	18	54	24,57	0,56	0,16
0,4	4	18	72	32,76	0,55	0,16
0,4	5	18	90	40,95	0,55	0,16
0,4	6	18	108	49,14	0,55	0,16
0,4	7	18	126	57,33	0,54	0,16
0,4	8	18	144	65,52	0,54	0,16
0,4	9	18	162	73,71	0,53	0,16
0,4	10	18	180	81,9	0,53	0,17

2-8 Modeli İçin Güvenlik Katsayısı Hesap Tablosu						
a_{max} (g)	Z (m)	BHA (kN/m ³)	Gerilme (kN/m ²)	Efektif Gerilme (kN/m ²)	CSR (-)	GS (-)
0,4	1	19	19	9,19	0,53	Sıvılaşmaz
0,4	2	19	38	17,38	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	3	18	56	25,57	0,56	0,16
0,4	4	18	74	33,76	0,55	0,16
0,4	5	18	92	41,95	0,55	0,16
0,4	6	18	110	50,14	0,54	0,16

Tablo 7.1.(Devamı) SPT değerleri kullanılarak güvenlik katsayılarının hesap edilmesi.

0,4	7	18	128	58,33	0,54	0,16
0,4	8	18	146	66,52	0,54	0,16
0,4	9	18	164	74,71	0,53	0,16
0,4	10	18	182	82,9	0,53	0,17
4-6 Modeli İçin Güvenlik Katsayısı Hesap Tablosu						
a_{max} (g)	Z (m)	BHA (kN/m ³)	Gerilme (kN/m ²)	Efektif Gerilme (kN/m ²)	CSR (-)	GS (-)
0,4	1	19	19	9,19	0,53	Sıvılaşmaz
0,4	2	19	38	17,38	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	3	19	57	25,57	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	4	19	76	33,76	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	5	18	94	41,95	0,56	0,16
0,4	6	18	112	50,14	0,55	0,16
0,4	7	18	130	58,33	0,55	0,16
0,4	8	18	148	66,52	0,54	0,16
0,4	9	18	166	74,71	0,54	0,16
0,4	10	18	184	82,9	0,53	0,16
6-4 Modeli İçin Güvenlik Katsayısı Hesap Tablosu						
a_{max} (g)	Z (m)	BHA (kN/m ³)	Gerilme (kN/m ²)	Efektif Gerilme (kN/m ²)	CSR (-)	GS (-)
0,4	1	19	19	9,19	0,53	Sıvılaşmaz
0,4	2	19	38	17,38	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	3	19	57	25,57	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	4	19	76	33,76	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	5	19	95	41,95	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	6	19	114	50,14	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	7	18	132	58,33	0,56	0,16
0,4	8	18	150	66,52	0,55	0,16
0,4	9	18	168	74,71	0,54	0,16
0,4	10	18	186	82,9	0,54	0,16
8-2 Modeli İçin Güvenlik Katsayısı Hesap Tablosu						
a_{max} (g)	Z (m)	BHA (kN/m ³)	Gerilme (kN/m ²)	Efektif Gerilme (kN/m ²)	CSR (-)	GS (-)
0,4	1	19	19	9,19	0,53	Sıvılaşmaz
0,4	2	19	38	17,38	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	3	19	57	25,57	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	4	19	76	33,76	0,57	Sıvılaşmaz

Tablo 7.1.(Devamı) SPT değerleri kullanılarak güvenlik katsayılarının hesap edilmesi.

0,4	5	19	95	41,95	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	6	19	114	50,14	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	7	19	133	58,33	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	8	19	152	66,52	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	9	18	170	74,71	0,55	0,16
0,4	10	18	188	82,9	0,54	0,16

10-0 Modeli İçin Güvenlik Katsayısı Hesap Tablosu

a_{max} (g)	Z (m)	BHA (kN/m ³)	Gerilme (kN/m ²)	Efektif Gerilme (kN/m ²)	CSR (-)	GS (-)
0,4	1	19	19	9,19	0,53	Sıvılaşmaz
0,4	2	19	38	17,38	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	3	19	57	25,57	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	4	19	76	33,76	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	5	19	95	41,95	0,57	Sıvılaşmaz
0,4	6	19	114	50,14	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	7	19	133	58,33	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	8	19	152	66,52	0,56	Sıvılaşmaz
0,4	9	19	171	74,71	0,55	Sıvılaşmaz
0,4	10	19	190	82,9	0,55	Sıvılaşmaz

7.2. Şiddet Parametrelerine Göre Karşılaştırma Yapılması

7.2.1. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI)

Hesaplanan LPI değerleri Tablo 7.2’de verilmiş olup 0-10, 2-8, 4-6 tabakaları için sıvılaşma potansiyeli orta, 6-4,8-2 tabakaları için düşük, 10-0 tabakası için çok düşük olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.2. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) hesabı.

z (m)	GS	W(Z)	LPI	z (m)	GS	W(Z)	LPI
1	0,15	9,5	1,468743	1	Sıvılaşmaz	9,5	0
2	0,16	9	1,402251	2	Sıvılaşmaz	9	0
3	0,16	8,5	1,334717	3	0,16	8,5	1,339432
4	0,16	8	1,266118	4	0,16	8	1,269502
5	0,16	7,5	1,196427	5	0,16	7,5	1,198999
6	0,16	7	1,125619	6	0,16	7	1,127643
7	0,16	6,5	1,053666	7	0,16	6,5	1,055294
8	0,16	6	0,98054	8	0,16	6	0,981868
9	0,16	5,5	0,906213	9	0,16	5,5	0,907306
10	0,17	5	0,830654	10	0,17	5	0,831557
0-10 LPI Değeri			11,56495	2-8 LPI Değeri			8,7116
z (m)	GS	W(Z)	LPI	z (m)	GS	W(Z)	LPI
1	Sıvılaşmaz	9,5	0	1	Sıvılaşmaz	9,5	0
2	Sıvılaşmaz	9	0	2	Sıvılaşmaz	9	0
3	Sıvılaşmaz	8,5	0	3	Sıvılaşmaz	8,5	0
4	Sıvılaşmaz	8	0	4	Sıvılaşmaz	8	0
5	0,16	7,5	1,173489	5	Sıvılaşmaz	7,5	0
6	0,16	7	1,107506	6	Sıvılaşmaz	7	0
7	0,16	6,5	1,039059	7	0,16	6,5	1,023315
8	0,16	6	0,9686	8	0,16	6	0,955685
9	0,16	5,5	0,896374	9	0,16	5,5	0,885703
10	0,16	5	0,822518	10	0,16	5	0,813674
4-6 LPI Değeri			6,007546	6-4 LPI Değeri			3,678378
z (m)	GS	W(Z)	LPI	z (m)	GS	W(Z)	LPI
1	Sıvılaşmaz	9,5	0	1	Sıvılaşmaz	9,5	0
2	Sıvılaşmaz	9	0	2	Sıvılaşmaz	9	0
3	Sıvılaşmaz	8,5	0	3	Sıvılaşmaz	8,5	0
4	Sıvılaşmaz	8	0	4	Sıvılaşmaz	8	0
5	Sıvılaşmaz	7,5	0	5	Sıvılaşmaz	7,5	0
6	Sıvılaşmaz	7	0	6	Sıvılaşmaz	7	0
7	Sıvılaşmaz	6,5	0	7	Sıvılaşmaz	6,5	0
8	Sıvılaşmaz	6	0	8	Sıvılaşmaz	6	0
9	0,16	5,5	0,875283	9	Sıvılaşmaz	5,5	0
10	0,16	5	0,805018	10	Sıvılaşmaz	5	0
8-2 LPI Değeri			1,680301	10-0 LPI Değeri			0

7.2.2. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN)

Tablo 7.3'deki LSN değerleri incelendiğinde 0-10, 2-8 tabakaları için sıvılaşma şiddetinin aşırı derece 4-6 tabakası için orta-yüksek derece, 6-4 tabakası için orta, 8-2 tabakası için sınırlı derece, 10-0 tabakası için sıvılaşma yok olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.3. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN)'nın hesap edilmesi.

Sıvılaşma Şiddet Katsayısı (LSN) Yöntemi							
z (m)	GS	Hacimsel Deformasyon	LSN	z (m)	GS	Hacimsel Deformasyon	LSN
1	0,15	0,045	0,045	1	Sıvılaşmaz	0,001	0,001
2	0,16	0,045	0,0225	2	Sıvılaşmaz	0,001	0,0005
3	0,16	0,045	0,015	3	0,15758	0,045	0,015
4	0,16	0,045	0,01125	4	0,158688	0,045	0,01125
5	0,16	0,045	0,009	5	0,159867	0,045	0,009
6	0,16	0,045	0,0075	6	0,161092	0,045	0,0075
7	0,16	0,045	0,006429	7	0,162353	0,045	0,006429
8	0,16	0,045	0,005625	8	0,163645	0,045	0,005625
9	0,16	0,045	0,005	9	0,164965	0,045	0,005
10	0,17	0,045	0,0045	10	0,166311	0,045	0,0045
0-10 LSN Değeri			131,8036	2-8 LSN Değeri			65,80357
z (m)	GS	Hacimsel Deformasyon	LSN	z (m)	GS	Hacimsel Deformasyon	LSN
1	Sıvılaşmaz	0,001	0,001	1	Sıvılaşmaz	0,001	0,001
2	Sıvılaşmaz	0,001	0,0005	2	Sıvılaşmaz	0,001	0,0005
3	Sıvılaşmaz	0,001	0,000333	3	Sıvılaşmaz	0,001	0,000333
4	Sıvılaşmaz	0,001	0,00025	4	Sıvılaşmaz	0,001	0,00025
5	0,16	0,045	0,009	5	Sıvılaşmaz	0,001	0,0002
6	0,16	0,045	0,0075	6	Sıvılaşmaz	0,001	0,000167
7	0,16	0,045	0,006429	7	0,16	0,045	0,006429
8	0,16	0,045	0,005625	8	0,16	0,045	0,005625
9	0,16	0,045	0,005	9	0,16	0,045	0,005
10	0,16	0,045	0,0045	10	0,16	0,045	0,0045
4-6 LSN Değeri			40,1369	6-4 LSN Değeri			24,00357
z (m)	GS	Hacimsel Deformasyon	LSN	z (m)	GS	Hacimsel Deformasyon	LSN
1	Sıvılaşmaz	0,001	0,001	1	Sıvılaşmaz	0,001	0,001
2	Sıvılaşmaz	0,001	0,0005	2	Sıvılaşmaz	0,001	0,0005
3	Sıvılaşmaz	0,001	0,000333	3	Sıvılaşmaz	0,001	0,000333
4	Sıvılaşmaz	0,001	0,00025	4	Sıvılaşmaz	0,001	0,00025
5	Sıvılaşmaz	0,001	0,0002	5	Sıvılaşmaz	0,001	0,0002
6	Sıvılaşmaz	0,001	0,000167	6	Sıvılaşmaz	0,001	0,000167
7	Sıvılaşmaz	0,001	0,000143	7	Sıvılaşmaz	0,001	0,000143
8	Sıvılaşmaz	0,001	0,000125	8	Sıvılaşmaz	0,001	0,000125
9	0,16	0,045	0,005	9	Sıvılaşmaz	0,001	0,000111
10	0,16	0,045	0,0045	10	Sıvılaşmaz	0,001	0,0001
8-2 LSN Değeri			12,21786	10-0 LSN Değeri			2,928968

7.2.3. Sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI)

Tablo 7.4 ‘deki LSI değerleri incelendiğinde 0-10, 2-8, 4-6 tabakaları için sıvılaşma şiddetinin orta, 6-4,8-2 tabakaları için düşük, 10-0 tabakası için çok düşük olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.4. Sıvılaşma şiddet katsayısı (LSI)’nın hesap edilmesi.

Sıvılaşma Şiddet Katsayısı (LSI) Yöntemi										
z (m)	PL	TH	W(z)	LSI	z (m)	PL	TH	W(z)	LSI	
1	0,877770916	1	9,5	8,338824	1	0,877771	0	9,5	0	
2	0,832133041	1	9	7,489197	2	0,832133	0	9	0	
3	0,803126912	1	8,5	6,826579	3	0,803127	1	8,5	6,826579	
4	0,781182399	1	8	6,249459	4	0,781182	1	8	6,249459	
5	0,763198296	1	7,5	5,723987	5	0,763198	1	7,5	5,723987	
6	0,747761391	1	7	5,23433	6	0,747761	1	7	5,23433	
7	0,734104294	1	6,5	4,771678	7	0,734104	1	6,5	4,771678	
8	0,721762093	1	6	4,330573	8	0,721762	1	6	4,330573	
9	0,710431029	1	5,5	3,907371	9	0,710431	1	5,5	3,907371	
10	0,699901309	1	5	3,499507	10	0,699901	1	5	3,499507	
Ort. 0-10 LSI Değeri			2,818575	56,3715	Ort. 2-8 LSI Değeri			2,027174	40,54348	
z (m)	PL	TH	W(z)	LSI	z (m)	PL	TH	W(z)	LSI	
1	0,877770916	0	9,5	0	1	0,877771	0	9,5	0	
2	0,832133041	0	9	0	2	0,832133	0	9	0	
3	0,803126912	0	8,5	0	3	0,803127	0	8,5	0	
4	0,781182399	0	8	0	4	0,781182	0	8	0	
5	0,763198296	1	7,5	5,723987	5	0,763198	0	7,5	0	
6	0,747761391	1	7	5,23433	6	0,747761	0	7	0	
7	0,734104294	1	6,5	4,771678	7	0,734104	1	6,5	4,771678	
8	0,721762093	1	6	4,330573	8	0,721762	1	6	4,330573	
9	0,710431029	1	5,5	3,907371	9	0,710431	1	5,5	3,907371	
10	0,699901309	1	5	3,499507	10	0,699901	1	5	3,499507	
Ort. 4-6 LSI Değeri			1,373372	27,46744	Ort. 6-4 LSI Değeri			0,825456	16,50913	
z (m)	PL	TH	W(z)	LSI	z (m)	PL	TH	W(z)	LSI	
1	0,877770916	0	9,5	0	1	0,877771	0	9,5	0	
2	0,832133041	0	9	0	2	0,832133	0	9	0	
3	0,803126912	0	8,5	0	3	0,803127	0	8,5	0	
4	0,781182399	0	8	0	4	0,781182	0	8	0	
5	0,763198296	0	7,5	0	5	0,763198	0	7,5	0	
6	0,747761391	0	7	0	6	0,747761	0	7	0	
7	0,734104294	0	6,5	0	7	0,734104	0	6,5	0	
8	0,721762093	0	6	0	8	0,721762	0	6	0	
9	0,710431029	1	5,5	3,907371	9	0,710431	0	5,5	0	
10	0,699901309	1	5	3,499507	10	0,699901	0	5	0	
Ort. 8-2 LSI Değeri			0,370344	7,406877	Ort. 10-0 LSI Değeri			0	0	

7.2.4. Sıvılaşma şiddetinin tahmini (IL)

Tablo 7.5'deki IL değerleri incelendiğinde 0-10, 2-8, 4-6 tabakaları için sıvılaşma şiddetinin çok yüksek, 6-4 tabakası için yüksek, 8-2 tabakaları için düşük, 10-0 tabakası için çok düşük olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.5. Sıvılaşma şiddetinin tahmini (IL)'nin hesap edilmesi.

Sıvılaşma Şiddetinin Tahmini (IL) Yöntemi							
z (m)	GS	W(Z)	LPI	z (m)	GS	W(Z)	LPI
1	0,15	9,333333	7,890358	1	Sıvılaşmaz	9,333333	0
2	0,16	8,666667	7,316351	2	Sıvılaşmaz	8,666667	0
3	0,16	8	6,743796	3	0,16	8	6,739358
4	0,16	7,333333	6,172725	4	0,16	7,333333	6,169623
5	0,16	6,666667	5,603176	5	0,16	6,666667	5,60089
6	0,16	6	5,035184	6	0,16	6	5,033449
7	0,16	5,333333	4,468787	7	0,16	5,333333	4,467451
8	0,16	4,666667	3,904025	8	0,16	4,666667	3,902991
9	0,16	4	3,340936	9	0,16	4	3,340141
10	0,17	3,333333	2,779564	10	0,17	3,333333	2,778962
0-10 IL Değeri			53,2549	2-8 IL Değeri			38,03287
z (m)	GS	W(Z)	LPI	z (m)	GS	W(Z)	LPI
1	Sıvılaşmaz	9,333333	0	1	Sıvılaşmaz	9,333333	0
2	Sıvılaşmaz	8,666667	0	2	Sıvılaşmaz	8,666667	0
3	Sıvılaşmaz	8	0	3	Sıvılaşmaz	8	0
4	Sıvılaşmaz	7,333333	0	4	Sıvılaşmaz	7,333333	0
5	0,16	6,666667	5,623566	5	Sıvılaşmaz	6,666667	0
6	0,16	6	5,050709	6	Sıvılaşmaz	6	0
7	0,16	5,333333	4,480772	7	0,16	5,333333	4,49369
8	0,16	4,666667	3,913311	8	0,16	4,666667	3,923356
9	0,16	4	3,348091	9	0,16	4	3,355852
10	0,16	3,333333	2,784988	10	0,16	3,333333	2,790884
4-6 IL Değeri			25,20144	6-4 IL Değeri			14,56378
z (m)	GS	W(Z)	LPI	z (m)	GS	W(Z)	LPI
1	Sıvılaşmaz	9,333333	0	1	Sıvılaşmaz	9,333333	0
2	Sıvılaşmaz	8,666667	0	2	Sıvılaşmaz	8,666667	0
3	Sıvılaşmaz	8	0	3	Sıvılaşmaz	8	0
4	Sıvılaşmaz	7,333333	0	4	Sıvılaşmaz	7,333333	0
5	Sıvılaşmaz	6,666667	0	5	Sıvılaşmaz	6,666667	0
6	Sıvılaşmaz	6	0	6	Sıvılaşmaz	6	0
7	Sıvılaşmaz	5,333333	0	7	Sıvılaşmaz	5,333333	0
8	Sıvılaşmaz	4,666667	0	8	Sıvılaşmaz	4,666667	0
9	0,16	4	3,36343	9	Sıvılaşmaz	4	0
10	0,16	3,333333	2,796655	10	Sıvılaşmaz	3,333333	0
8-2 IL Değeri			6,160085	10-0 IL Değeri			0

7.2.5. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırılması (LS)

Tablo 7.6'daki LS değerleri incelendiğinde 0-10 tabakası için yüksek, 2-8, 4-6 tabakaları için sıvılaşma şiddetinin orta, 6-4,8-2 tabakaları için sıvılaşma şiddetinin az, 10-0 tabakası için çok az olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.6. Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırması (LS)'nin hesap edilmesi.

GS	PL	z (m)	W(z)	LS	GS	PL	z	W(z)	LS	
0,16	1,00	1,00	9,50	9,50	1,40	0,15	1,00	9,50	1,47	
0,16	1,00	2,00	9,00	9,00	1,40	0,15	2,00	9,00	1,39	
0,16	1,00	3,00	8,50	8,50	0,16	1,00	3,00	8,50	8,50	
0,16	1,00	4,00	8,00	8,00	0,16	1,00	4,00	8,00	8,00	
0,16	1,00	5,00	7,50	7,50	0,16	1,00	5,00	7,50	7,50	
0,16	1,00	6,00	7,00	7,00	0,16	1,00	6,00	7,00	7,00	
0,16	1,00	7,00	6,50	6,50	0,16	1,00	7,00	6,50	6,50	
0,16	1,00	8,00	6,00	6,00	0,16	1,00	8,00	6,00	6,00	
0,17	1,00	9,00	5,50	5,50	0,17	1,00	9,00	5,50	5,50	
1,40	0,15	10,00	5,00	0,77	1,40	0,15	10,00	5,00	0,77	
1,40	0,15	11,00	4,50	0,70	1,40	0,15	11,00	4,50	0,70	
1,40	0,15	12,00	4,00	0,62	1,40	0,15	12,00	4,00	0,62	
1,40	0,15	13,00	3,50	0,54	1,40	0,15	13,00	3,50	0,54	
1,40	0,15	14,00	3,00	0,46	1,40	0,15	14,00	3,00	0,46	
1,40	0,15	15,00	2,50	0,39	1,40	0,15	15,00	2,50	0,39	
1,40	0,15	16,00	2,00	0,31	1,40	0,15	16,00	2,00	0,31	
1,40	0,15	17,00	1,50	0,23	1,40	0,15	17,00	1,50	0,23	
1,40	0,15	18,00	1,00	0,15	1,40	0,15	18,00	1,00	0,15	
1,40	0,15	19,00	0,50	0,08	1,40	0,15	19,00	0,50	0,08	
1,40	0,15	20,00	0,00	0,00	1,40	0,15	20,00	0,00	0,00	
0-10 Modeli için Toplam LS Değeri				71,73	2-8 Modeli için Toplam LS Değeri				56,10	
GS	PL	z (m)	W(z)	LS	GS	PL	z	W(z)	LS	
1,40	0,15	1,00	9,50	1,47	1,40	0,15	1,00	9,50	1,47	
1,40	0,15	2,00	9,00	1,39	1,40	0,15	2,00	9,00	1,39	
1,40	0,15	3,00	8,50	1,32	1,40	0,15	3,00	8,50	1,32	
1,40	0,15	4,00	8,00	1,24	1,40	0,15	4,00	8,00	1,24	
0,16	1,00	5,00	7,50	7,50	1,40	0,15	5,00	7,50	1,16	
0,16	1,00	6,00	7,00	7,00	1,40	0,15	6,00	7,00	1,08	
0,16	1,00	7,00	6,50	6,50	0,16	1,00	7,00	6,50	6,50	
0,16	1,00	8,00	6,00	6,00	0,16	1,00	8,00	6,00	6,00	
0,17	1,00	9,00	5,50	5,50	0,17	1,00	9,00	5,50	5,50	
1,40	0,15	10,00	5,00	0,77	1,40	0,15	10,00	5,00	0,77	
1,40	0,15	11,00	4,50	0,70	1,40	0,15	11,00	4,50	0,70	
1,40	0,15	12,00	4,00	0,62	1,40	0,15	12,00	4,00	0,62	
1,40	0,15	13,00	3,50	0,54	1,40	0,15	13,00	3,50	0,54	
1,40	0,15	14,00	3,00	0,46	1,40	0,15	14,00	3,00	0,46	
1,40	0,15	15,00	2,50	0,39	1,40	0,15	15,00	2,50	0,39	
1,40	0,15	16,00	2,00	0,31	1,40	0,15	16,00	2,00	0,31	
1,40	0,15	17,00	1,50	0,23	1,40	0,15	17,00	1,50	0,23	

Tablo 7.6.(Devamı) Sıvılaşma şiddetinin sınıflandırması (LS)'nin hesap edilmesi

1,40	0,15	18,00	1,00	0,15	1,40	0,15	18,00	1,00	0,15	
1,40	0,15	19,00	0,50	0,08	1,40	0,15	19,00	0,50	0,08	
1,40	0,15	20,00	0,00	0,00	1,40	0,15	20,00	0,00	0,00	
4-6 Modeli için Toplam LS Değeri				42,16	6-4 Modeli için Toplam LS Değeri				29,91	
GS	PL	z (m)	W(z)	LS	GS	PL	z (m)	W(z)	LS	
1,40	0,15	0,00	10,00	1,55	1,40	0,15	0,00	10,00	1,55	
1,40	0,15	1,00	9,50	1,47	1,40	0,15	1,00	9,50	1,47	
1,40	0,15	2,00	9,00	1,39	1,40	0,15	2,00	9,00	1,39	
1,40	0,15	3,00	8,50	1,32	1,40	0,15	3,00	8,50	1,32	
1,40	0,15	4,00	8,00	1,24	1,40	0,15	4,00	8,00	1,24	
1,40	0,15	5,00	7,50	1,16	1,40	0,15	5,00	7,50	1,16	
1,40	0,15	6,00	7,00	1,08	1,40	0,15	6,00	7,00	1,08	
1,40	0,15	7,00	6,50	1,01	1,40	0,15	7,00	6,50	1,01	
1,40	0,15	8,00	6,00	0,93	1,40	0,15	8,00	6,00	0,93	
0,17	1,00	9,00	5,50	5,50	1,40	0,15	9,00	5,50	0,85	
1,40	0,15	10,00	5,00	0,77	1,40	0,15	10,00	5,00	0,77	
1,40	0,15	11,00	4,50	0,70	1,40	0,15	11,00	4,50	0,70	
1,40	0,15	12,00	4,00	0,62	1,40	0,15	12,00	4,00	0,62	
1,40	0,15	13,00	3,50	0,54	1,40	0,15	13,00	3,50	0,54	
1,40	0,15	14,00	3,00	0,46	1,40	0,15	14,00	3,00	0,46	
1,40	0,15	15,00	2,50	0,39	1,40	0,15	15,00	2,50	0,39	
1,40	0,15	16,00	2,00	0,31	1,40	0,15	16,00	2,00	0,31	
1,40	0,15	17,00	1,50	0,23	1,40	0,15	17,00	1,50	0,23	
1,40	0,15	18,00	1,00	0,15	1,40	0,15	18,00	1,00	0,15	
1,40	0,15	19,00	0,50	0,08	1,40	0,15	19,00	0,50	0,08	
1,40	0,15	20,00	0,00	0,00	1,40	0,15	20,00	0,00	0,00	
8-2 Modeli için Toplam LS Değeri				19,35	10-0 Modeli için Toplam LS Değeri				14,70	

7.3. Yapı Zemin Etkileşimi Doğrultusunda Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Kesitte yapı bulunması durumunda literatürde yer alan deterministik yöntemlerin kullanılması neticesinde binanın sebep olduğu kayma gerilmelerinden kaynaklı olarak güvenlik katsayısının daha düşük hesaplandığı görülmektedir. Yapı bulunma durumuna göre sıvılaşma potansiyelinin şiddet katsayısı üzerinden değerlendirilmesi sadece efektif gerilme değişimini dikkate alan LPI, IL ve LS değerlendirme yöntemleri ile yapılabilmektedir. LPI ve IL şiddet değerlendirme yöntemlerine göre model üzerinde yapı olması halinde 10-0 tabakalı model hariç tümünde sıvılaşma potansiyeli orta ve yüksek dereceli olarak tespit edilmiş, LS yöntemine göre ise güvenlik katsayısı daha düşük ve ilgili güvenlik katsayısı üzerinden hesaplama yapıldığı için, kullanılan formül gereği yapısız duruma göre çok yakın sonuçlar içerdiği görülmektedir. Karşılaştırma sonuçları 0-10 model için Tablo 7.7'de, 2-8 model için Tablo 7.8'de 4-

6 modeli için Tablo 7.9'da, 6-4 modeli için Tablo 7.10'da, 8-2 modeli için Tablo 7.11'de, 10-0 modeli için Tablo 7.12'de sunulmuştur.



Tablo 7.7. 0-10 Model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.

Modelin 0-10 Binalı Olması Halinde LPI-IL-LS											
z (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Normal G. (kN/m ²)	Efektif G. (kN/m ²)	Binalı E.G. (kN/m ²)	CSR _{Yapı}	K _α	CRR	FS	LPI	IL	LS
1	18	18	8,19	112,1442	2,092836	0,984769	0,04333	0,020704	9,303313	9,140097	9,5
2	18	36	16,38	120,043	2,196318	0,974443	0,042876	0,019522	8,824306	16,99496	9
3	18	54	24,57	127,3969	2,274219	0,965565	0,042485	0,018681	8,341211	23,55165	8,5
4	18	72	32,76	134,3971	2,334083	0,957725	0,04214	0,018054	7,855567	28,80374	8
5	18	90	40,95	140,7359	2,38172	0,950867	0,041838	0,017566	7,368252	32,74779	7,5
6	18	108	49,14	145,3275	2,423616	0,945273	0,041592	0,017161	6,879872	35,3822	7
7	18	126	57,33	151,9397	2,451187	0,939237	0,041326	0,01686	6,390412	36,7039	6,5
8	18	144	65,52	157,0026	2,476303	0,934184	0,041104	0,016599	5,900406	36,71364	6
9	18	162	73,71	161,8479	2,496305	0,9295	0,040898	0,016383	5,409891	35,4102	5,5
10	18	180	81,9	167,0053	2,510577	0,924965	0,040698	0,016211	4,918946	32,79297	5
11	17,07	187,77	79,86	161,6331	2,583931	0,927452	0,040808	1	0	0	0
12	17,07	204,84	87,12	165,6608	2,59574	0,923694	0,040643	1	0	0	0
13	17,07	221,91	94,38	169,676	2,604195	0,920103	0,040485	1	0	0	0
14	17,07	238,98	101,64	173,9533	2,608848	0,916584	0,04033	1	0	0	0
15	17,07	256,05	108,9	178,476	2,610152	0,913139	0,040178	1	0	0	0
16	17,07	273,12	116,16	183,1152	2,608851	0,909801	0,040031	1	0	0	0
17	17,07	290,19	123,42	187,6296	2,605933	0,906625	0,039892	1	0	0	0
18	17,07	307,26	130,68	192,5475	2,600084	0,903465	0,039752	1	0	0	0
19	17,07	324,33	137,94	197,4613	2,592716	0,900423	0,039619	1	0	0	0
20	17,07	341,4	145,2	202,3792	2,583966	0,897488	0,039489	1	0	0	0
									71,19218	288,2412	72,5

Tablo 7.8. 2-8 model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.

Modelin 2-8 Binalı Olması Halinde LPI-IL-LS

z (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Normal G. (kN/m ²)	Efektif G. (kN/m ²)	Binalı E.G. (kN/m ²)	CSR _{Yapı}	K _α	CRR	FS	LPI	IL	LS
1	19	19	9,19	113,1442	2,090257	0,983413	0,04327	1	0	0	0
2	19	38	18,38	122,043	2,188452	0,972065	0,042771	1	0	0	0
3	18	54	24,57	127,3969	2,274219	0,965565	0,042485	0,018681	8,341211	23,55165	8,5
4	18	72	32,76	134,3971	2,334083	0,957725	0,04214	0,018054	7,855567	28,80374	8
5	18	90	40,95	140,7359	2,38172	0,950867	0,041838	0,017566	7,368252	32,74779	7,5
6	18	108	49,14	145,3275	2,423616	0,945273	0,041592	0,017161	6,879872	35,3822	7
7	18	126	57,33	151,9397	2,451187	0,939237	0,041326	0,01686	6,390412	36,7039	6,5
8	18	144	65,52	157,0026	2,476303	0,934184	0,041104	0,016599	5,900406	36,71364	6
9	18	162	73,71	161,8479	2,496305	0,9295	0,040898	0,016383	5,409891	35,4102	5,5
10	18	180	81,9	167,0053	2,510577	0,924965	0,040698	0,016211	4,918946	32,79297	5
11	17,07	187,77	79,86	161,6331	2,583931	0,927452	0,040808	1	0	0	0
12	17,07	204,84	87,12	165,6608	2,59574	0,923694	0,040643	1	0	0	0
13	17,07	221,91	94,38	169,676	2,604195	0,920103	0,040485	1	0	0	0
14	17,07	238,98	101,64	173,9533	2,608848	0,916584	0,04033	1	0	0	0
15	17,07	256,05	108,9	178,476	2,610152	0,913139	0,040178	1	0	0	0
16	17,07	273,12	116,16	183,1152	2,608851	0,909801	0,040031	1	0	0	0
17	17,07	290,19	123,42	187,6296	2,605933	0,906625	0,039892	1	0	0	0
18	17,07	307,26	130,68	192,5475	2,600084	0,903465	0,039752	1	0	0	0
19	17,07	324,33	137,94	197,4613	2,592716	0,900423	0,039619	1	0	0	0
20	17,07	341,4	145,2	202,3792	2,583966	0,897488	0,039489	1	0	0	0
									53,06456	262,1061	54

Tablo 7.9. 4-6 model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.

Modelin 4-6 Binalı Olması Halinde LPI-IL-LS

z (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Normal G. (kN/m ²)	Efektif G. (kN/m ²)	Binalı E.G. (kN/m ²)	CSR _{Yapı}	K _α	CRR	FS	LPI	IL	LS
1	19	19	9,19	113,1442	2,090257	0,983413	0,04327	1	0	0	0
2	19	38	18,38	122,043	2,188452	0,972065	0,042771	1	0	0	0
3	19	57	27,57	130,3969	2,260204	0,962378	0,042345	1	0	0	0
4	19	76	36,76	138,3971	2,313816	0,953879	0,041971	1	0	0	0
5	18	90	40,95	140,7359	2,38172	0,950867	0,041838	0,017566	7,368252	32,74779	7,5
6	18	108	49,14	145,3275	2,423616	0,945273	0,041592	0,017161	6,879872	35,3822	7
7	18	126	57,33	151,9397	2,451187	0,939237	0,041326	0,01686	6,390412	36,7039	6,5
8	18	144	65,52	157,0026	2,476303	0,934184	0,041104	0,016599	5,900406	36,71364	6
9	18	162	73,71	161,8479	2,496305	0,9295	0,040898	0,016383	5,409891	35,4102	5,5
10	18	180	81,9	167,0053	2,510577	0,924965	0,040698	0,016211	4,918946	32,79297	5
11	17,07	187,77	79,86	161,6331	2,583931	0,927452	0,040808	1	0	0	0
12	17,07	204,84	87,12	165,6608	2,59574	0,923694	0,040643	1	0	0	0
13	17,07	221,91	94,38	169,676	2,604195	0,920103	0,040485	1	0	0	0
14	17,07	238,98	101,64	173,9533	2,608848	0,916584	0,04033	1	0	0	0
15	17,07	256,05	108,9	178,476	2,610152	0,913139	0,040178	1	0	0	0
16	17,07	273,12	116,16	183,1152	2,608851	0,909801	0,040031	1	0	0	0
17	17,07	290,19	123,42	187,6296	2,605933	0,906625	0,039892	1	0	0	0
18	17,07	307,26	130,68	192,5475	2,600084	0,903465	0,039752	1	0	0	0
19	17,07	324,33	137,94	197,4613	2,592716	0,900423	0,039619	1	0	0	0
20	17,07	341,4	145,2	202,3792	2,583966	0,897488	0,039489	1	0	0	0

Tablo 7.10. 6-4 model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.**Modelin 6-4 Binalı Olması Halinde LPI-IL-LS**

z (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Normal G. (kN/m ²)	Efektif G. (kN/m ²)	Binalı E.G. (kN/m ²)	CSR _{Yapı}	K_{α}	CRR	FS	LPI	IL	LS
1	19	19	9,19	113,1442	2,090257	0,983413	0,04327	1	0	0	0
2	19	38	18,38	122,043	2,188452	0,972065	0,042771	1	0	0	0
3	19	57	27,57	130,3969	2,260204	0,962378	0,042345	1	0	0	0
4	19	76	36,76	138,3971	2,313816	0,953879	0,041971	1	0	0	0
5	19	95	45,95	145,7359	2,355307	0,946459	0,041644	1	0	0	0
6	19	114	55,14	151,3275	2,390887	0,940346	0,041375	1	0	0	0
7	18	126	57,33	151,9397	2,451187	0,939237	0,041326	0,01686	6,390412	36,7039	6,5
8	18	144	65,52	157,0026	2,476303	0,934184	0,041104	0,016599	5,900406	36,71364	6
9	18	162	73,71	161,8479	2,496305	0,9295	0,040898	0,016383	5,409891	35,4102	5,5
10	18	180	81,9	167,0053	2,510577	0,924965	0,040698	0,016211	4,918946	32,79297	5
11	17,07	187,77	79,86	161,6331	2,583931	0,927452	0,040808	1	0	0	0
12	17,07	204,84	87,12	165,6608	2,59574	0,923694	0,040643	1	0	0	0
13	17,07	221,91	94,38	169,676	2,604195	0,920103	0,040485	1	0	0	0
14	17,07	238,98	101,64	173,9533	2,608848	0,916584	0,04033	1	0	0	0
15	17,07	256,05	108,9	178,476	2,610152	0,913139	0,040178	1	0	0	0
16	17,07	273,12	116,16	183,1152	2,608851	0,909801	0,040031	1	0	0	0
17	17,07	290,19	123,42	187,6296	2,605933	0,906625	0,039892	1	0	0	0
18	17,07	307,26	130,68	192,5475	2,600084	0,903465	0,039752	1	0	0	0
19	17,07	324,33	137,94	197,4613	2,592716	0,900423	0,039619	1	0	0	0
20	17,07	341,4	145,2	202,3792	2,583966	0,897488	0,039489	1	0	0	0

Tablo 7.11. 8-2 model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.**Modelin 8-2 Binalı Olması Halinde LPI-IL-LS**

z (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Normal G. (kN/m ²)	Efektif G. (kN/m ²)	Binalı E.G. (kN/m ²)	CSR _{Yapı}	K_{α}	CRR	FS	LPI	IL	LS
1	19	19	9,19	113,1442	2,090257	0,983413	0,04327	1	0	0	0
2	19	38	18,38	122,043	2,188452	0,972065	0,042771	1	0	0	0
3	19	57	27,57	130,3969	2,260204	0,962378	0,042345	1	0	0	0
4	19	76	36,76	138,3971	2,313816	0,953879	0,041971	1	0	0	0
5	19	95	45,95	145,7359	2,355307	0,946459	0,041644	1	0	0	0
6	19	114	55,14	151,3275	2,390887	0,940346	0,041375	1	0	0	0
7	19	133	64,33	158,9397	2,413213	0,933908	0,041092	1	0	0	0
8	19	152	73,52	165,0026	2,432994	0,928471	0,040853	1	0	0	0
9	18	162	73,71	161,8479	2,496305	0,9295	0,040898	0,016383	5,409891	35,4102	5,5
10	18	180	81,9	167,0053	2,510577	0,924965	0,040698	0,016211	4,918946	32,79297	5
11	17,07	187,77	79,86	161,6331	2,583931	0,927452	0,040808	1	0	0	0
12	17,07	204,84	87,12	165,6608	2,59574	0,923694	0,040643	1	0	0	0
13	17,07	221,91	94,38	169,676	2,604195	0,920103	0,040485	1	0	0	0
14	17,07	238,98	101,64	173,9533	2,608848	0,916584	0,04033	1	0	0	0
15	17,07	256,05	108,9	178,476	2,610152	0,913139	0,040178	1	0	0	0
16	17,07	273,12	116,16	183,1152	2,608851	0,909801	0,040031	1	0	0	0
17	17,07	290,19	123,42	187,6296	2,605933	0,906625	0,039892	1	0	0	0
18	17,07	307,26	130,68	192,5475	2,600084	0,903465	0,039752	1	0	0	0
19	17,07	324,33	137,94	197,4613	2,592716	0,900423	0,039619	1	0	0	0
20	17,07	341,4	145,2	202,3792	2,583966	0,897488	0,039489	1	0	0	0

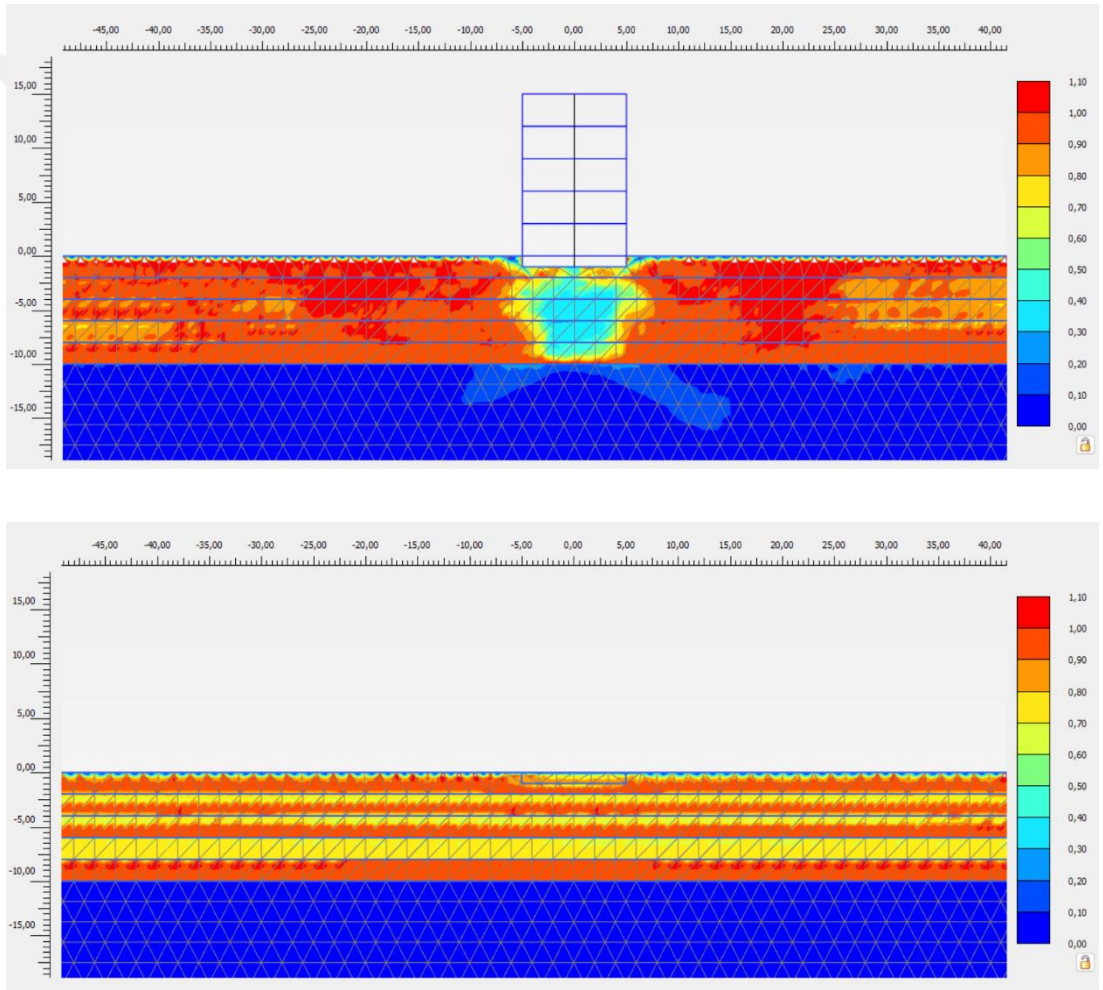
Tablo 7.12. 10-0 model üstünde binanın yer alması durumunda LPI-IL-LS değerlerinin hesabı.

Modelin 10-0 Binalı Olması Halinde LPI-IL-LS											
z (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Normal G. (kN/m ²)	Efektif G. (kN/m ²)	Binalı E.G. (kN/m ²)	CSR _{Yapı}	K_{α}	CRR	FS	LPI	IL	LS
1	19	19	9,19	113,1442	2,090257	0,983413	0,04327	1	0	0	0
2	19	38	18,38	122,043	2,188452	0,972065	0,042771	1	0	0	0
3	19	57	27,57	130,3969	2,260204	0,962378	0,042345	1	0	0	0
4	19	76	36,76	138,3971	2,313816	0,953879	0,041971	1	0	0	0
5	19	95	45,95	145,7359	2,355307	0,946459	0,041644	1	0	0	0
6	19	114	55,14	151,3275	2,390887	0,940346	0,041375	1	0	0	0
7	19	133	64,33	158,9397	2,413213	0,933908	0,041092	1	0	0	0
8	19	152	73,52	165,0026	2,432994	0,928471	0,040853	1	0	0	0
9	19	171	82,71	170,8479	2,447992	0,923441	0,040631	1	0	0	0
10	19	190	91,9	177,0053	2,457788	0,918605	0,040419	1	0	0	0
11	17,07	187,77	79,86	161,6331	2,583931	0,927452	0,040808	1	0	0	0
12	17,07	204,84	87,12	165,6608	2,59574	0,923694	0,040643	1	0	0	0
13	17,07	221,91	94,38	169,676	2,604195	0,920103	0,040485	1	0	0	0
14	17,07	238,98	101,64	173,9533	2,608848	0,916584	0,04033	1	0	0	0
15	17,07	256,05	108,9	178,476	2,610152	0,913139	0,040178	1	0	0	0
16	17,07	273,12	116,16	183,1152	2,608851	0,909801	0,040031	1	0	0	0
17	17,07	290,19	123,42	187,6296	2,605933	0,906625	0,039892	1	0	0	0
18	17,07	307,26	130,68	192,5475	2,600084	0,903465	0,039752	1	0	0	0
19	17,07	324,33	137,94	197,4613	2,592716	0,900423	0,039619	1	0	0	0
20	17,07	341,4	145,2	202,3792	2,583966	0,897488	0,039489	1	0	0	0

8. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1. r_u değerinin değişimi

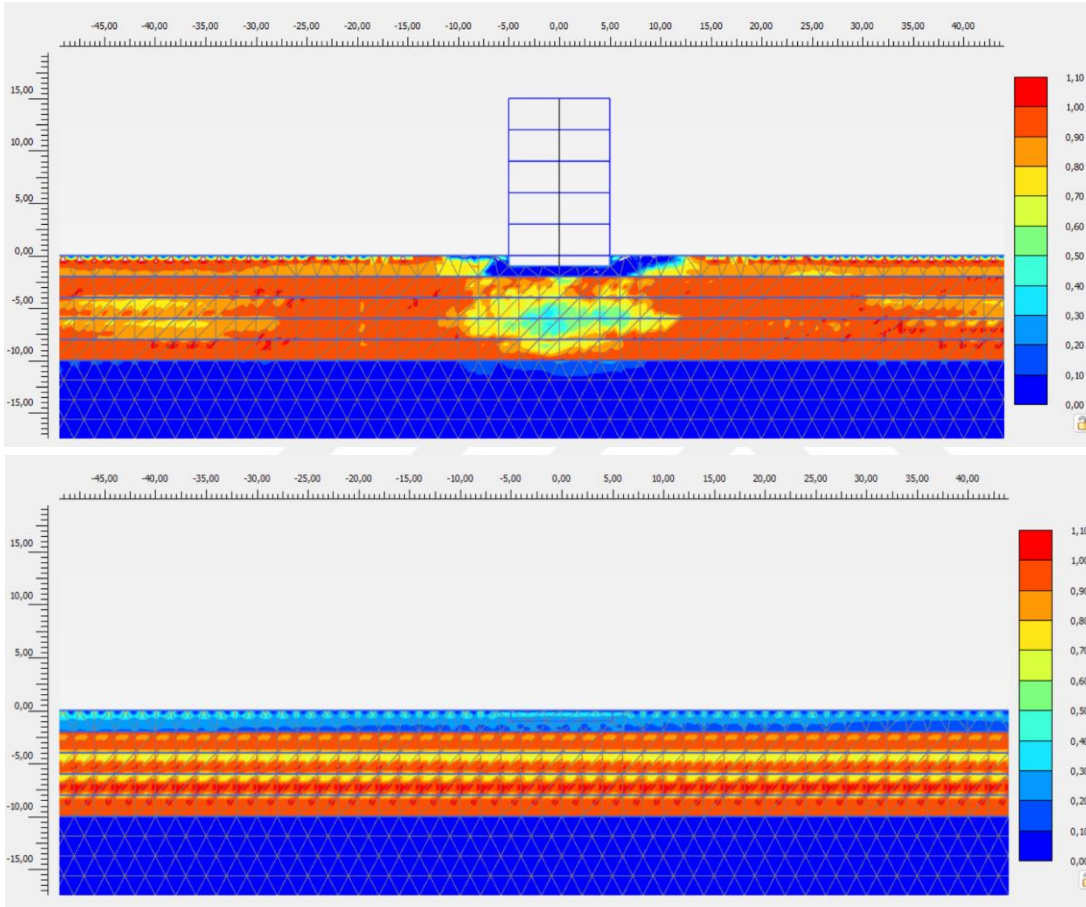
0-10 modeli için Şekil 8.1.'de görüldüğü üzere artık boşluk suyu basıncının düşey efektif gerilmeye oranı (r_u) 0,70 değerini aştığından sıvılaştığı sonucuna varılmaktadır. Binanın yer aldığı modelde özellikle bina altında efektif gerilme artışından kaynaklı olarak sıvılaşmanın gözlemlenmediği hususu değerlendirilmektedir.



Şekil 8.1. 0-10 nolu modelde r_u değeri

2-8 modeli için Şekil 8.2.'de görüldüğü üzere r_u 0,70 değerini aşmadığından ilk 2 m'lik sıkı kum tabakasında sıvılaşmanın olmadığı anlaşılmaktadır. 2 m'lik sıkı kum tabakasının altında yer alan gevşek kum tabakasında ise 0-10 modeline göre daha yüksek boşluk suyu basıncı olduğu görülmektedir.

Şekil 8.2’de 2 m’lik sıkı kum açısından özellikle yapı olmadığı durumda r_u değerinin 0’a yakın olduğu ve sıvılaşmanın gerçekleşmediği ancak yapı olduğu durumda yapı çevresindeki 2 m’lik sıkı kum tabakası için r_u değerinin 0,7 değerini aştığı görülmektedir. Bu husus sıkı kumda meydana gelen deprem anında ve yapıdan kaynaklı kabarma davranışının modellendiği, hacimsel değişimi dikkate alarak boşluk suyu basıncının hesap edilmesinden kaynaklı artık boşluk suyu basıncı ürettiği şeklinde değerlendirilmektedir.

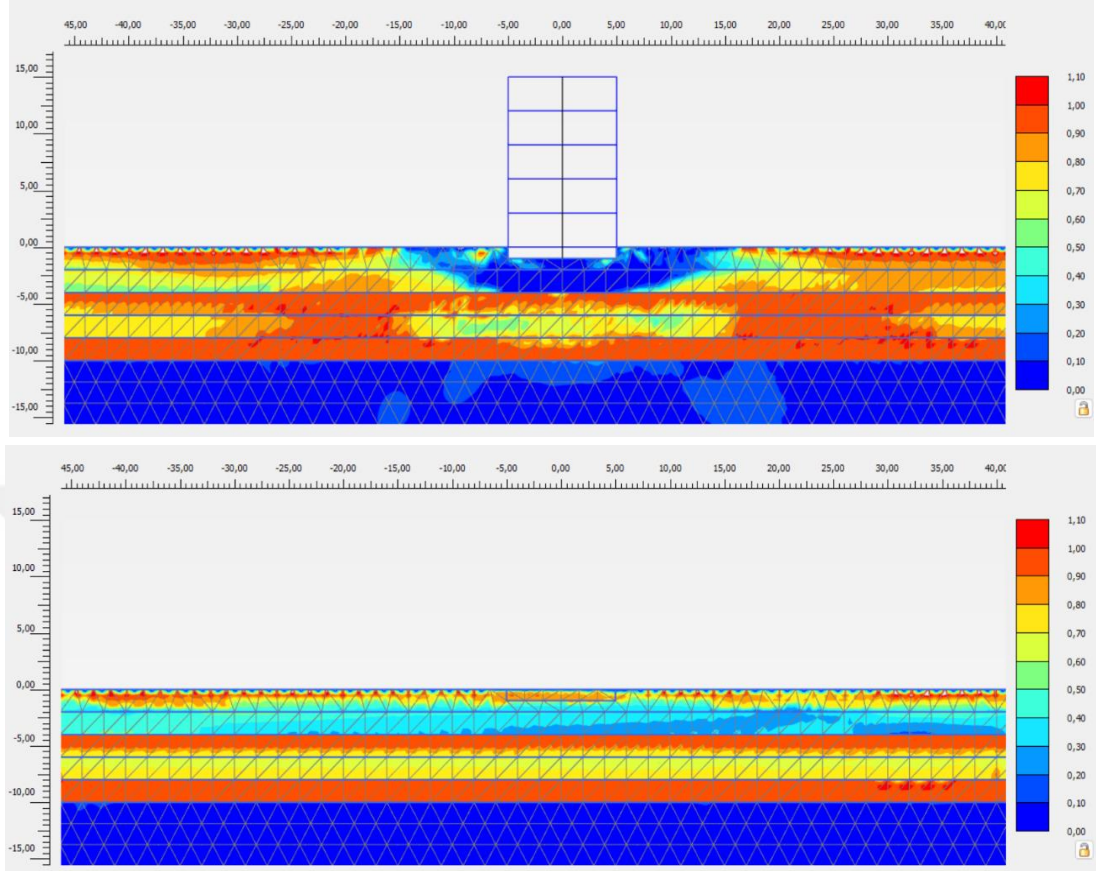


Şekil 8.2. 2-8 nolu modelde r_u değeri.

4-6 modeli için Şekil 8.3.’de 4 m’lik sıkı kum tabakasının altında yer alan 6 m’lik gevşek kum tabakasının sıvılaşığı anlaşılmaktadır. Binanın yer aldığı modelde özellikle bina altında efektif gerilme artışından kaynaklı sıvılaşmanın gözlemlenmediği görülmektedir.

Şekil 8.3.’de ayrıca sıkı kum tabakasının özellikle üst kısmında yer alan ve yazılım tarafından hesaplanan artık boşluk suyu basıncının oluşması, sıvılaşan tabakanın sıvılaşmadan kaynaklı daha sıkı hale gelme eğiliminde davranış sergilemesi

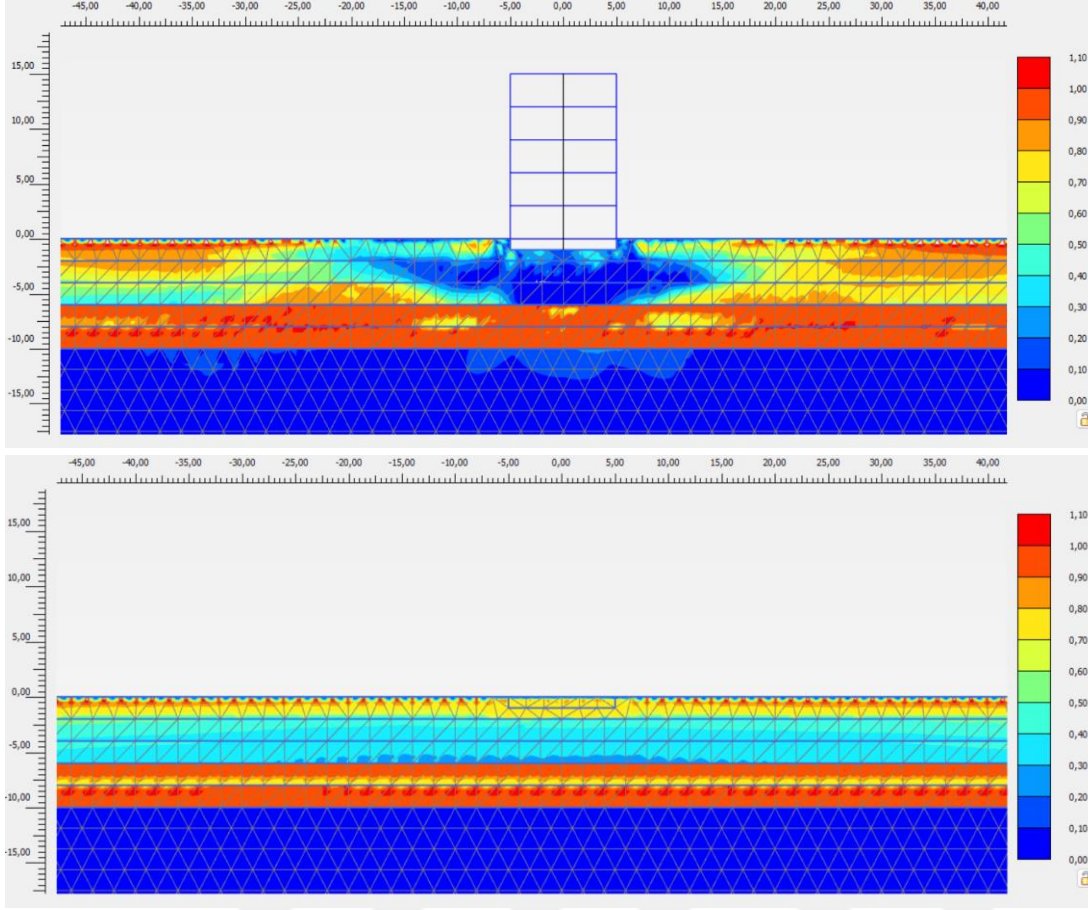
neticesinde tabaka üzerinde meydana gelen hacimsel değişimden kaynaklı olduğu şeklinde değerlendirilmektedir.



Şekil 8.3. 4-6 nolu modelde r_u değeri.

6-4 modeli için Şekil 8.4.'de 6 m'lik sıkı kum tabakasının altında yer alan 4 m'lik gevşek kum tabakasının sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Binanın yer aldığı modelde özellikle bina altında efektif gerilme artışından kaynaklı sıvılaşmanın gözlemlenmediği hususu değerlendirilmekle beraber bina çevresinde yer alan 6 m'lik sıkı kum tabakasında r_u değerinin sıfıra yakın olduğu ve sıvılaşmadığı görülmektedir.

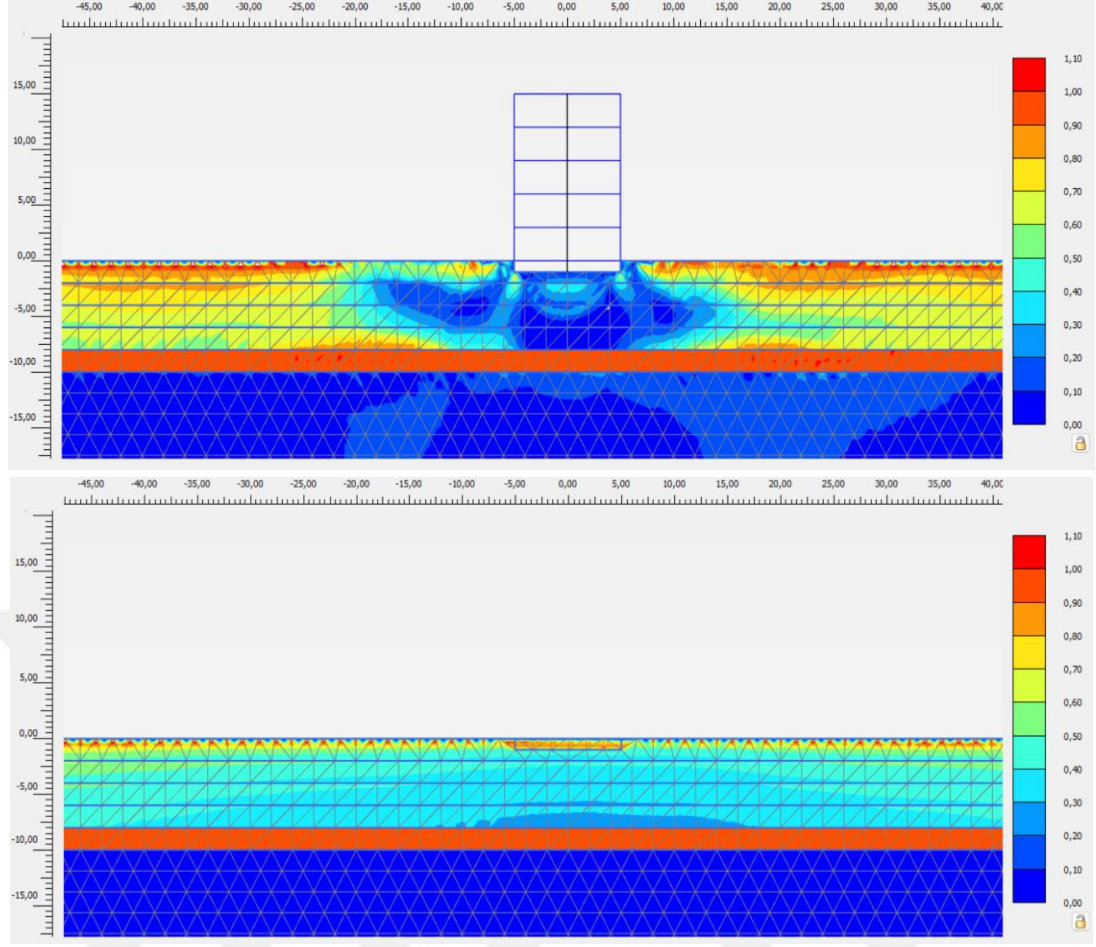
Şekil 8.4.'de ayrıca yapısız durumda sıkı kum tabakasının üst bölümünde yer alan bölgede artık boşluk suyu basıncının oluşması, alttaki sıvılaştıran tabakanın sıvılaşmadan kaynaklı olarak daha sıkı hale gelme eğiliminde davranış sergilemesi neticesinde tabaka üzerinde meydana gelen hacimsel değişimden kaynaklı olabileceği gibi sönüm parametrelerinin belirlenmesi üzerine daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 8.4. 6-4 nolu modelde r_u değeri.

8-2 modeli için Şekil 8.5.'de 8 m'lik sıkı kum tabakasının altında yer alan 2 m'lik gevşek kum tabakasının sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Binanın yer aldığı modelde özellikle bina çevresinde yer alan 8 m'lik sıkı kum tabakasında r_u değeri 0 değerine yakın olduğu ve sıvılaşmadığı görülmektedir.

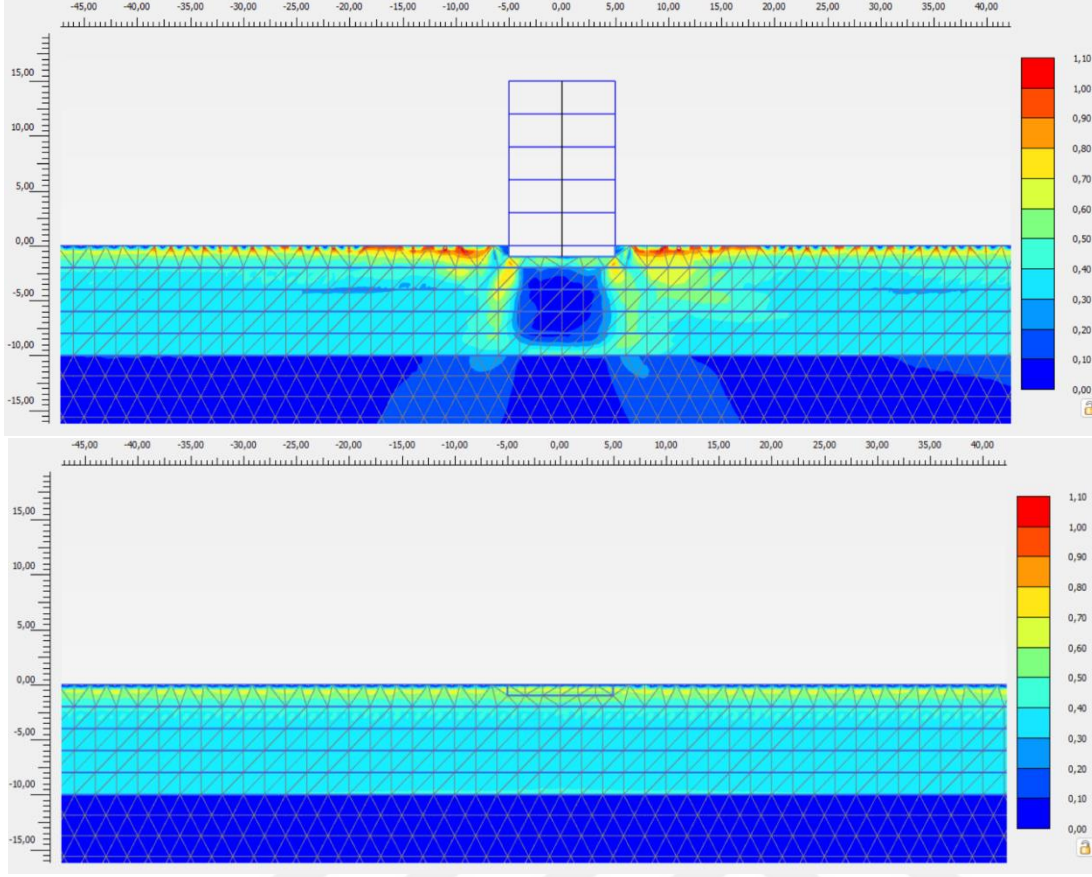
Şekil 8.5.'de ayrıca yapısız durumda sıkı kum tabakasının üst bölümünde yer alan bölgede artık boşluk suyu basıncının oluşması, alttaki sıvılaştıran tabakanın sıvılaşmadan kaynaklı olarak daha sıkı hale gelme eğiliminde davranış sergilemesi neticesinde tabaka üzerinde meydana gelen hacimsel değişimden kaynaklı olabileceği hususu değerlendirilmekte ve sıvılaştıran tabakanın sıvılaşma şiddeti doğrultusunda mesafe ve şiddetine bağlı olarak üst tabakayı daha fazla hacimsel değişime maruz bıraktığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8.5. 8-2 nolu modelde r_u değeri.

10-0 modeli için Şekil 8.6.'de görüldüğü üzere artık boşluk suyu basıncının düşey efektif gerilemeye oranı (r_u) 0,70 değerini aşmadığından sıvılaşmanın meydana gelmediği görülmektedir.

Şekil 8.6.'de ayrıca yapısız durumda sıkı kum tabakasının üst bölümünde yer alan bölgede artık boşluk suyu basıncının oluşması, sıkı kum durumunda olan tabakanın deprem etkisi ile hacim artmasından kaynaklı olarak oluştuğu şeklinde değerlendirilmektedir.

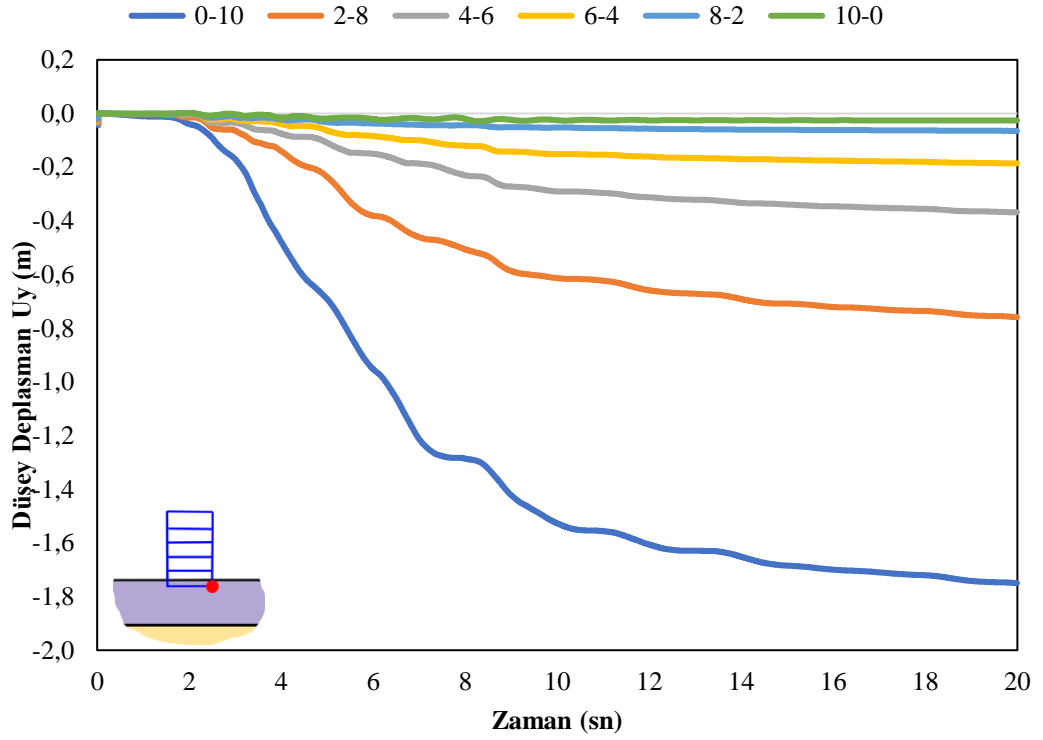


Şekil 8.6. 10-0 nolu modelde r_u değeri.

Ayrıca 10-0 modeli ve diğer modellerde artık boşluk suyu basıncının oluşumu hacimsel değişime bağlı olduğu, bununda kayma gerilmelerinden kaynaklı olduğu, kayma gerilmelerinde ilgili tabaka üzerinde bulunan ivme değerlerine bağlı olarak değerlendirildiğinde 2-8 modelde sıkı kum tabakası yüzeyinde herhangi bir artık boşluk suyu basıncının oluşmadığı, sıvılaştıran tabakada ivme değerlerinin aşırı derecede sönümlenmesinden kaynaklandığı şeklinde görülmektedir.

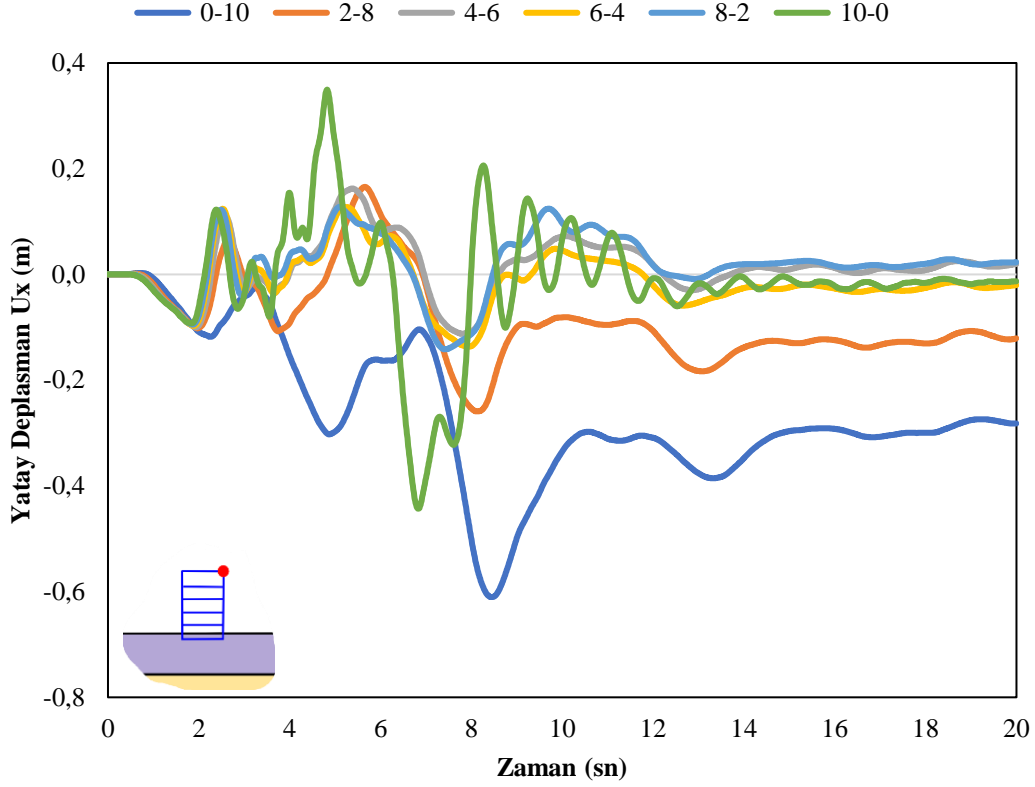
8.2. Bina Üzerindeki Noktaların Model Bazında Karşılaştırılması

Oluşturulan altı adet modelde binaya ait sağ alt köşesinde [(5,-1) koordinatlarında] seçilen nokta üzerinde dinamik zamana bağlı meydana gelen oturma şekil 8.7.'de gösterilmiştir. Şekil 8.7. incelendiğinde, sıkı kum kalınlığı arttıkça meydana gelen oturma miktarının azaldığı görülmektedir.



Şekil 8.7. Binanın sağ alt köşesinde modellere göre düşey deplasman değişimi.

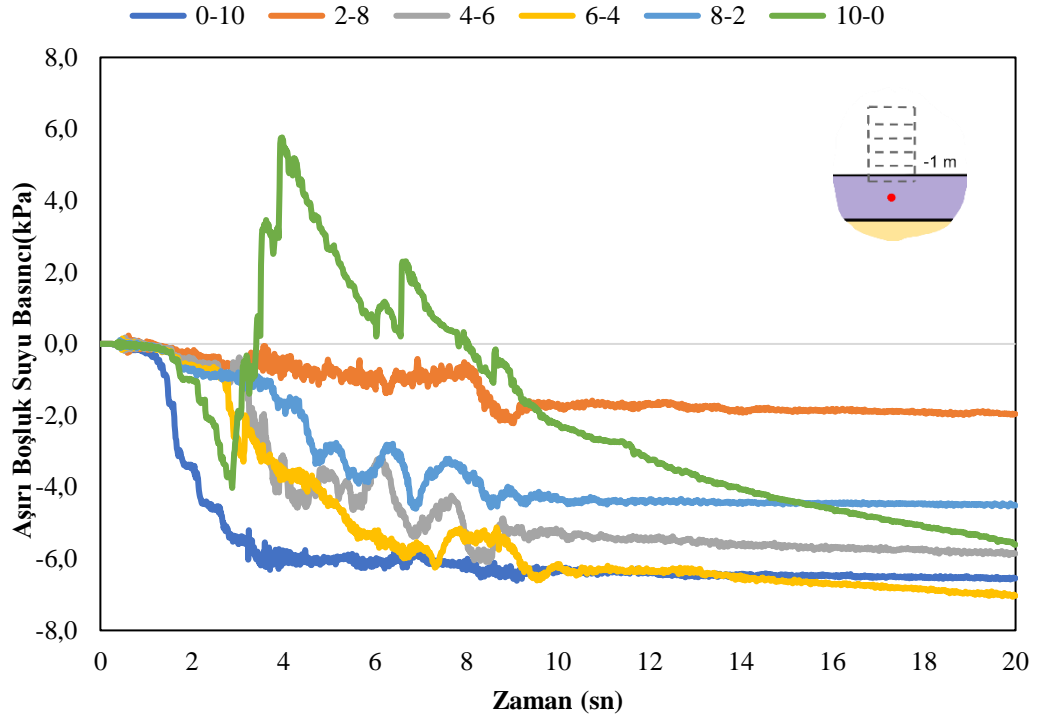
Oluşturulan altı adet modelde binaya ait sağ üst köşesinde [(5,15) koordinatlarında] seçilen nokta üzerinde dinamik zamana bağlı meydana gelen salınım yani yatayda yaptığı hareket Şekil 8.8.'de gösterilmiştir. Şekil 8.8. incelendiğinde, sıkı kum kalınlığı arttıkça meydana gelen meydana gelen salınım yani yatayda yaptığı hareketin başlangıç noktasına yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca sıvılaştıran tabakanın sönüm etkisi model bazında meydana gelen genlikler incelendiğinde de anlaşılmaktadır.



Şekil 8.8. Binaanın sağ üst köşe noktasında modellere göre yatay deplasman grafiği.

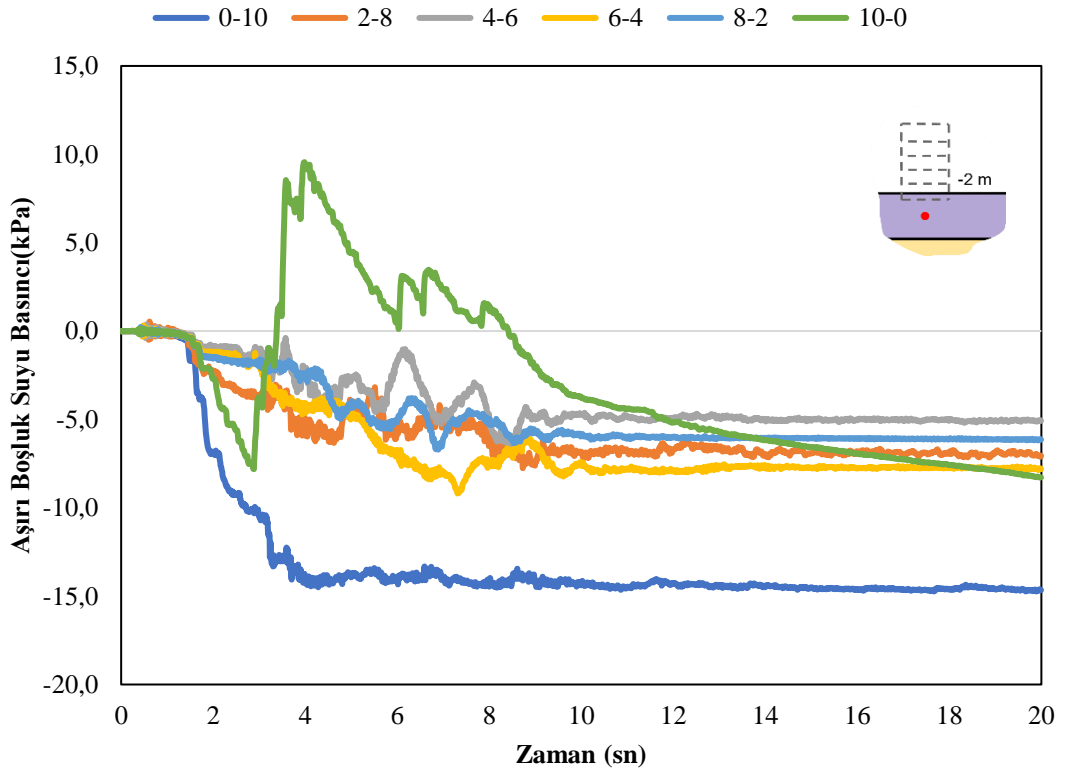
8.3. Binasız Duruma Göre Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri

İlk 10 m'lik derinlik boyunca tabaka üzerinde 1 m'lik değişimler ile boşluk suyu basınçlarının değişim grafikleri aşağıda sunulmuştur. -1 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.9'da gösterilmiştir. 0-10 modeli ile 6-4 modeli sonuçları incelendiğinde benzer davranışın sergilendiği, bu hususun sıvılaştıran tabakanın sıkı kumdaki etkisi neticesinde hacim değişiminden kaynaklandığından görülmektedir. Ayrıca 10-0 modelinde önce hacim kabarmasına bağlı olarak pozitif değer aldığı sonrasında büzülme davranışına bağlı olarak işaret değiştirdiği görülmektedir.



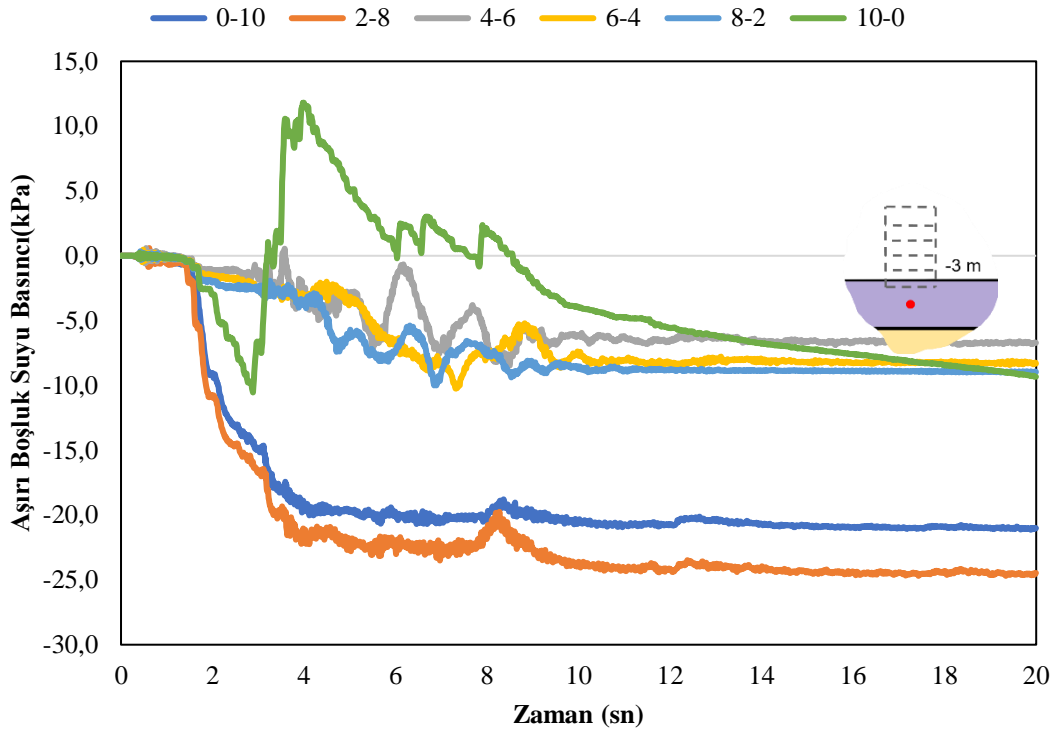
Şekil 8.9. -1 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-2 m’deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.10’da gösterilmiştir.

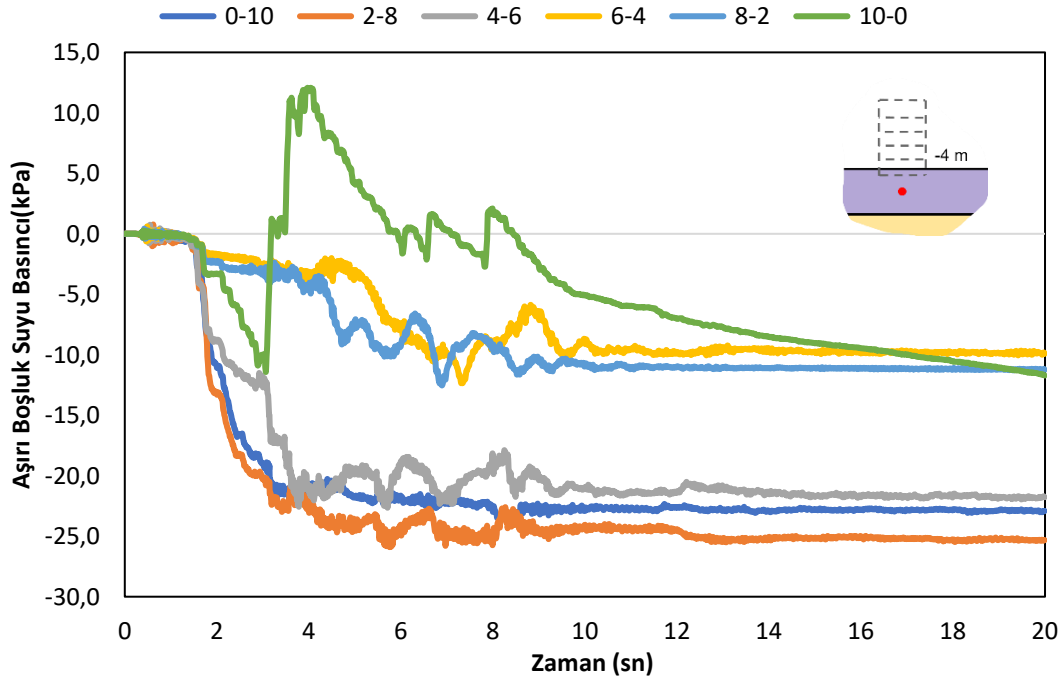


Şekil 8.10. -2 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-3 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.11'de, -4 m'deki noktadaki değişim Şekil 8.12'de gösterilmiştir.

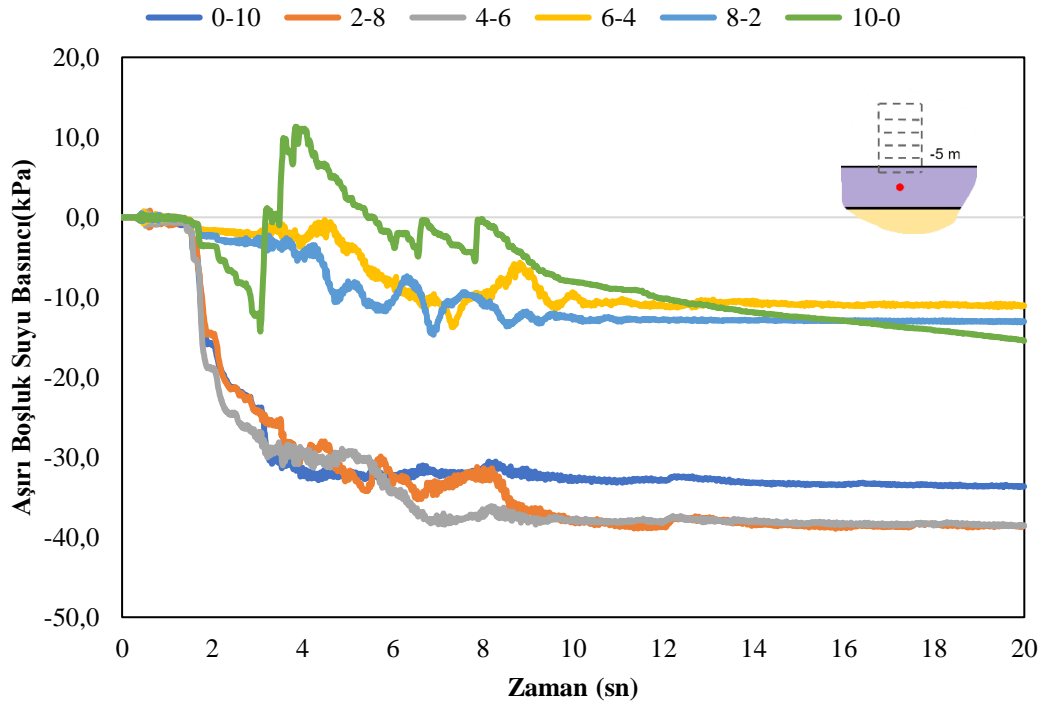


Şekil 8.11. -3 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.



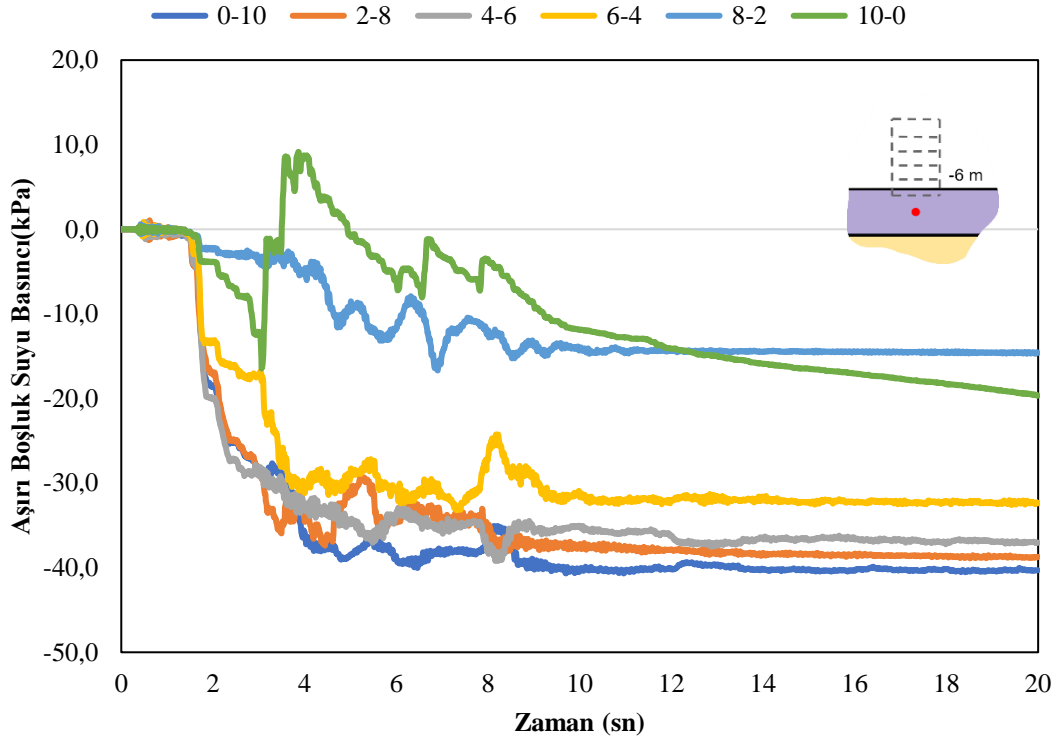
Şekil 8.12. -4 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

Seçilen noktanın sıvılaştan tabakaya denk gelmesi halinde çok daha fazla boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. -5 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.13'de gösterilmiştir. 0-10, 2-8 ve 4-6 modellerinde seçilen noktanın sıvılaştan tabakaya denk gelmesi durumunda sıvılaşmayan tabakaya göre 4 kat aşırı boşluk suyu basıncı ürettiği görülmektedir. Efektif gerilemenin %70'ini aşan artık boşluk suyu basıncı değerine ulaştığı, diğer modellerde sıkı kum tabakasının içerisinde kalmasından kaynaklı yakın değerler içerdiği, 10-0 modelinde ise hacim kabarmasına bağlı olarak pozitif değer aldığı sonrasında büzülme davranışına bağlı olarak işaret değiştirdiği görülmektedir.



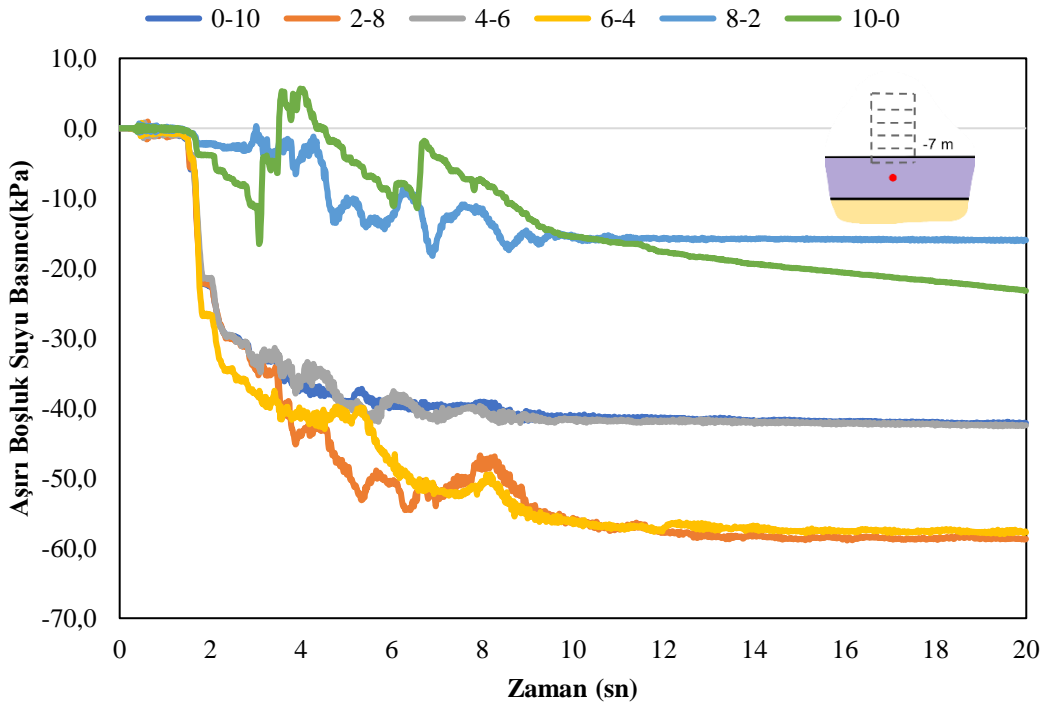
Şekil 8.13. -5 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-6 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.14'de gösterilmiştir. 0-10, 2-8, 4-6 ve 6-4 modelleri için efektif gerilemenin %70'ini aşan artık boşluk suyu basıncı değerine ulaştığı, diğer modellerde sıkı kum tabakasının içerisinde kalmasından kaynaklı yakın değerler içerdiği, 10-0 modelinde ise hacim kabarmasına bağlı olarak pozitif değer aldığı sonrasında büzülme davranışına bağlı olarak işaret değiştirdiği görülmektedir.



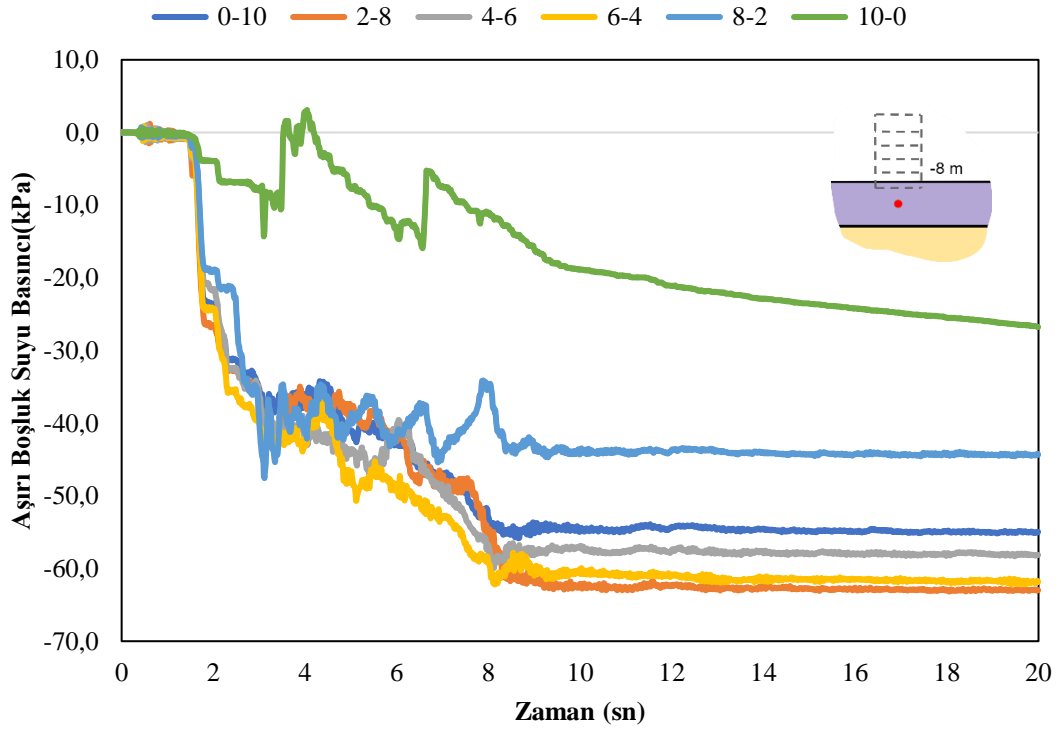
Şekil 8.14. -6 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-7 m’deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.15’de gösterilmiştir.



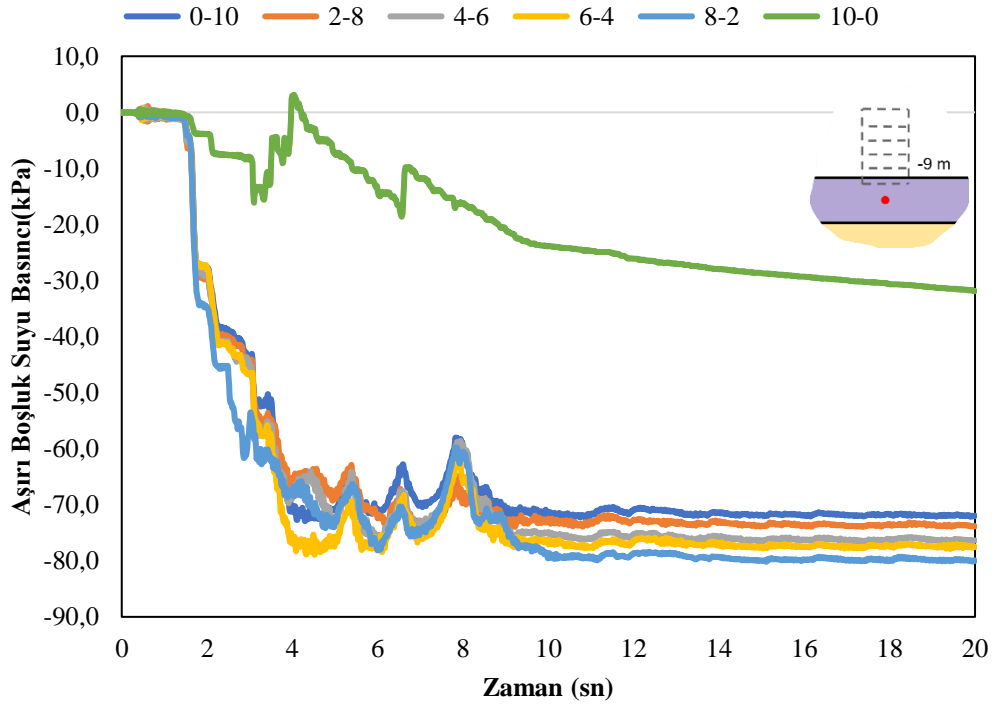
Şekil 8.15. -7 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-8 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.16'de gösterilmiştir.



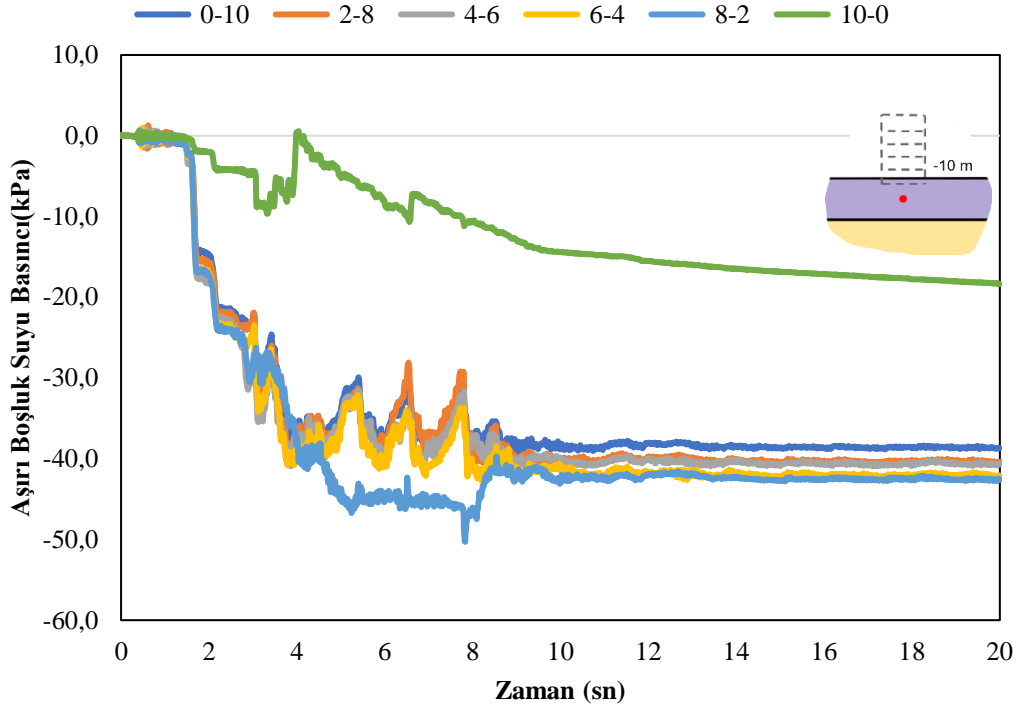
Şekil 8.16. -8 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-9 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.17'de gösterilmiştir.



Şekil 8.17. -9 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

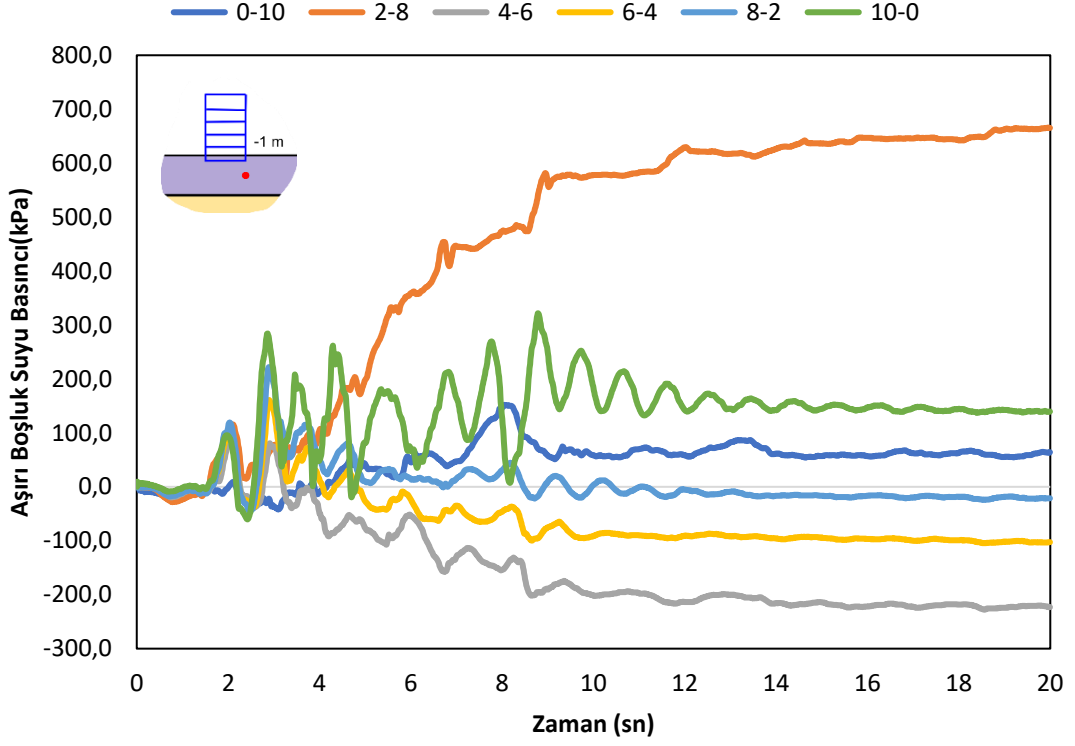
-10 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.18'de gösterilmiştir. -10 m'de hemen altında yer alan kil tabakasının varlığı nedeniyle efektif gerilmenin yaklaşık %50 sine denk gelen bir artık boşluk suyu basıncının meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.18. -10 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

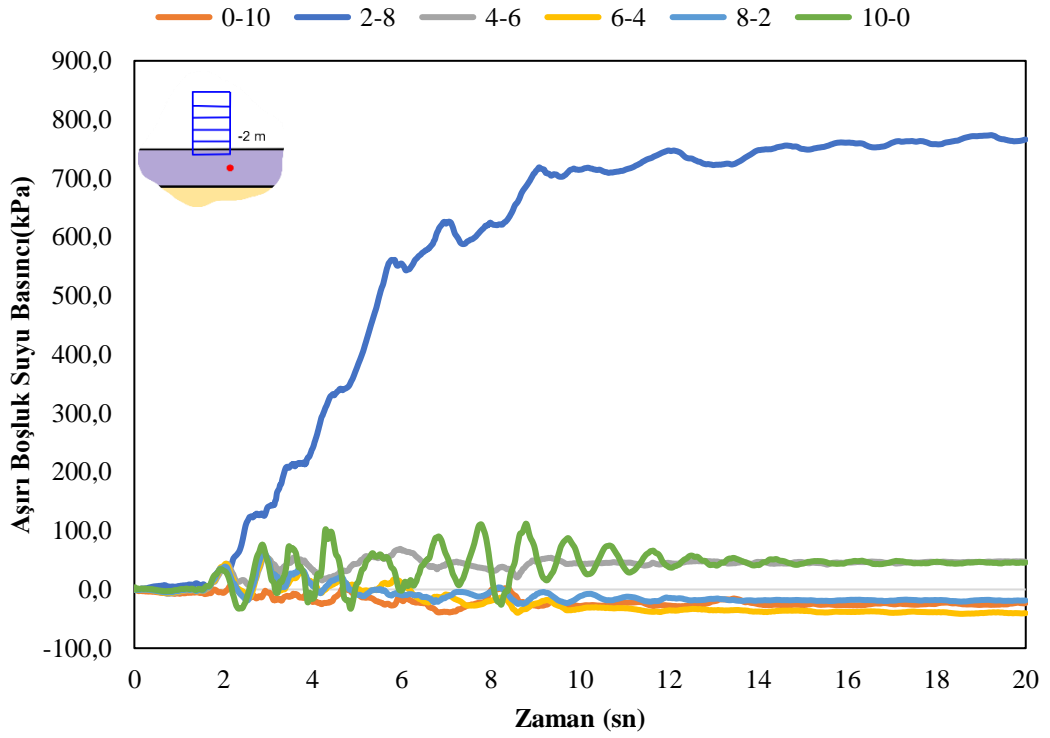
8.4. Binalı Durumda $x=5$ m'de Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri

-1 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.19'de gösterilmiştir. -1 m'de 2-8 modelinde özellikle sıkı kumdan kaynaklı hacimsel artışa dayalı olarak hem bina yükü hem de sıvılaştıran tabakanın meydana getirdiği oturmadan kaynaklı meydana gelen hacimsel kabarmadan kaynaklı efektif gerilmeye katkı sağlayacak şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca 10-0 modelinde sıvılaştırmadan kaynaklı ivme değerlerinde herhangi bir sönüm meydana gelememesinden kaynaklı genliği büyük davranışların sergilediği görülmektedir. 0-10 tabakasında binanın yer almasından dolayı gevşek kumun sıkı kum davranışına benzer harekette bulunduğu görülmektedir.



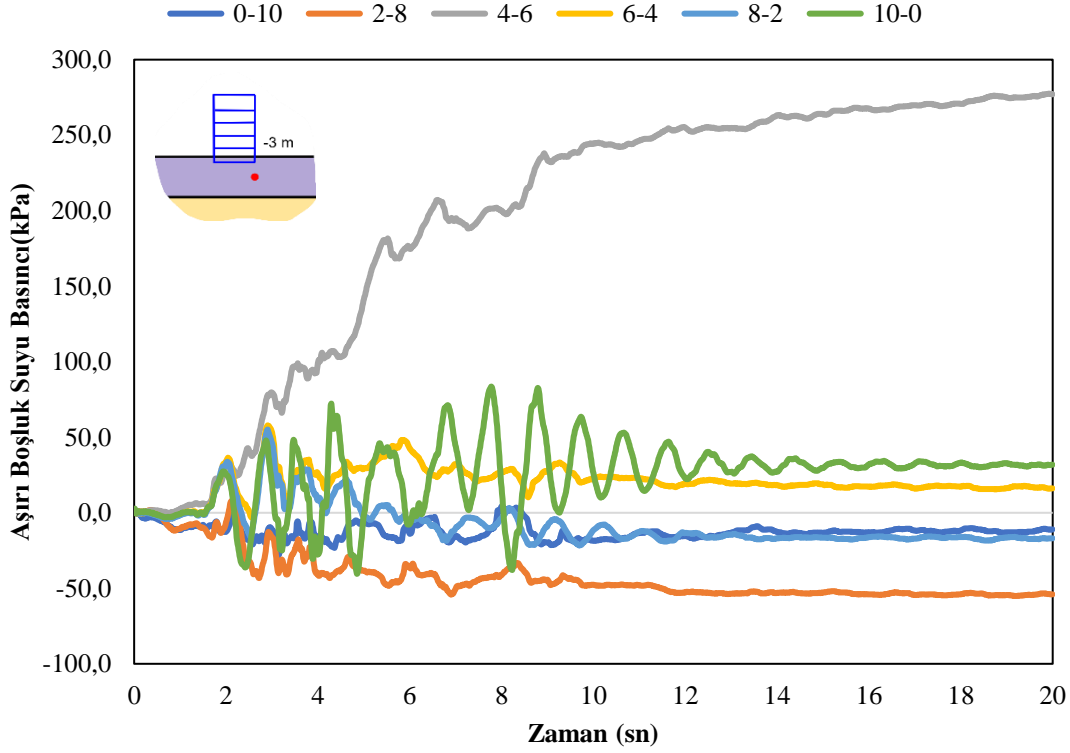
Şekil 8.19. -1 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-2 m’deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.20’de gösterilmiştir.



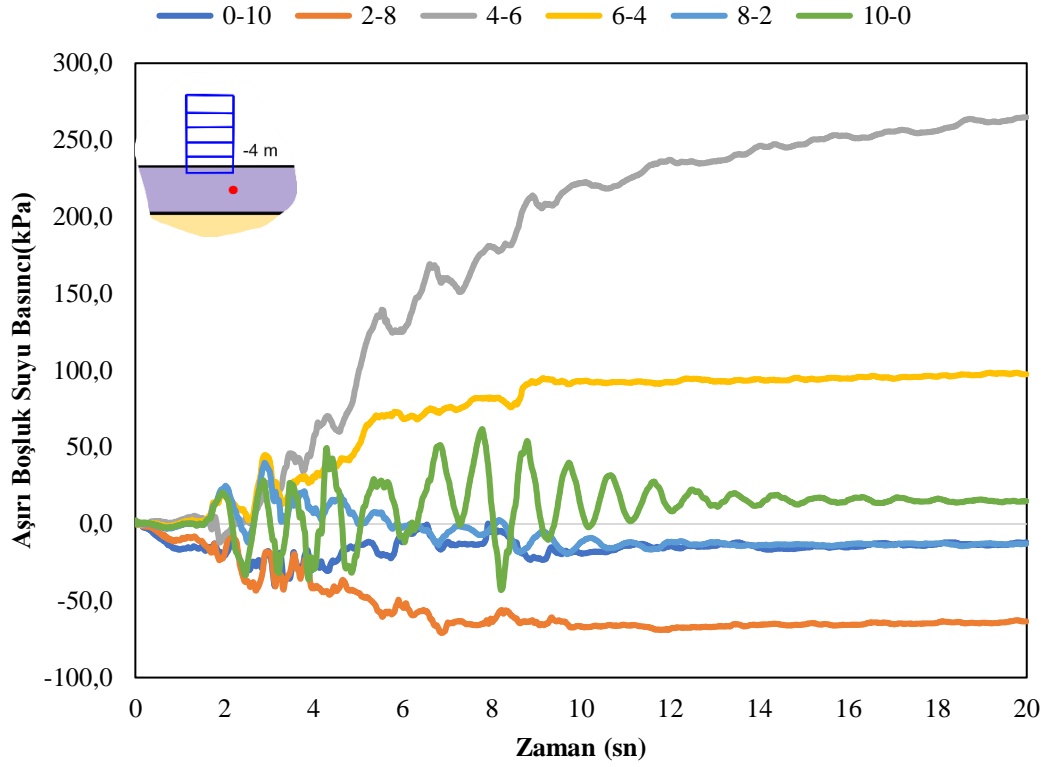
Şekil 8.20. -2 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-3 m'deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.21'de gösterilmiştir. -4 m'den sonra sıvılaştıran tabakanın başladığı 4-6 modelinde oluşan boşluk suyu basıncının yüksek değerler aldığı görülmektedir. Seçilen noktaların 1 m altında sıvılaştıran tabakanın yer alması durumunda benzer davranışın sergilendiği görülmektedir.



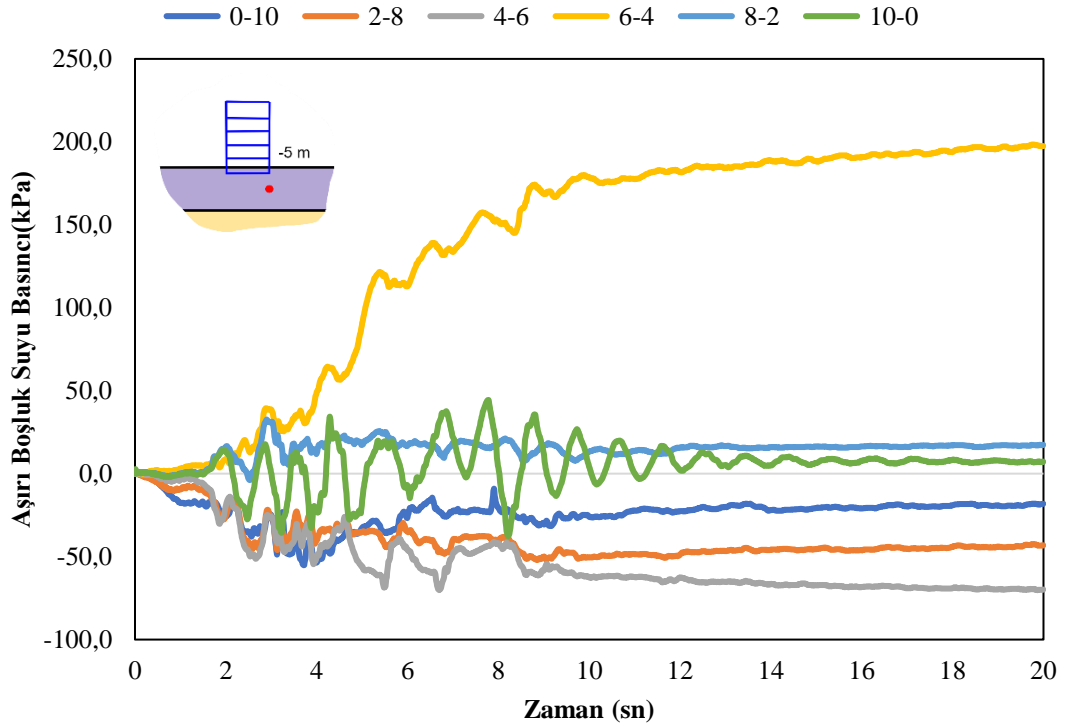
Şekil 8.21. -3 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri..

-4 m'deki noktada modellere bağlı değişim şekil 8.22'de gösterilmiştir. Seçilen noktanın modeller bağlı grafiği incelendiğinde, 4-6 modelinde yüksek boşluk suyu basıncının oluştuğu, müteakiben bu değeri 6-4 modelinin takip ettiği görülmektedir. UBC3D-PLM modeli drenajsız analiz aşamasında hacimsel deformasyona bağlı boşluk suyu basıncını hesap ettiğinden dinamik analiz aşamasında sıkı kum tabakasında özellikle binanın salınımdan kaynaklı etki ettiği köşe noktasında hacimsel artış eğilimi gösterdiği ve sönüm etkisinin değerlendirilemediği görülmektedir.



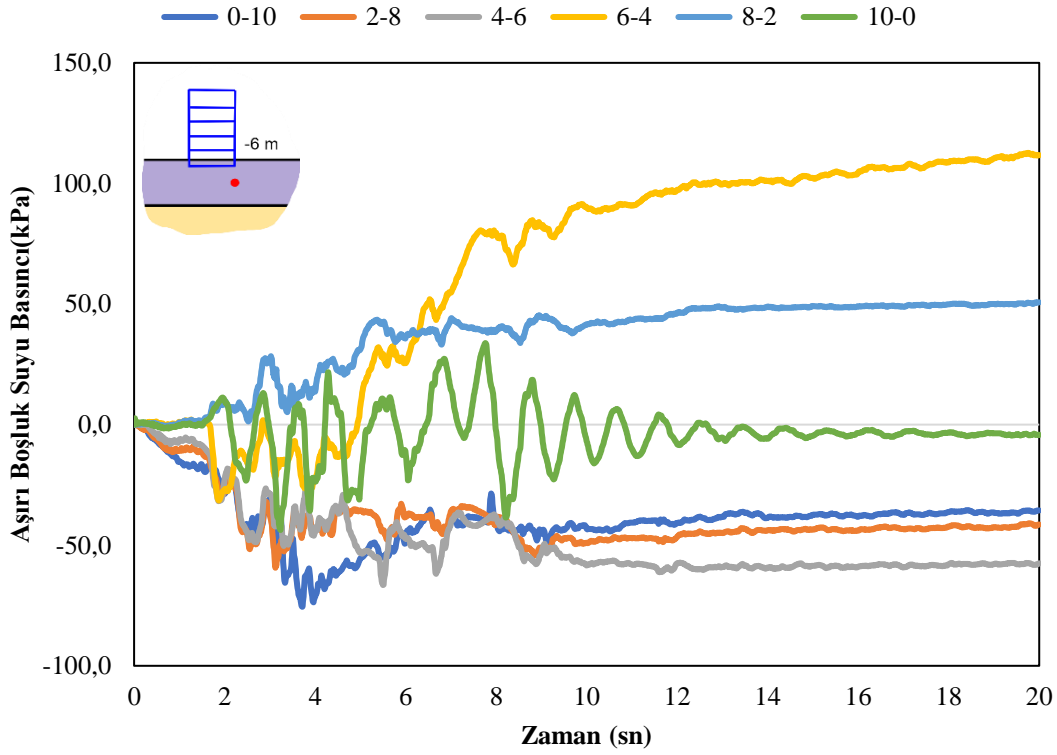
Şekil 8.22. -4 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-5 m’deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.23’de gösterilmiştir.

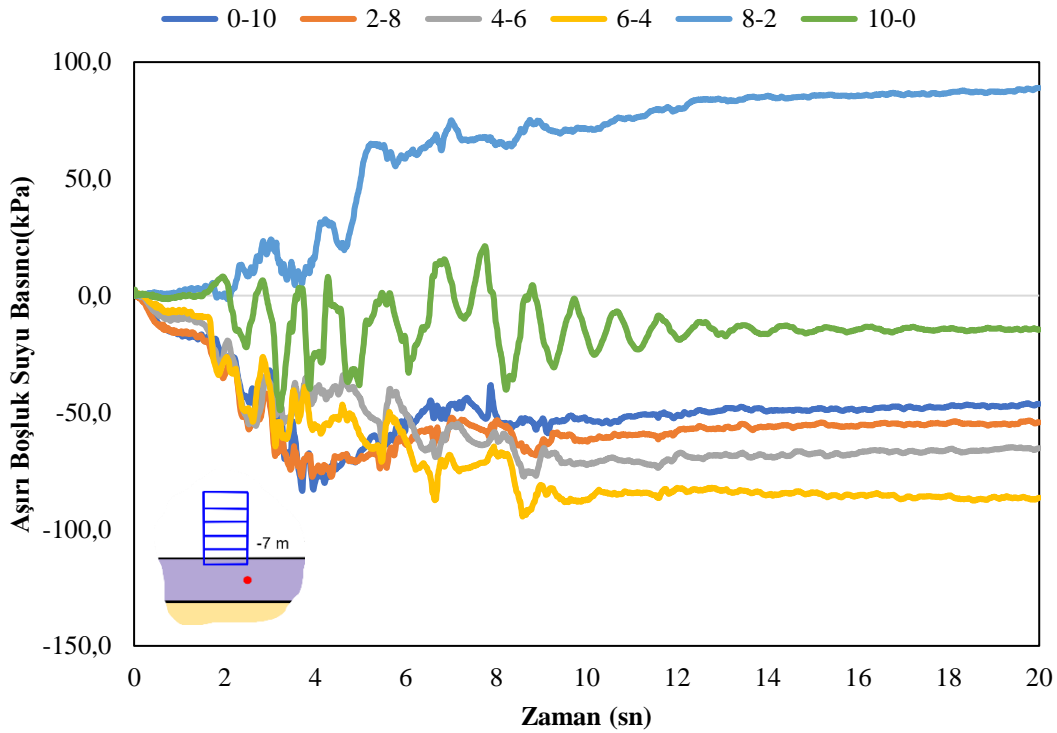


Şekil 8.23. -5 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-6 m ve -7 m noktalarındaki modellere bağılı değişim Şekil 8.24 ve gösterilmiştir.



Şekil 8.24. -6 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

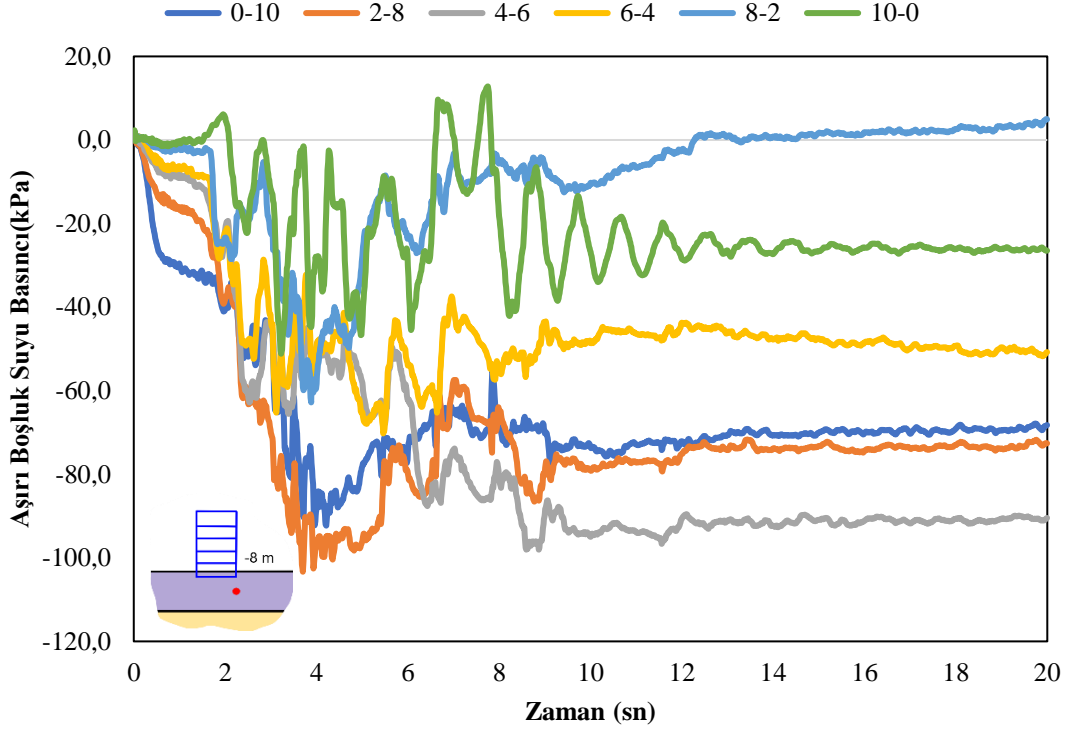


Şekil 8.25. -7 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-8 m'deki noktada modellere bağılı değişim Şekil 8.26'de gösterilmiştir.

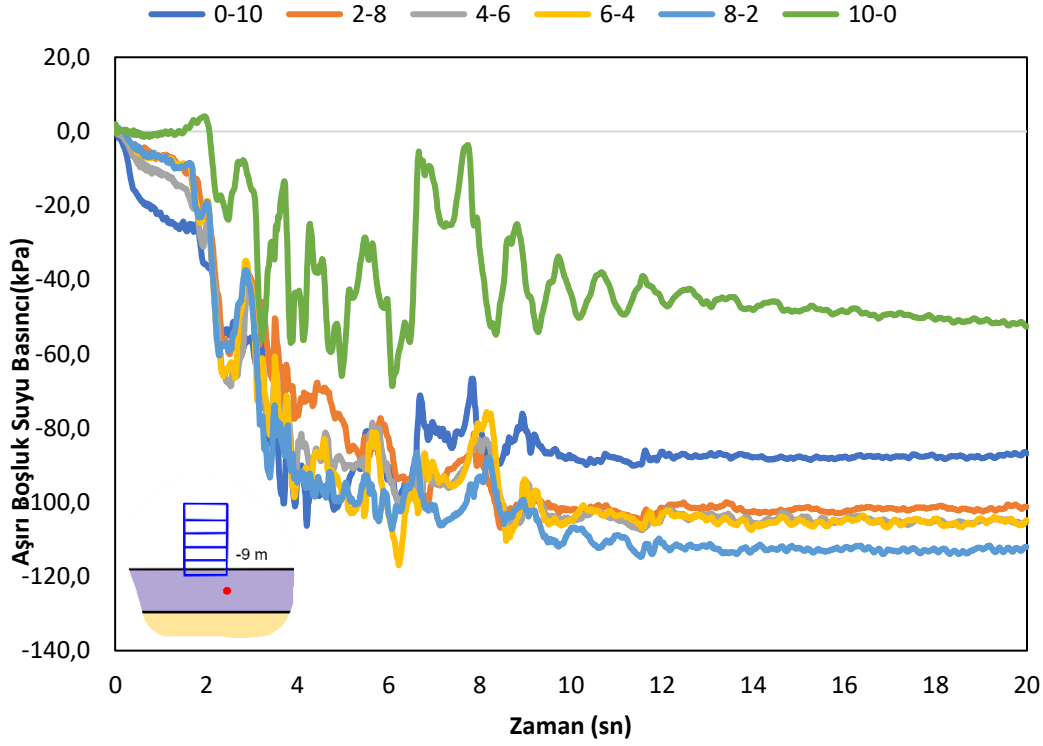
Zemin yüzeyinden itibaren tabaka üzerinde hacimsel kabarmanın azalmasından dolayı pozitif değerli yani mevcut efektif gerilmeye artı değer kazandıracak şekilde artık boşluk suyu basıncının oluşmadığı görülmektedir.

Derinlik artıkça özellikle sıkı kum tabakasında ulaşılan aşırı boşluk suyu basıncının değerinin azaldığı görülmektedir.



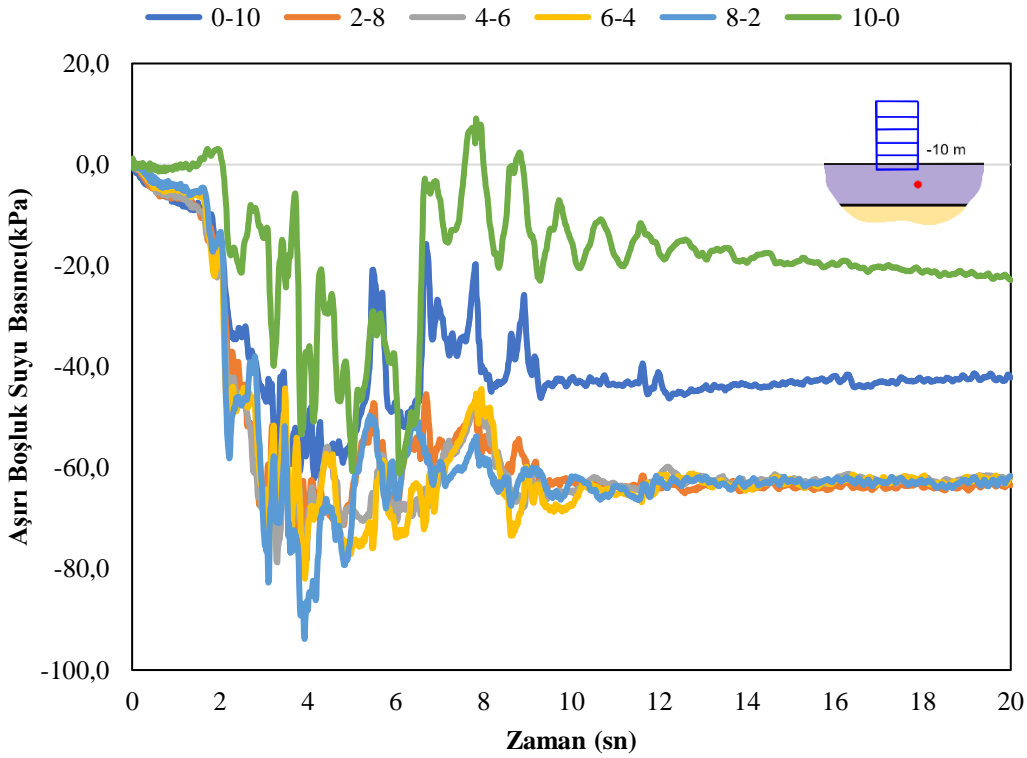
Şekil 8.26. -8 m'de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

-9 m'deki noktada modellere bağılı değişim Şekil 8.27'de gösterilmiştir.



Şekil 8.27. -9 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

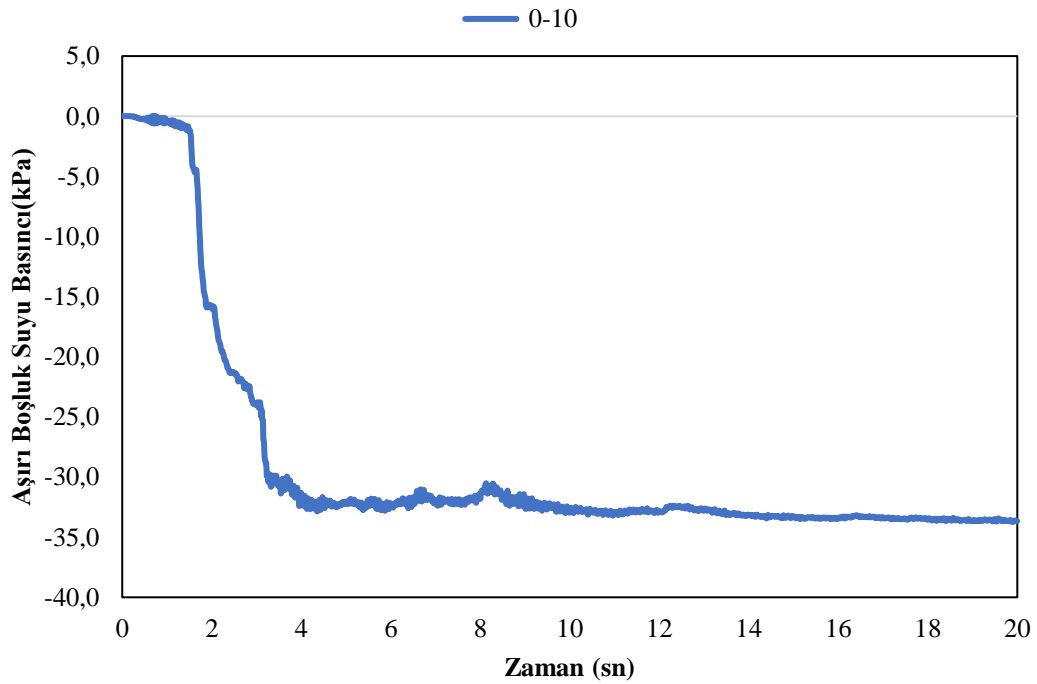
-10 m’deki noktada modellere bağlı değişim Şekil 8.28’de gösterilmiştir.



Şekil 8.28. -10 m’de aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri.

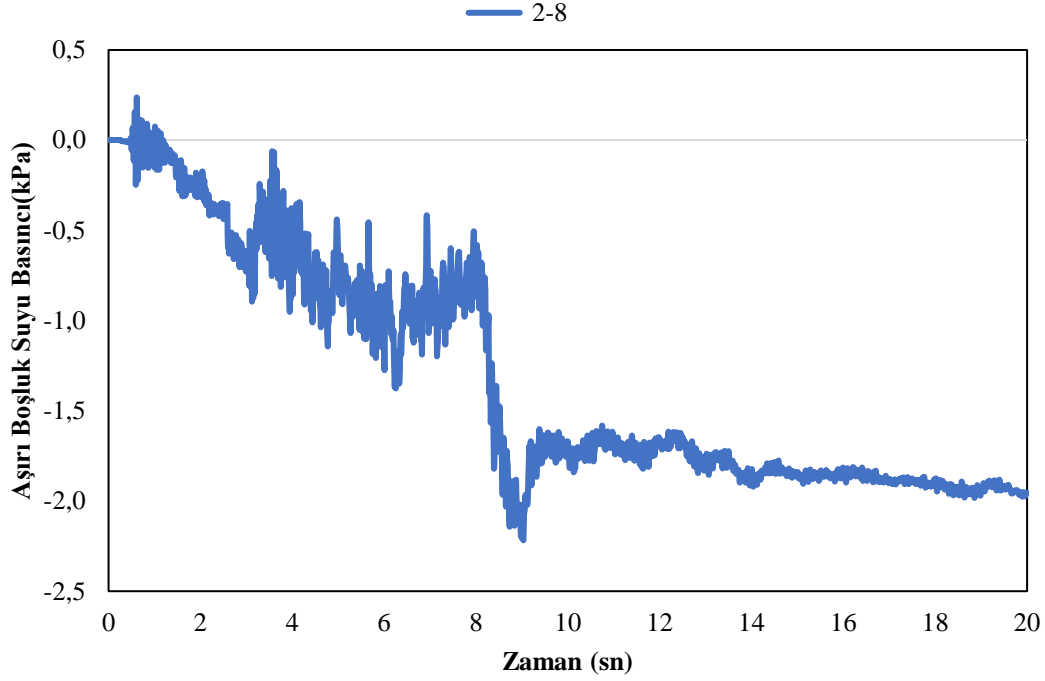
8.5. Tabakaların Orta Noktasındaki Boşluk Suyu Basıncı Değişimi

Kalınlığı 10 m SM4 gevşek kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.29'da gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 4'üncü saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. Aşırı boşluk suyu basıncının değerinin efektif gerilme değerine (40,95 kPa) oranı 0,7 değerinden büyük olmasından dolayı gevşek tabakada sıvılaşmanın gerçekleştiği kabul edilmektedir.



Şekil 8.29. 0-10 modeli için tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

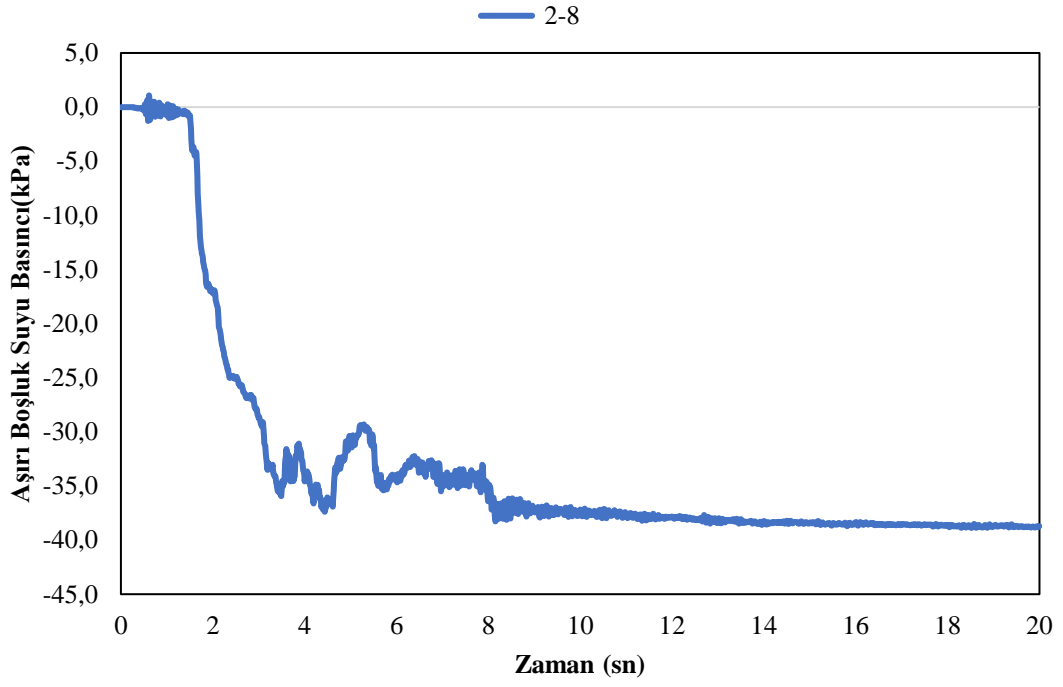
Tabaka kalınlığı 2 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 8 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM3 sıkı kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı değişimi Şekil 8.30'da verilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9'üncü saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. Aşırı boşluk suyu basıncının değerinin efektif gerilme değerine (9,19 kPa) oranı (r_u) 0,7 değerinden küçük olmasından dolayı sıkı tabakanın sıvılaşmadığı anlaşılmaktadır.



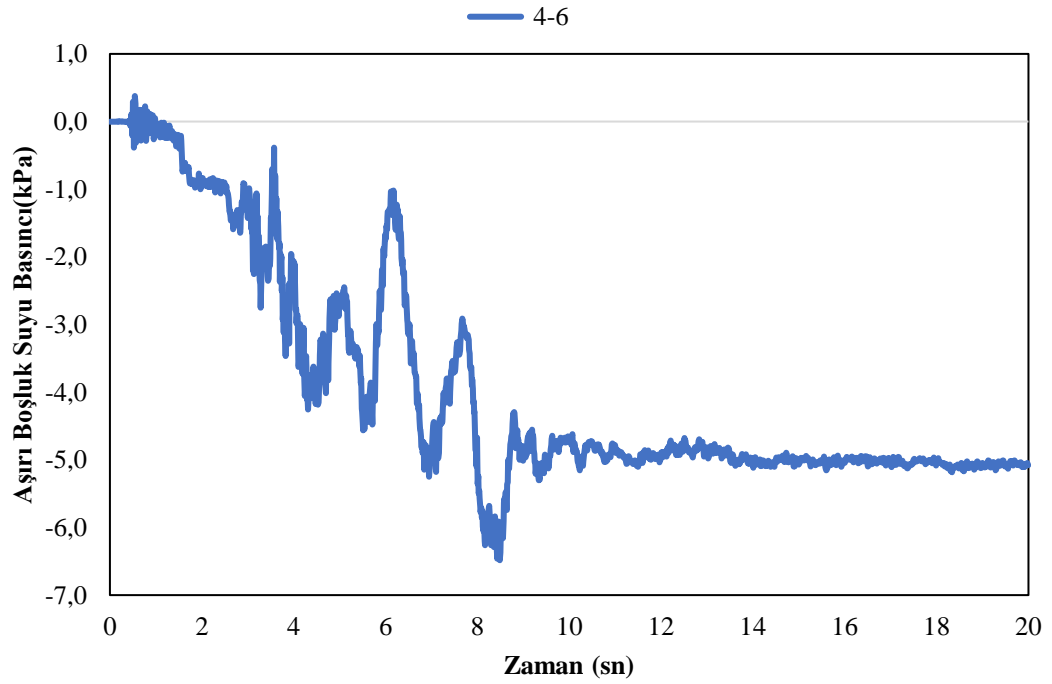
Şekil 8.30. 2-8 modeli sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

Tabaka kalınlığı 2 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 8 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM4 gevşek kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.31’de gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. Aşırı boşluk suyu basıncının değerinin efektif gerilme değerine (51,14 kPa) oranı (r_u) 0,7 değerinden büyük olmasından dolayı gevşek tabakanın sıvılaştığı anlaşılmaktadır.

Tabaka kalınlığı 4 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 6 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM3 sıkı kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.32’de sunulmuştur. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. r_u değeri 0,7’den küçük olduğundan sıkı tabakanın sıvılaşmadığı anlaşılmaktadır.

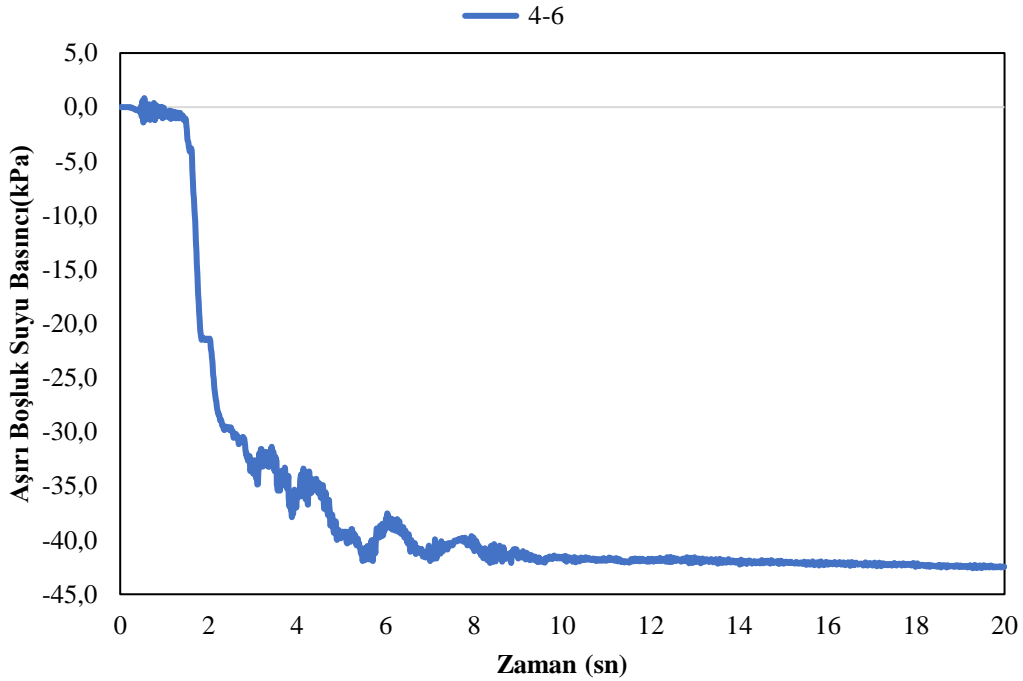


Şekil 8.31. 2-8 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.



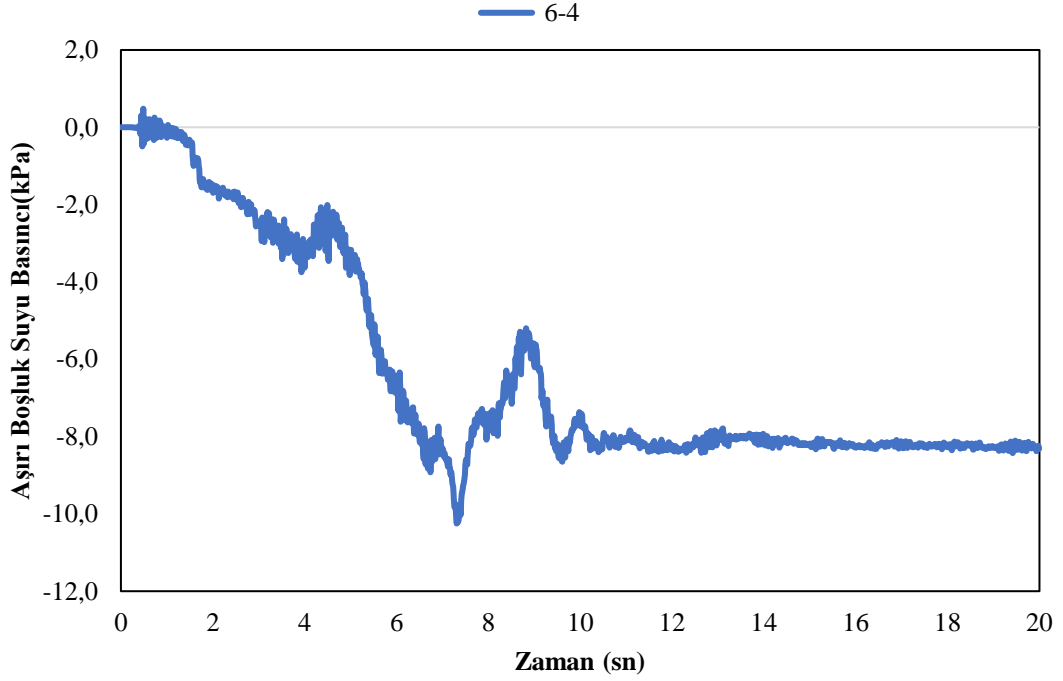
Şekil 8.32. 4-6 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

Tabaka kalınlığı 4 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 6 m kalınlığında SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM4 gevşek kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.33’de verilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. r_u değerinin 0,7’den büyük olmasından dolayı gevşek tabakanın sıvılaştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8.33. 4-6 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

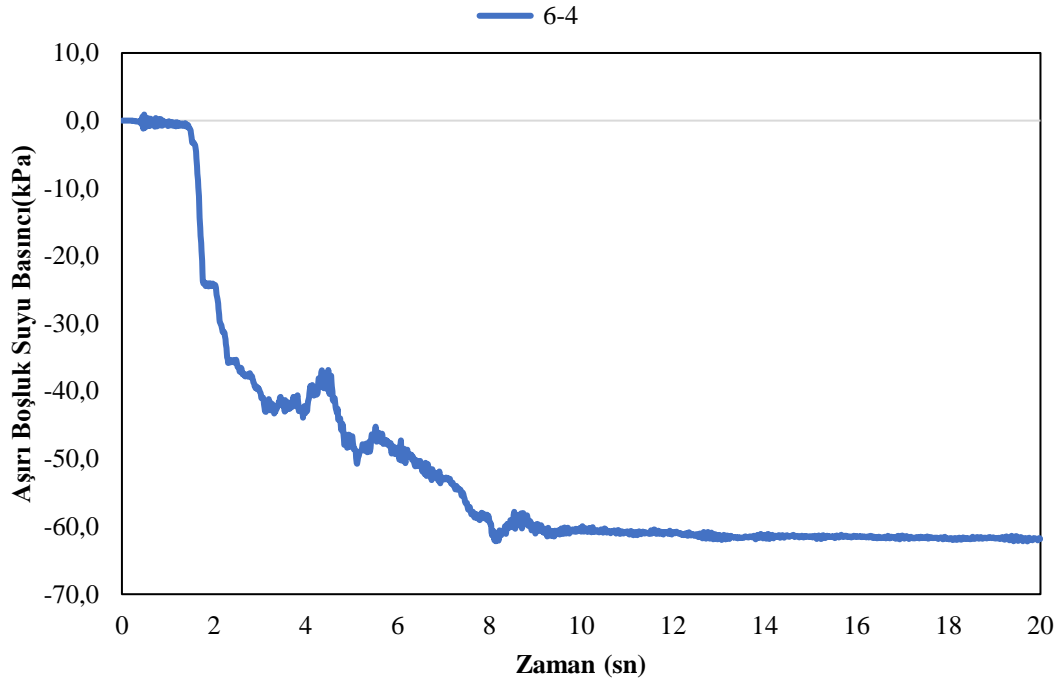
Tabaka kalınlığı 6 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 4 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM3 sıkı kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.34’de gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. r_u büyüklüğünün 0,7’den küçük olmasından dolayı sıkı tabakanın sıvılaşmadığı anlaşılmaktadır.



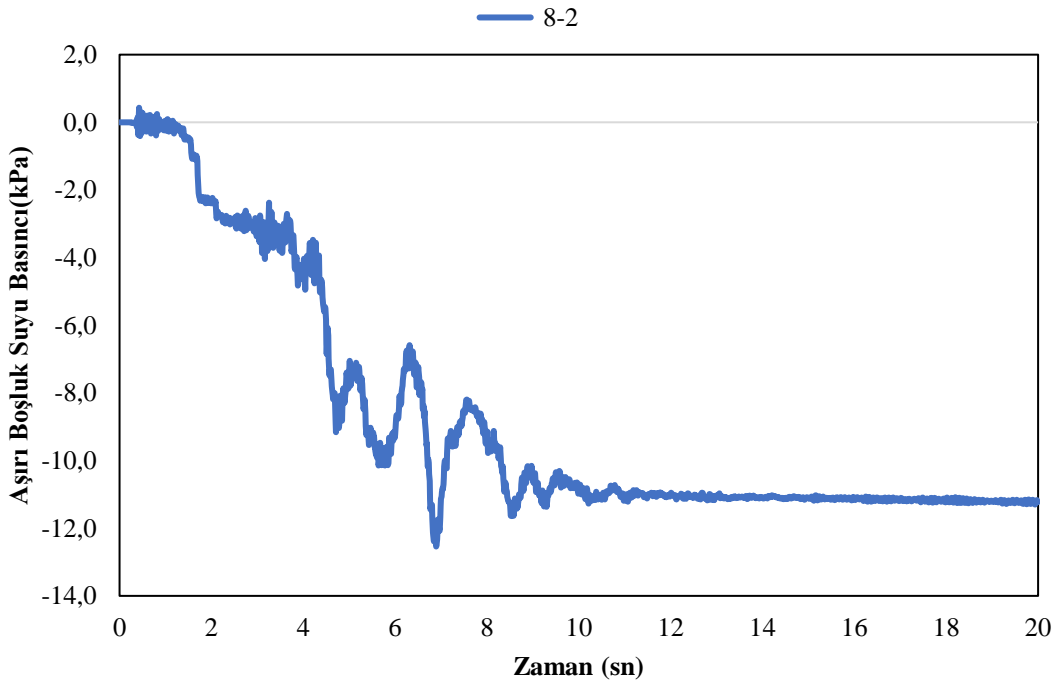
Şekil 8.34. 6-4 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

Tabaka kalınlığı 6 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 4 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM4 gevşek kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.35’de gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. r_u ’nun 0,7 değerinden büyük olmasından dolayı gevşek tabakanın sıvılaştığı anlaşılmaktadır.

Tabaka kalınlığı 8 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 2 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM3 sıkı kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.36’de gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. r_u değerinin 0,7 değerinden küçük olmasından dolayı sıkı tabakanın sıvılaşmadığı anlaşılmaktadır.

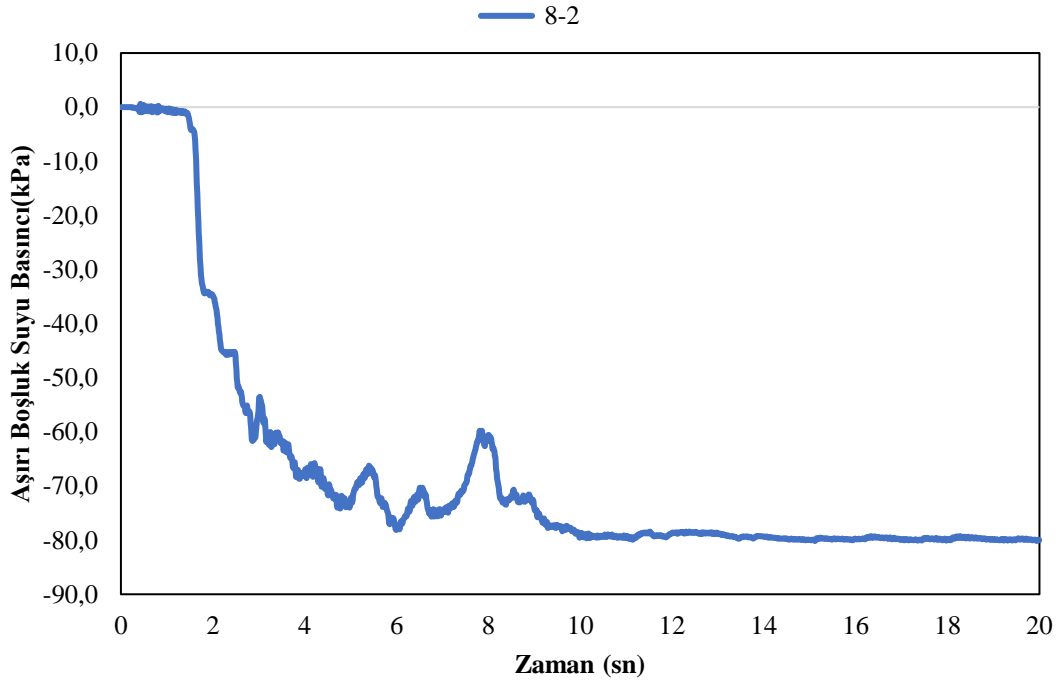


Şekil 8.35. 6-4 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi .



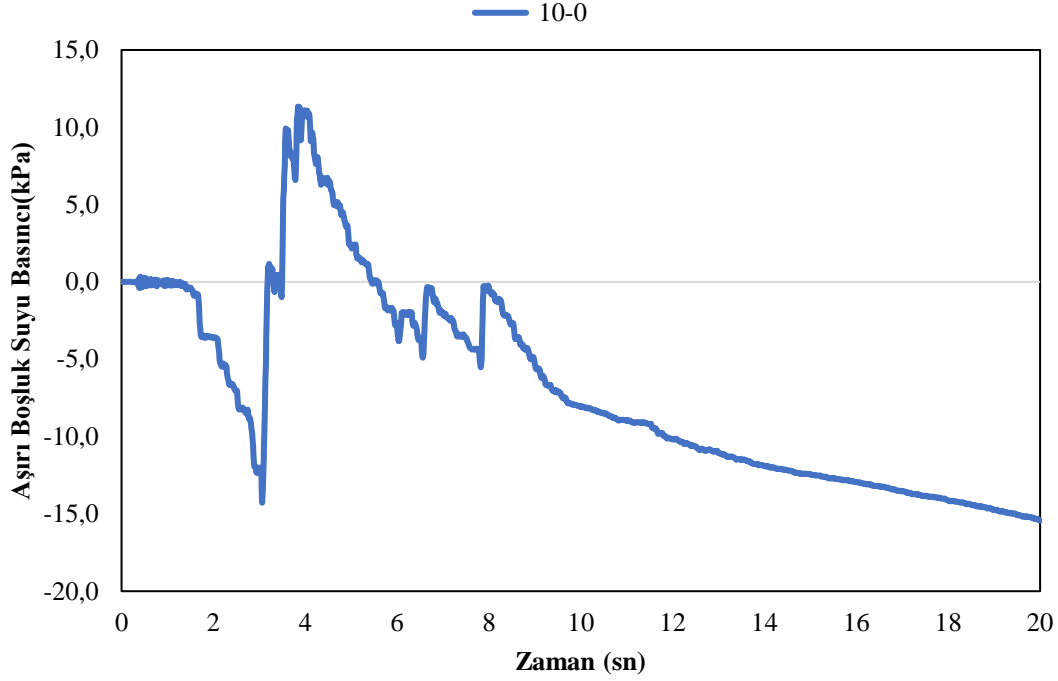
Şekil 8.36. 8-2 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

Tabaka kalınlığı 8 m olan SM3 sıkı kum tabakası altında yer alan 2 m kalınlığındaki SM4 gevşek kum tabakası ile oluşturulan modelde SM4 gevşek kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.37’de gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 9’uncu saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. r_u değerinin 0,7’den büyük olmasından dolayı gevşek tabakanın sıvılaştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8.37. 8-2 modeli için gevşek kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

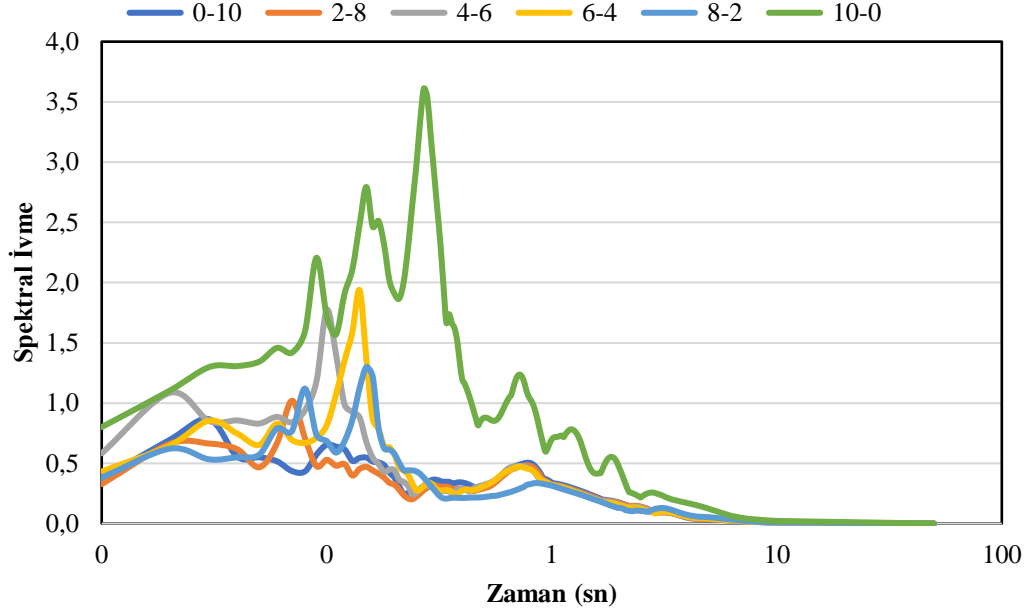
Kalınlığı 10 m SM3 sıkı kum tabakasının orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı grafiği Şekil 8.38’de gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimin deprem kaydının 4’üncü saniyesinden itibaren sabit olduğu görülmektedir. Boşluk suyu basıncının öncelikle efektif gerilmeye destek olacak şekilde artması sonrasında efektif gerilmeyi azaltacak şekilde işaret değiştirmesi, boşluk suyu basınç değerlerinin hacimsel deformasyondan kaynaklandığı ve sıkı kumların deprem anında öncelikle hacim kazanmasından dolayı oluştuğu görülmektedir. r_u değerinin 0,7 değerinden küçük olmasından dolayı sıkı tabakanın sıvılaşmadığı anlaşılmaktadır.



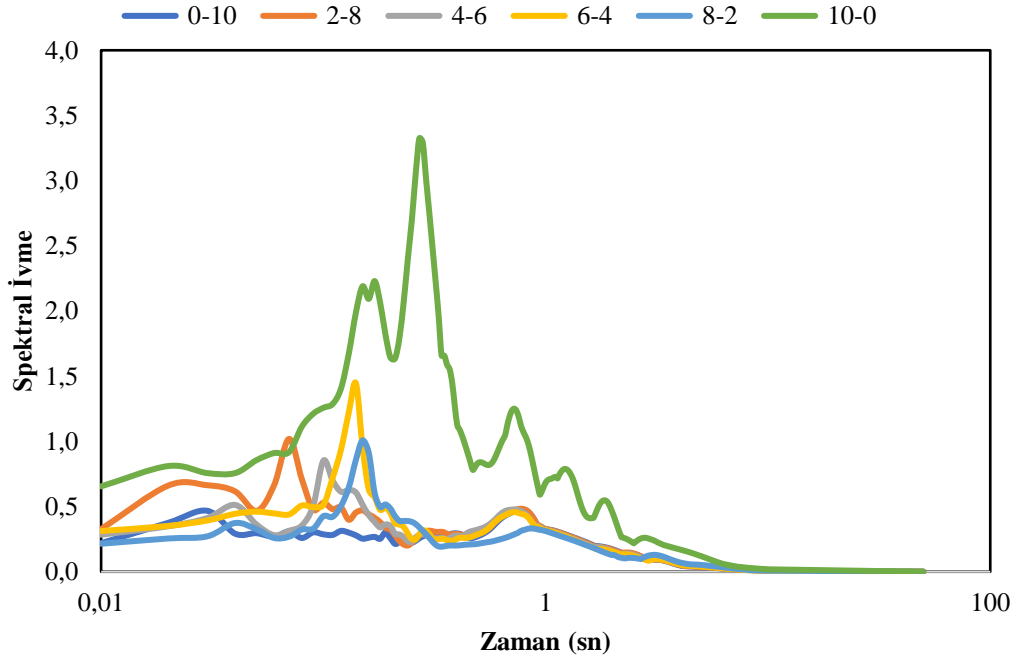
Şekil 8.38. 10-0 modeli için sıkı kum tabaka ortasındaki boşluk suyu basıncı değişimi.

8.6. Spektral İvme Diyagramlarının Karşılaştırılması

Modellere bağlı yüzeyde ve yüzeyden -1 m derinlikte seçilen noktadan elde edilen spektral ivme değerleri şekil 8.39 ve şekil 8.40.'da gösterilmiştir. Spektral ivme diyagramları birlikte değerlendirildiğinde binanın periyodu olan 1 sn'ye denk gelen değerlerin 10-0 modeli hariç diğer modellerde birbirine yakın olduğu, 10-0 modeli içerisinde sıvılaştıran tabakanın yer almamasından kaynaklı diğer modellerden farklı olduğu görülmektedir. Tanımlanan ivme kaydının üst tarafa iletimi esnasında arada sıvılaştıran tabakanın bu kaydı önemli ölçüde etkilediği hususu değerlendirilmektedir.



Şekil 8.39. 0 m'de binasız durumdaki spektral ivme grafiği.



Şekil 8.40. -1 m'de binasız durumdaki spektral ivme grafiği.

Ayrıca çalışma kapsamında gerçekleştirilen kolon analizi (1D) ile model analizi (2D) kapsamında aynı ivme kaydı ve model yüksekliği kullanılması halinde yüzeyde elde edilen ivme kayıtlarında 2 kata yakın fark olduğu görülmüştür.

8.7. Deprem Yönetmeliğine Göre Göreceli Kat Ötelenmelerinin Kontrolü

2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre göreceli kat ötelemesi değerlerinin güvenli olup olmadığının kontrol edilebilmesi için Denklem 8.1 önerilmektedir.

$$\lambda \frac{\delta_{i,max}^{(x)}}{h_i} \leq 0,008\kappa \quad (8.1)$$

Burada λ katsayısı, binanın göz önüne alınan deprem doğrultusundaki hakim titreşim periyodu için DD-3 deprem yer hareketinin elastik tasarım spektral ivmesinin, DD-2 deprem yer hareketinin elastik tasarım spektral ivmesine oranıdır. h_i değeri ise kat yüksekliğinin cm cinsinden değeridir. κ katsayısı betonarme binalarda 2 alınacaktır. Hakim titreşim periyodu ise 1 sn alınmıştır.

$\delta_i^{(x)}$ etkin göreceli kat ötelemesi ise;

$$\delta_i^{(x)} = \frac{R}{I} \Delta_i^{(x)} \quad (8.2)$$

bağıntısı yardımıyla bulunmaktadır.

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları üzerinden Adapazarı bölgesinde ilgili koordinatlar üzerinden ZA zemin sınıfı seçilerek DD-2 ve DD-3 deprem yer hareketleri için oluşturulan raporlamada SDS (kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı) ve SD1 (1 sn'lik periyot için tasarım spektral ivme katsayısı) bulunmuştur.

DD-2 için $S_{DS} = 1,257$ ve $S_{D1} = 0,345$

DD-3 için $S_{DS} = 0,494$ ve $S_{D1} = 0,121$ olarak alınmıştır.

Spektral ivme değerlerini bulabilmek için T_A ve T_B tasarım spektrumu köşe periyotları iki durum için hesaplanmıştır. DD-2 için;

$$T_A = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (8.3)$$

$$T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (8.4)$$

Denklem 8.3 ve 8.4 bağıntıları aracılığıyla yapılan hesaplamalarda $T_A = 0,05489$ ve $T_B = 0,27446$ olarak hesaplanmıştır.

Yine DD-3 için ilgili bağıntılar kullanıldığında $T_A = 0,04898$ ve $T_B = 0,24493$ değerlerine ulaşılmıştır.

Buradaki T_A , T_B ve hakim titreşim periyodu arasındaki ilişki sonucunda, $T_B \leq T \leq T_L$ eşitliği sağlandığı için elastik tasarım spektral ivmeleri;

$$S_{ac}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad (8.5)$$

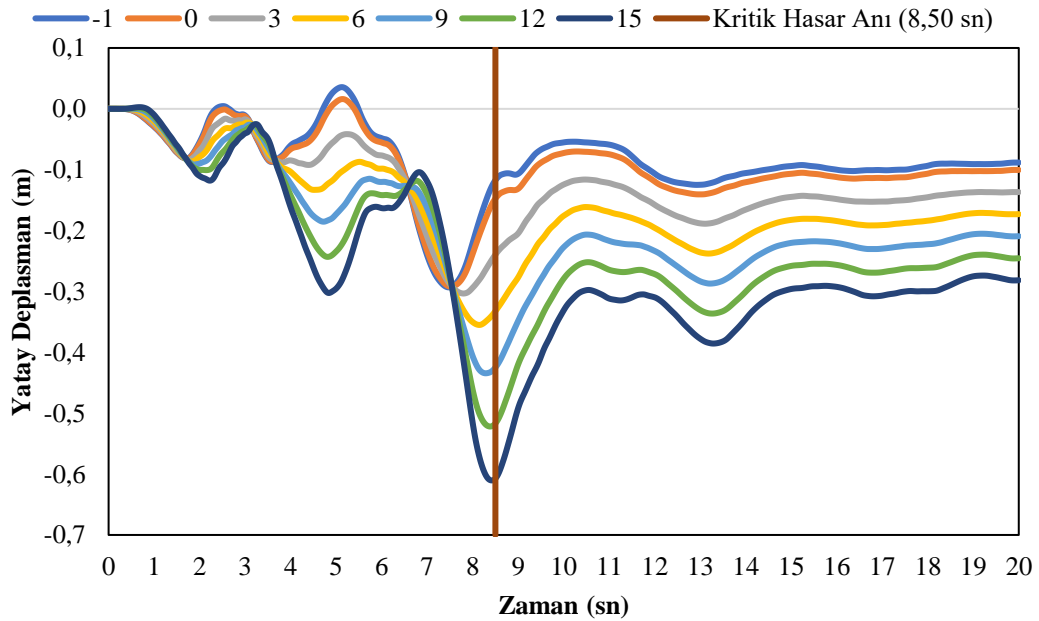
bağıntısı yardımıyla bulunmuştur.

Elastik tasarım spektral ivmeleri DD-2 için 0,345, DD-3 için ise 0,121 olarak hesaplanmıştır.

λ katsayısını ulaşmak için DD-3 ve DD-2 için bulunan spektral ivmeleri birbirine oranladığımızda ZA zemin sınıfı için $\lambda = 0,35$ olarak hesaplanmaktadır. İlgili bağıntılar kullanılarak çeşitli durumlara göre ilgili çizelgelere ulaşılmıştır. Taşıyıcı Sistem davranış katsayısı 3 kabul edilmiştir.

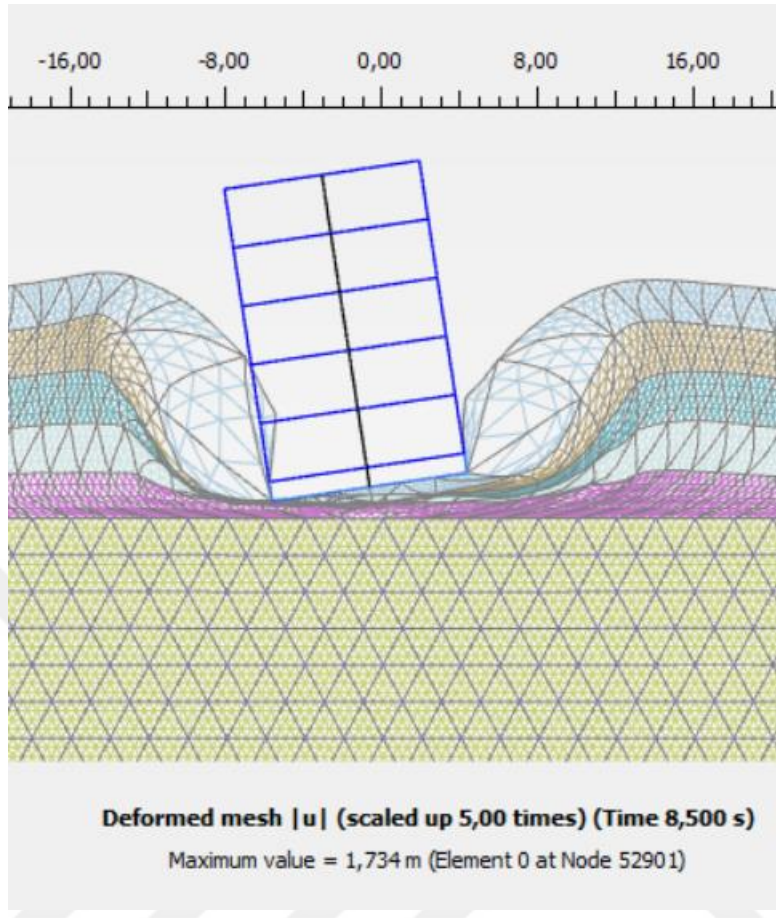
Oluşturulan altı adet modelde binaya ait sağ tarafında yer alan tüm döşemelerde - (5,-1) (5,0) (5,3) (5,6) (5,9) (5,12) (5,15) koordinatlarında- seçilen nokta üzerinde dinamik zamana bağlı meydana gelen salınım yani yatayda yaptığı hareket grafikleri aşağıda sunulmuştur.

0-10 modeli için kat döşemelerinde zamana bağlı yatayda (U_x) yapmış olduğu salınım Şekil 8.41.'de gösterilmiştir. Şekil 8.41'den 60 cm'ye varan salınımların meydana geldiği ve döşemelerin kolon ile bağlandığı noktalar arasındaki salınım farkının en fazla 8,50 sn'de meydana geldiği ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 8.41. 0-10 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (8,5. sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.42’de sunulmuştur.



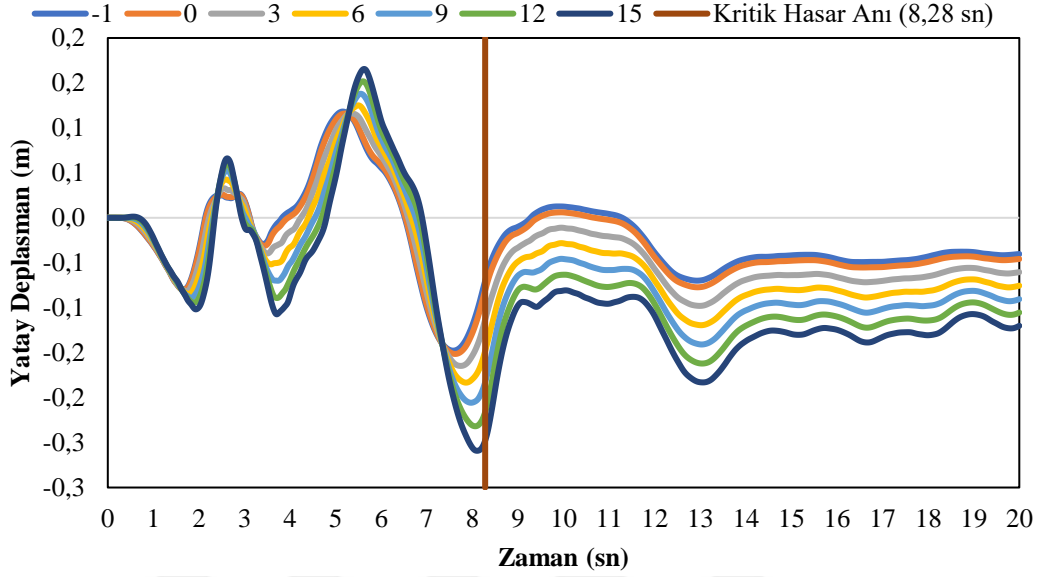
Şekil 8.42. 0-10 modeli için kritik hasar anı (8,5.sn).

0-10 modeli için 8,50 sn’de meydana gelen göreceli kat ötelenmeleri ilgili deprem yönetmeliği çerçevesinde hesap edildiğinde Tablo 8.1’de yer alan sonuçların yer aldığı görülmektedir. Kontrol sınır şartının 0,016 olarak hesaplanmasından dolayı hasar gördüğü anlaşılmaktadır. 2007 deprem yönetmeliğinde bu sınır şartı 0,02 idi.

Tablo 8.1. 0-10 modeli için göreceli kat öteleme hesabı (8,5 sn).

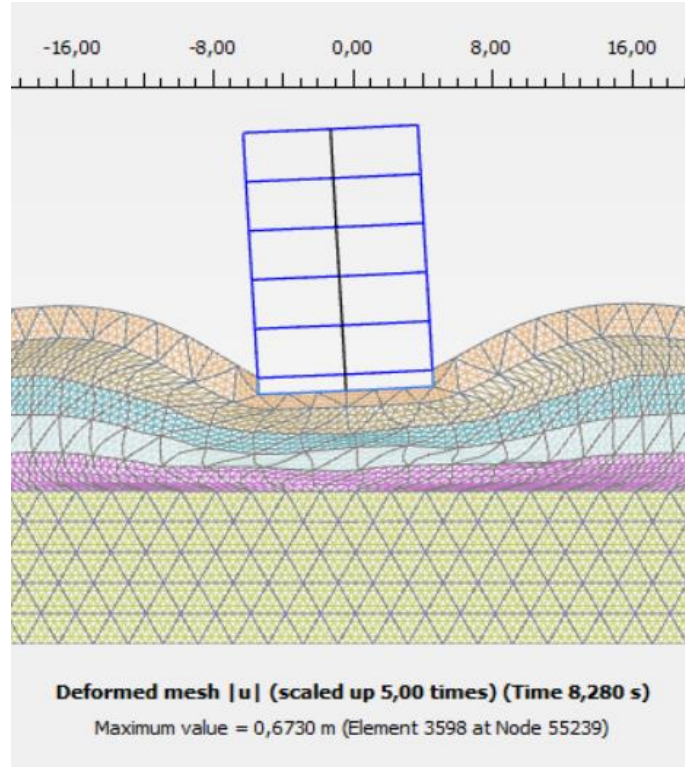
KAT	Δi (max)	R	$\delta_i^{(x)}$	h_i cm	λ_x	Kontrol
5	9,0559	3	27,1677	300	0,35	0,03169565
4	9,1807	3	27,5421	300	0,35	0,03213245
3	9,2652	3	27,7956	300	0,35	0,0324282
2	9,282	3	27,846	300	0,35	0,032487
1	9,2002	3	27,6006	300	0,35	0,0322007
Z	3,022	3	9,066	100	0,35	0,031731

2-8 modeli için kat döşemelerinde zamana bağlı yatayda yapmış olduğu salınım (U_x) Şekil 8.43'de verilmiştir. Burada 30 cm'ye varan salınımların meydana geldiği ve döşemelerin kolon ile bağlandığı noktalar arasındaki salınım farkının en fazla 8,28 sn'de olduğu görülmektedir.



Şekil 8.43. 2-8 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (8,28. sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.44'de sunulmuştur.



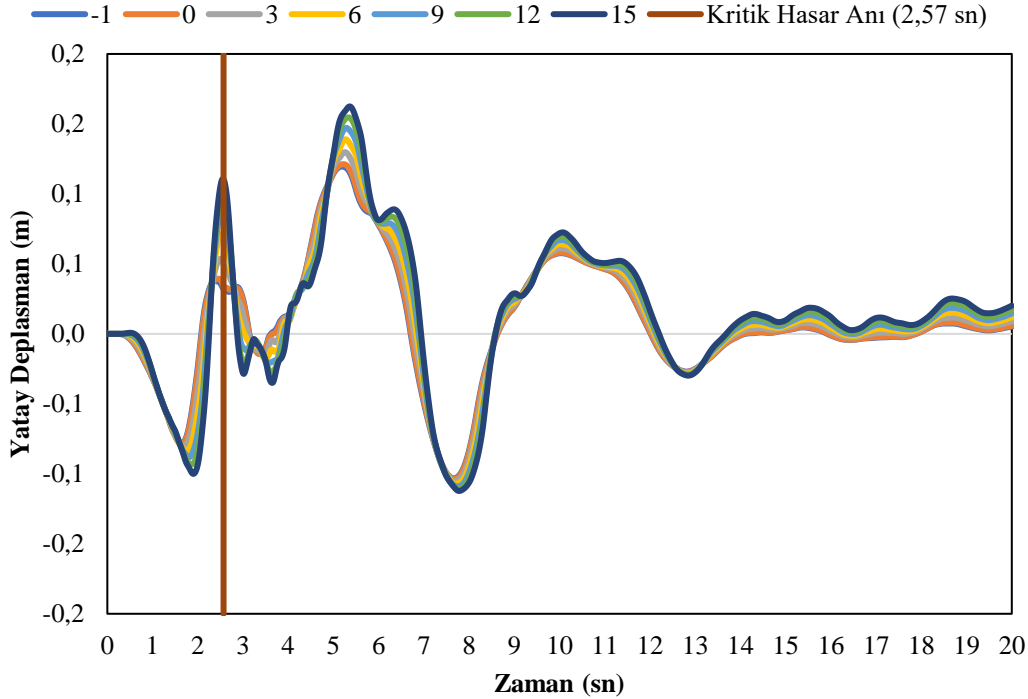
Şekil 8.44. 2-8 modeli için kritik hasar anı (8,28.sn).

2-8 modeli için 8,28 sn'de meydana gelen görece kat ötelenmeleri ilgili deprem yönetmeliği çerçevesinde hesaplandığında Tablo 8.2'de yer alan sonuçlar belirmektedir. Kontrol sınır şartının 0,016 olarak hesaplanmasından dolayı hasar görmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 8.2. 2-8 modeli için görece kat öteleme hesabı (2,58. Sn).

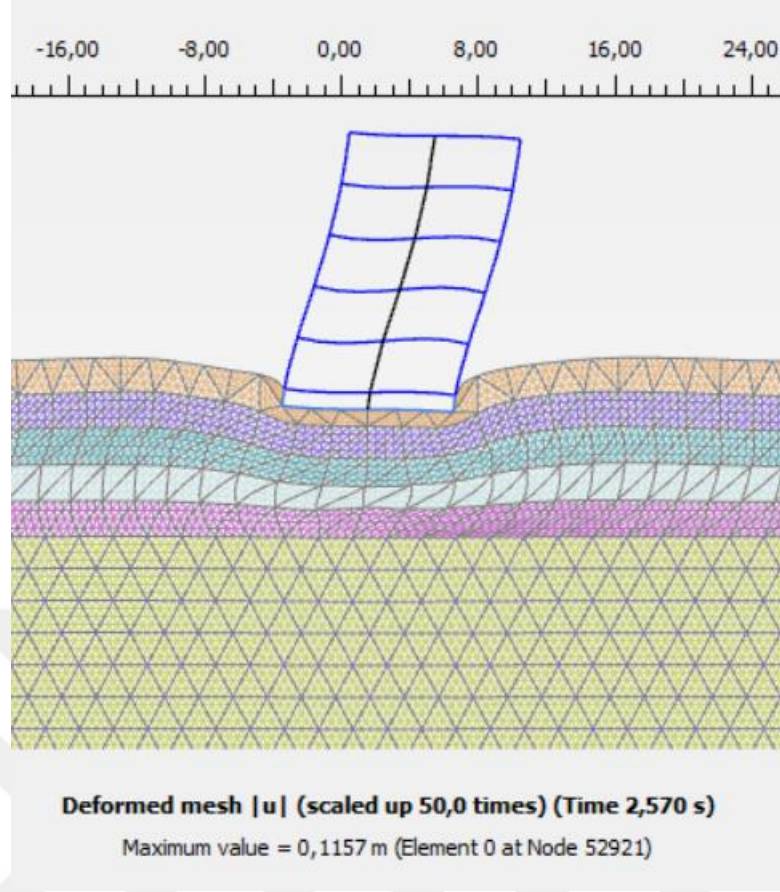
KAT	Δi (max)	R	$\delta_i^{(x)}$	h_i (cm)	λ_x	Kontrol
5	3,1609	3	9,4827	300	0,35	0,011063
4	3,335	3	10,005	300	0,35	0,011673
3	3,4716	3	10,4148	300	0,35	0,012151
2	3,4845	3	10,4535	300	0,35	0,012196
1	3,25817	3	9,77451	300	0,35	0,011404

4-6 modeli için kat döşemelerinde zamana bağlı yatayda yapmış olduğu salınım(U_x) Şekil 8.45.'de gösterilmiştir. 20 cm'ye varan salınımların oluştuğu ve döşemelerin kolon ile bağlandığı noktalar arasındaki salınım farkının en fazla 2,57 sn'de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.45. 4-6 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (2,57. sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.46'de sunulmuştur.



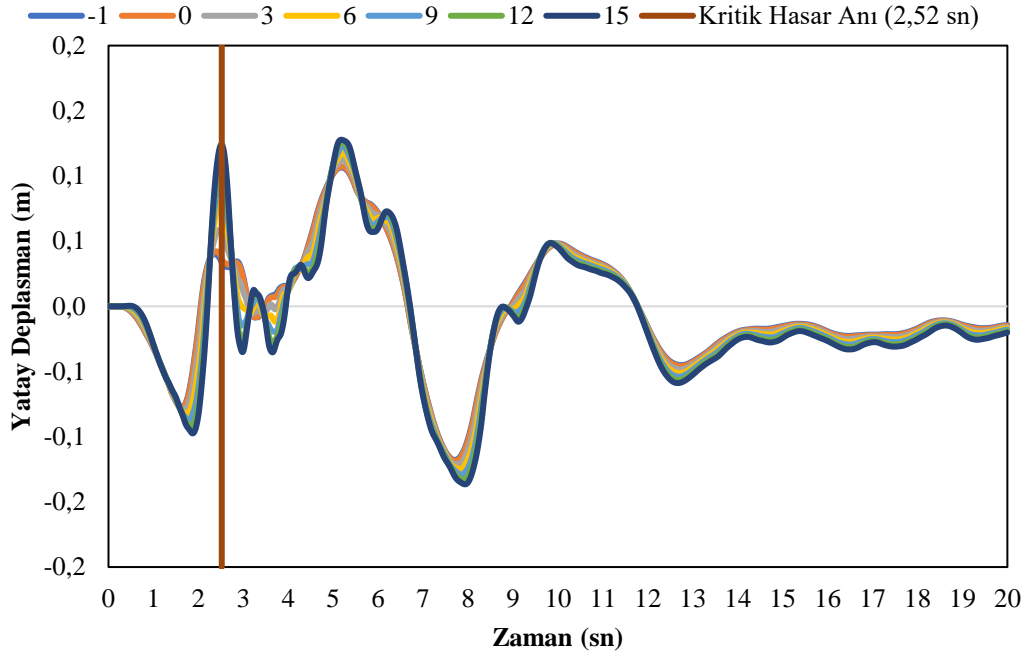
Şekil 8.46. 4-6 modeli için kritik hasar anı (2,57. sn).

4-6 modeli için 2,57 sn’de meydana gelen görece kat ötelenmeleri ilgili deprem yönetmeliği çerçevesinde Tablo 8.3’de yer alan sonuçlar hesaplanmıştır. Kontrol sınır şartının 0,016 olarak hesaplanmasından dolayı hasar görmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 8.3. 4-6 modeli için görece kat öteleme hesabı(2,57. Sn).

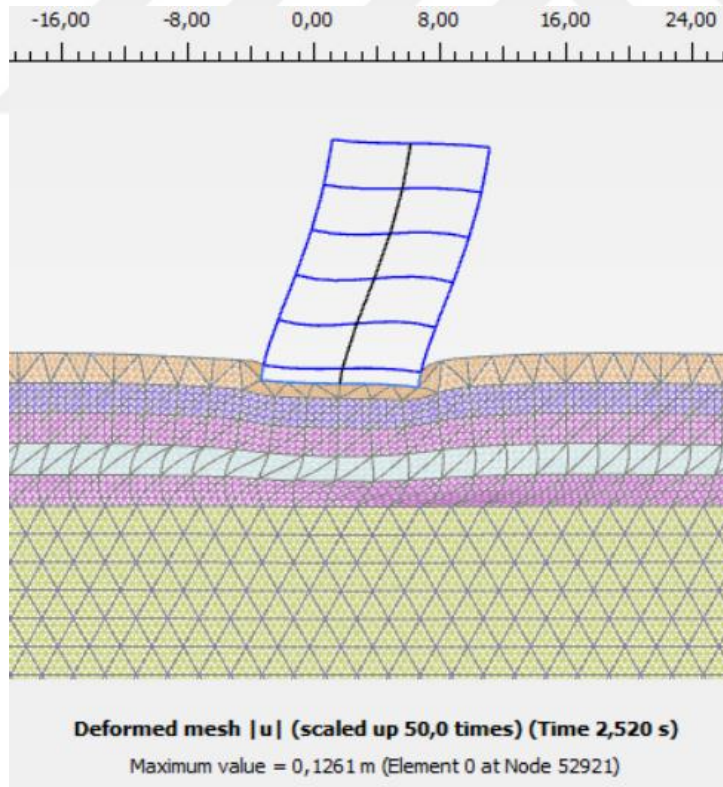
KAT	Δi (max)	R	$\delta_i^{(x)}$	h_i (cm)	λ_x	Kontrol
5	0,9414	3	2,8242	300	0,35	0,0032949
4	1,40012	3	4,20036	300	0,35	0,00490042
3	1,78872	3	5,36616	300	0,35	0,00626052
2	1,94007	3	5,82021	300	0,35	0,00679025
1	1,5324	3	4,5972	300	0,35	0,0053634
Z	0,25147	3	0,75441	100	0,35	0,00264044

6-4 modeli için kat döşemelerinde zamana bağlı yatayda yapmış olduğu salınım (U_x) Şekil 8.47.’de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde 20 cm’ye varan salınımların meydana geldiği ve döşemelerin kolon ile bağlandığı noktalar arasındaki salınım farkının en fazla 2,52 sn’de belirdiği görülmektedir.



Şekil 8.47. 6-4 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (2,52. sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.48’de sunulmuştur.



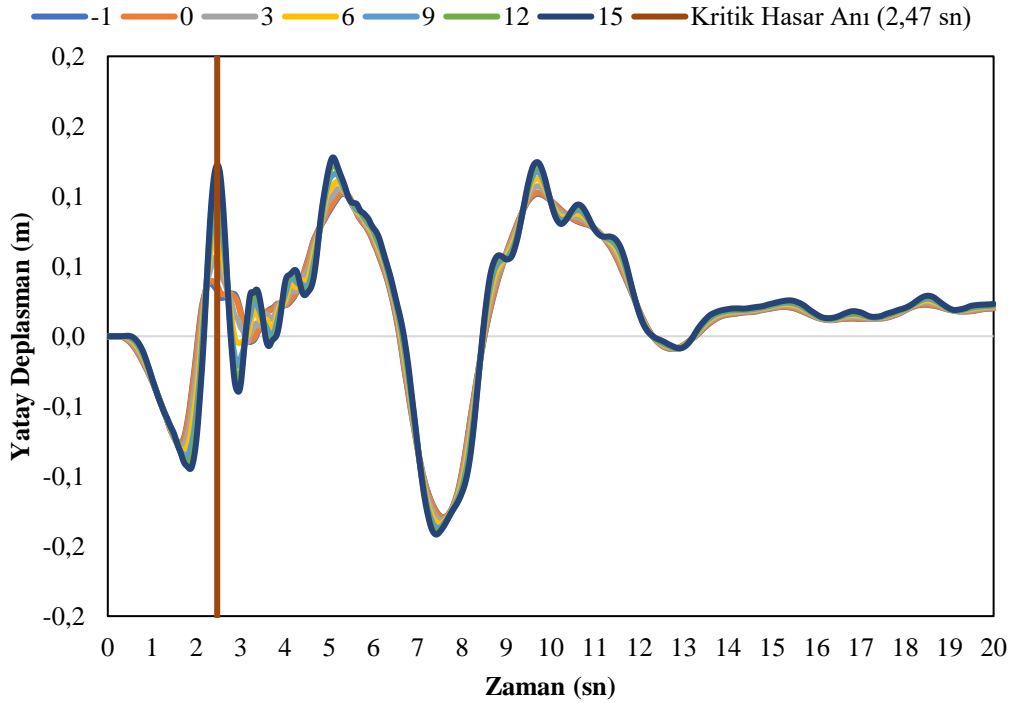
Şekil 8.48. 6-4 modeli için kritik hasar anı (2,52. sn).

6-4 modeli için 2,52 sn'de meydana gelen görece kat ötelenmeleri ilgili deprem yönetmeliği çerçevesinde hesaplandığında Tablo 8.4'de yer alan sonuçların yer aldığı görülmektedir. Kontrol sınır şartının 0,016 olarak hesaplanmasından dolayı hasar görmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 8.4. 6-4 modeli için görece kat öteleme hesabı(2,52. sn).

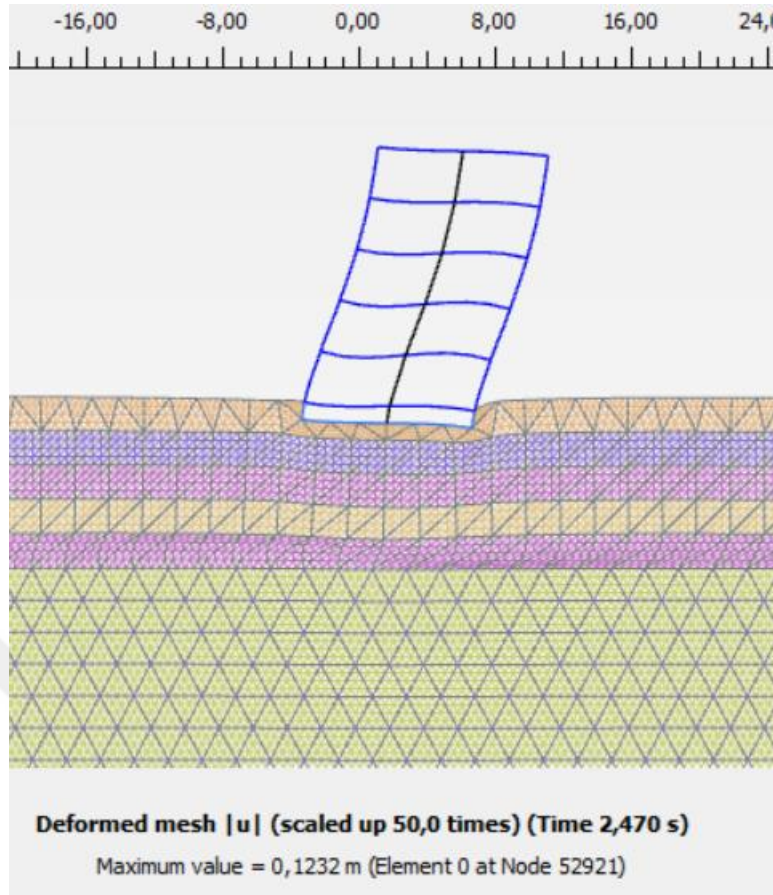
KAT	Δi (max)	R	$\delta_i^{(x)}$	h_i (cm)	λ_x	Kontrol
5	1,0606	3	3,1818	300	0,35	0,0037121
4	1,56949	3	4,70847	300	0,35	0,0054932
3	2,01652	3	6,04956	300	0,35	0,0070578
2	2,22721	3	6,68163	300	0,35	0,0077952
1	1,84895	3	5,54685	300	0,35	0,0064713
Z	0,32916	3	0,98748	100	0,35	0,0034562

8-2 modeli için kat döşemelerinde zamana bağlı yatayda yapmış olduğu salınım (U_x) Şekil 8.49'de gösterilmiştir. Burada 20 cm'ye varan salınımların belirdiği ve döşemelerin kolon ile bağlandığı noktalar arasındaki salınım farkının en fazla 2,47 sn'de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.49. 8-2 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (2,47.sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.50'da sunulmuştur.



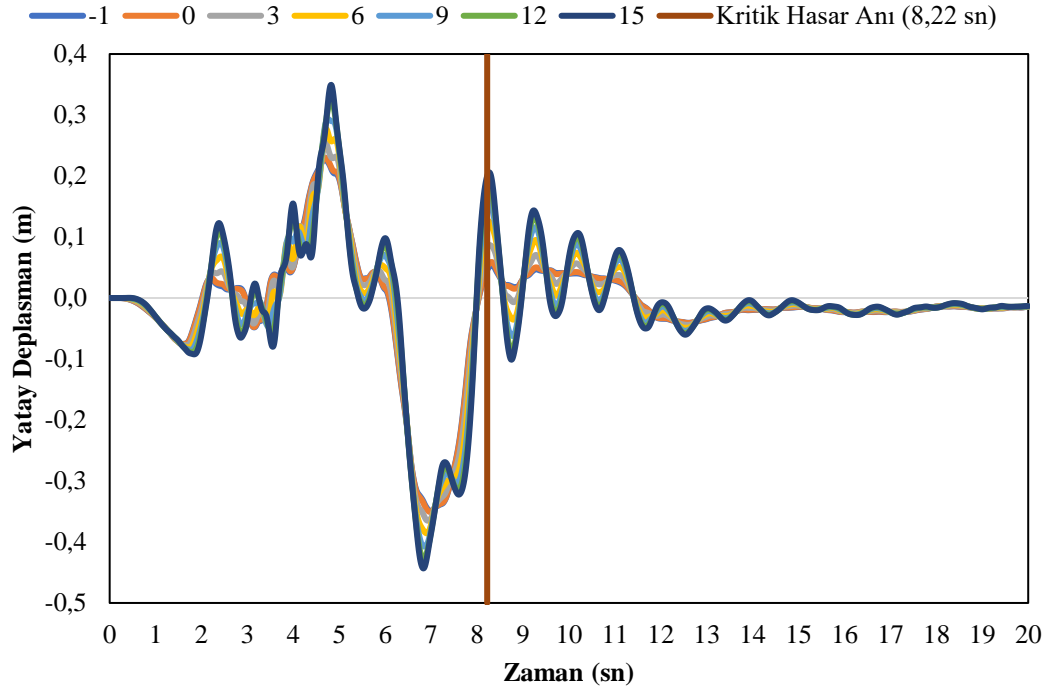
Şekil 8.50. 8-2 modeli için kritik hasar anı (2,47.sn).

8-2 modeli için 2,47 sn’de meydana gelen görece kat ötelenmeleri ilgili deprem yönetmeliği çerçevesinde Tablo 8.5’de yer alan sonuçlar hesaplanmıştır. Kontrol sınır şartının 0,016 olarak hesaplanmasından dolayı hasar görmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 8.5. 8-2 modeli için görece kat öteleme hesabı (2,47 sn).

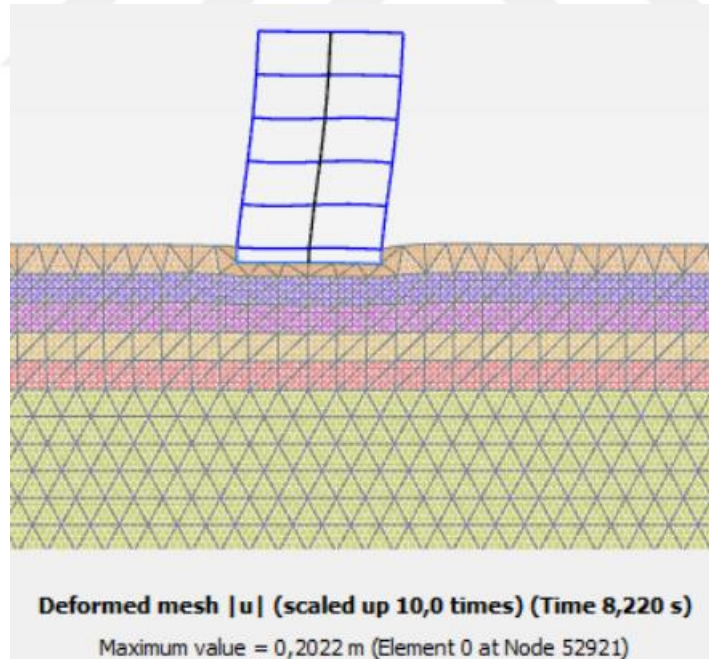
KAT	Δi (max)	R	$\delta_i^{(x)}$	h_i (cm)	λ_x	Kontrol
5	0,9683	3	2,9049	300	0,35	0,003389
4	1,49228	3	4,47684	300	0,35	0,005223
3	2,01186	3	6,03558	300	0,35	0,007042
2	2,27099	3	6,81297	300	0,35	0,007948
1	1,88457	3	5,65371	300	0,35	0,006596
Z	0,33938	3	1,01814	100	0,35	0,003563

10-0 modeli için kat döşemelerinde zamana bağlı yatayda yapmış olduğu salınım (U_x) Şekil 8.51.’de gösterilmiştir. Şekilde 45 cm’ye varan salınımların oluştuğu, döşemelerin kolon ile bağlandığı noktalar arasındaki salınım farkının en fazla 8,22 sn’de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.51. 10-0 modeli için kat öteleme grafiği ve kritik hasar anı (8,22. sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.52’de sunulmuştur.



Şekil 8.52. 10-0 Modeli için kritik hasar anı (8,22.sn).

10-0 modeli için 8,22 sn’de meydana gelen göreceli kat ötelenmeleri ilgili deprem yönetmeliği çerçevesinde hesaplandığında Tablo 8.6’de yer alan sonuçlar

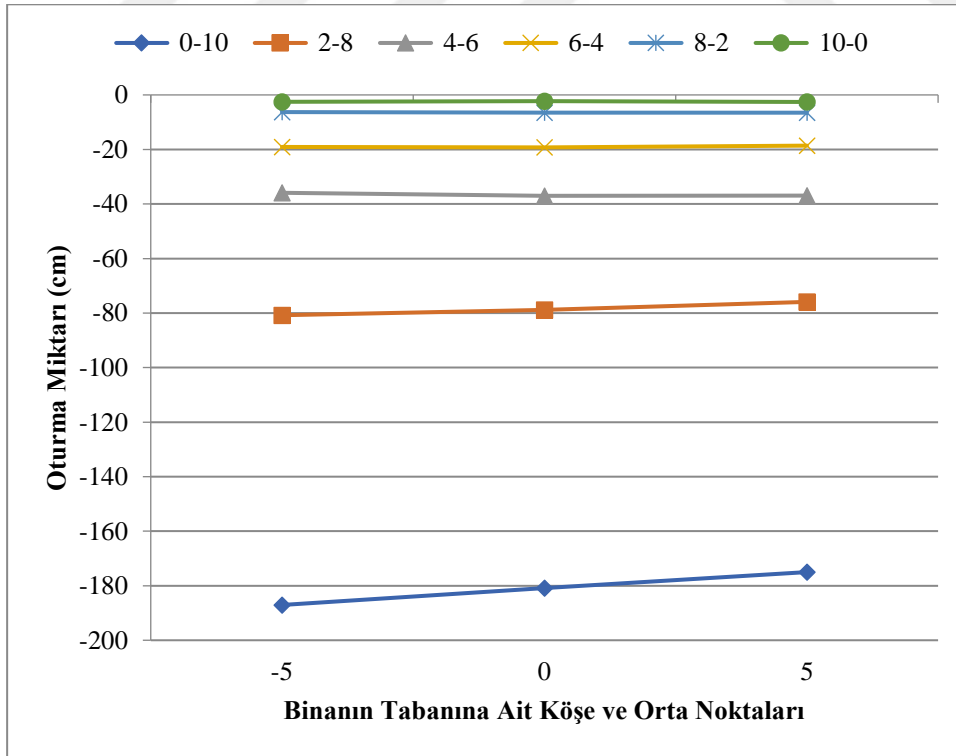
bulunmuştur. Kontrol sınır şartının 0,016 olarak hesaplanmasından dolayı hasar görmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 8.6. 10-0 modeli için görel kat öteleme hesabı (8,22 sn).

KAT	Δi (max)	R	$\delta_i^{(x)}$	h_i (cm)	λx	Kontrol
5	1,5364	3	4,6092	300	0,35	0,005377
4	2,4455	3	7,3365	300	0,35	0,008559
3	3,4393	3	10,3179	300	0,35	0,012038
2	4,0395	3	12,1185	300	0,35	0,014138
1	3,37891	3	10,13673	300	0,35	0,011826
Z	0,56446	3	1,69338	100	0,35	0,005927

8.8. Binanın Oturma Davranışının İncelenmesi ve Kayılma Kontrolünün Yapılması

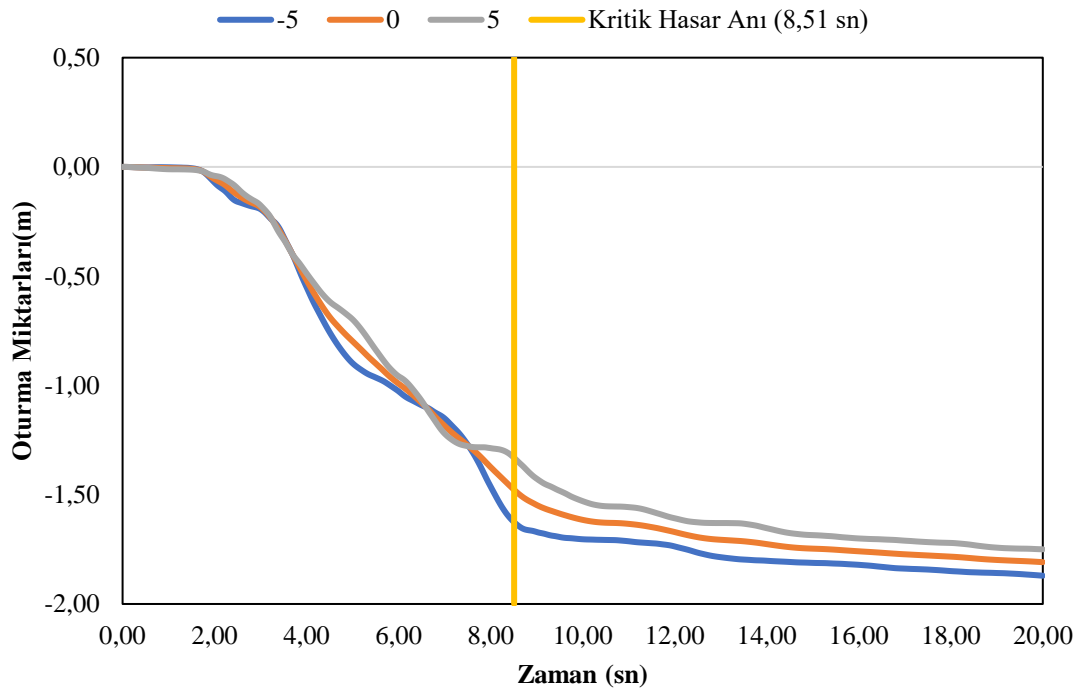
Deprem anında binanın oturma davranışını incelemek için analiz öncesinde seçilen, binanın sol alt köşesi, orta alt noktası ve sağ alt köşesi için deprem kaydının sonunda yapılarda meydana gelen oturma miktarları Şekil 8.53’de sunulmuştur. Hasar olma şartı olarak altyapı ve dış bağlantıların hasar görmesi açısından 7,5 cm kabul edilmiştir. (Coduto, Donald P.,2005).



Şekil 8.53. Tüm modeller için deprem kaydı sonunda binada meydana gelen oturma grafiği.

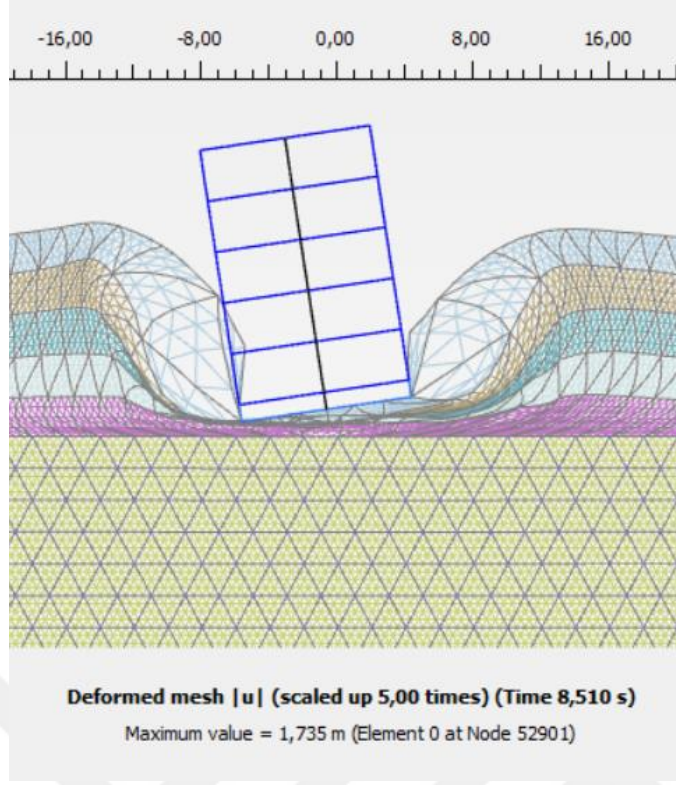
Zamana bağılı düşey deplasman (U_z) grafikleri ise kaykılma, eğilme ve yatma açısından değerlendirilmiş, yapısal hasar açısından 1/150 ağır hasar, 1/250 orta hasar, 1/500 hafif hasar, eğilme açısından 1/300 ağır hasar olarak değerlendirilmiştir (Coduto, Donald P.,2005). Model bazında zamana bağılı düşey deplasman grafikleri aşağıda sunulmuştur.

0-10 modeli için binanın temelinde seçilen noktaların zamana bağılı dinamik düşey oturma miktarları (U_z) Şekil 8.54’de verilmiştir. Şekil 8.54 incelendiğinde 180 cm’ye varan oturma meydana geldiği kaykılma ve eğilme kontrolü için meydana gelen en fazla miktarın 8,51 sn’de olduğu görülmektedir.



Şekil 8.54. 0-10 modeli için zamana bağılı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (8,51.sn)

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.55’de sunulmuştur.



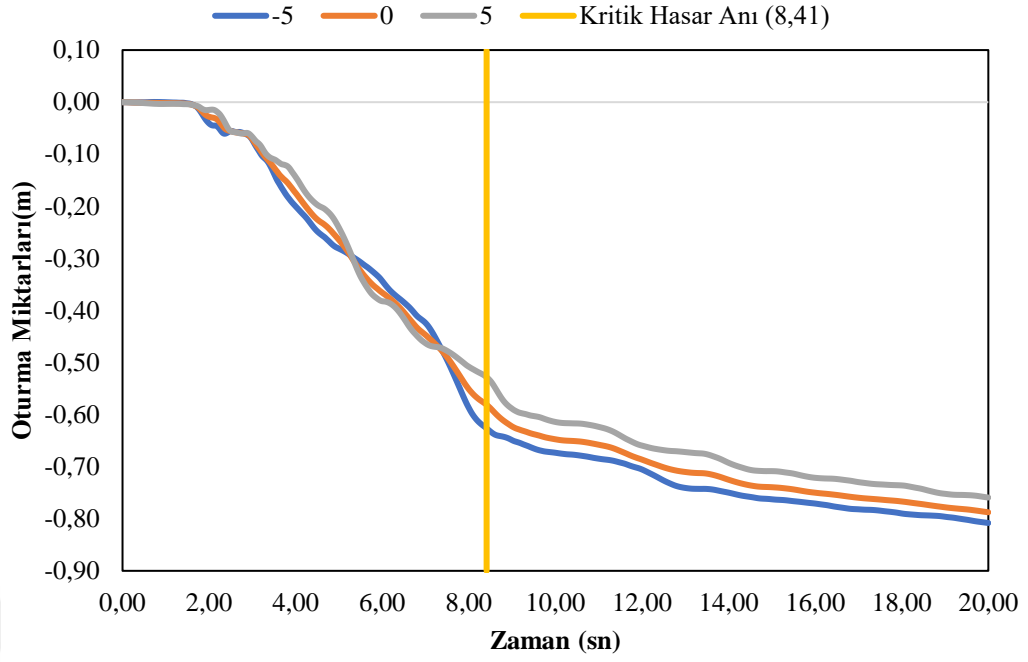
Şekil 8.55. 0-10 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (8,51.sn).

0-10 modeli için bina temelinde seçilen noktalarda kayılma ve eğilme hesap kontrolü Tablo 8.7.'de sunulmuştur. Burada kayılma değerleri 1/150 değerinin altında kaldığı için ağır hasarlı, eğilme kontrolü açısından ise 1/300 değerinin altında kaldığı için hasarlı olarak kabul edilmektedir.

Tablo 8.7. 0-10 modeli için kayılma ve eğilme Hesabı (8,51.sn)

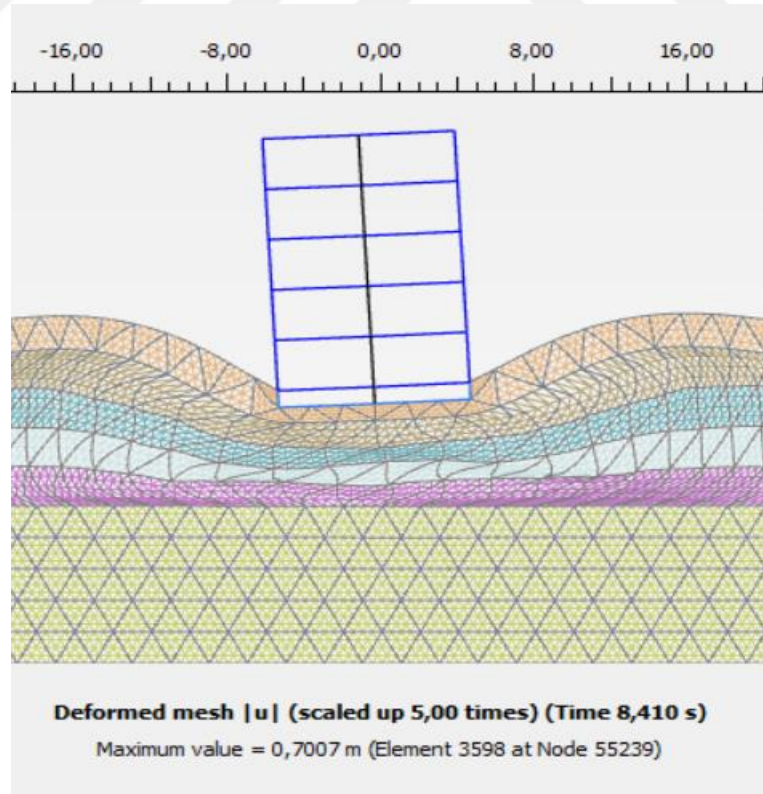
Koordinatlar	Δi (max)	L cm	Kontrol
Kayılma (-5,0)	-14,82	500	- 4/135
Kayılma (0,-5)	-14,63	500	- 23/786
Eğilme (-5,0)-(-5,-5)	-29,45	1000	- 24/815

2-8 modeli için binanın temelinde seçilen noktaların zamana bağlı dinamik düşey oturma miktarları (U_z) Şekil 8.56.'de gösterilmiştir. Şekil 8.56'dan 80 cm'ye varan oturma meydana geldiği kayılma ve eğilme kontrolü için en fazla miktarın 8,41 sn'de belirdiği görülmektedir.



Şekil 8.56. 2-8 Modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (8,41 sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.57’de sunulmuştur.



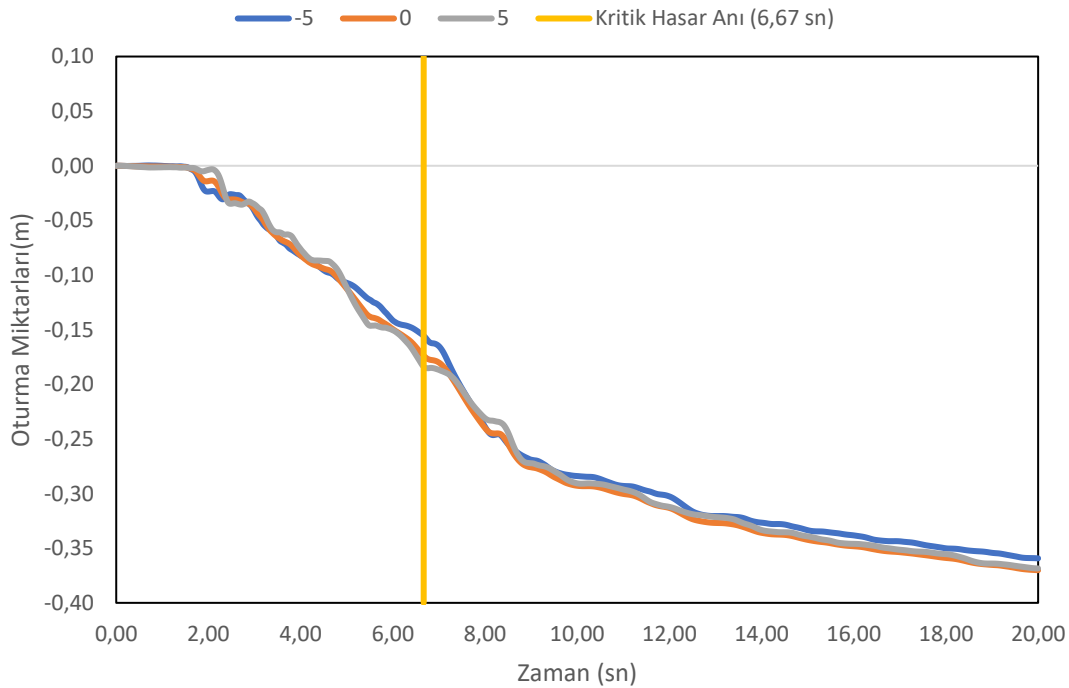
Şekil 8.57. 2-8 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (8,41.sn).

2-8 modeli için bina temelinde seçilen noktalarda kayılma ve eğilme hesapları Tablo 8.8.'de sunulmuştur. Tabloya göre kayılma değerleri 1/150 değerinin altında kaldığı için ağır hasar, eğilme kontrolü açısından ise 1/300 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız olarak kabul edilmektedir.

Tablo 8.8. 2-8 modeli için kayılma ve eğilme hesabı (8,41sn).

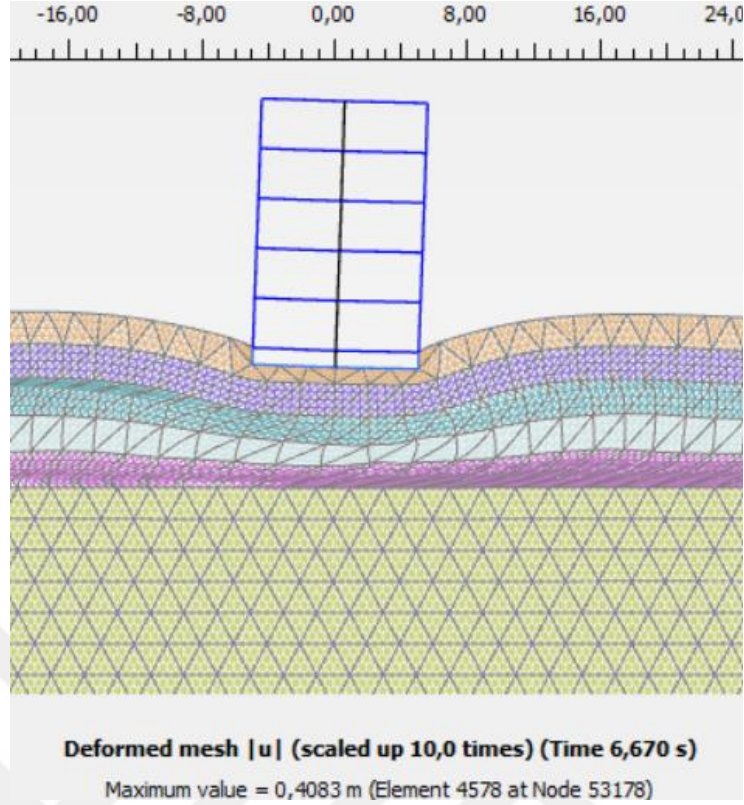
Koordinatlar	Δi (max)	L cm	Kontrol
Kayılma (-5,0)	-4,53	500	- 5/552
Kayılma (0,-5)	-5,30	500	- 5/472
Eğilme (-5,0)-(-5,-5)	-9,83	1000	- 9/916

4-6 modeli için binanın temelinde seçilen noktaların zamana bağlı dinamik düşey oturma miktarları (U_z) Şekil 8.58.'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde 40 cm'ye varan oturma oluştuğu, kayılma ve eğilme kontrolü için en fazla miktarın 6,67 sn'de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.58. 4-6 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (6,67.sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.59'de sunulmuştur.



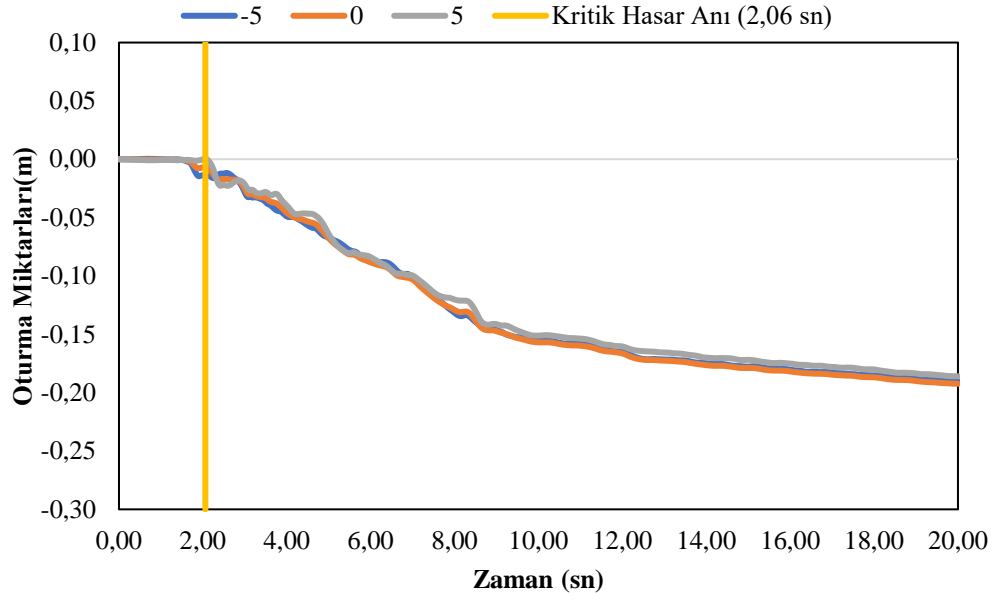
Şekil 8.59. 4-6 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (6,67.sn).

4-6 modeli için bina temelinde seçilen noktalarda kaykılma ve eğilme hesap kontrolü Tablo 8.9.'de sunulmuştur. Tablo 8.9'a göre kaykılma değerleri 1/500 değerinin altında kaldığı için hafif hasarlı, eğilme kontrolü açısından ise 1/300 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız olarak kabul edilmektedir.

Tablo 8.9. 4-6 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (6,67 sn).

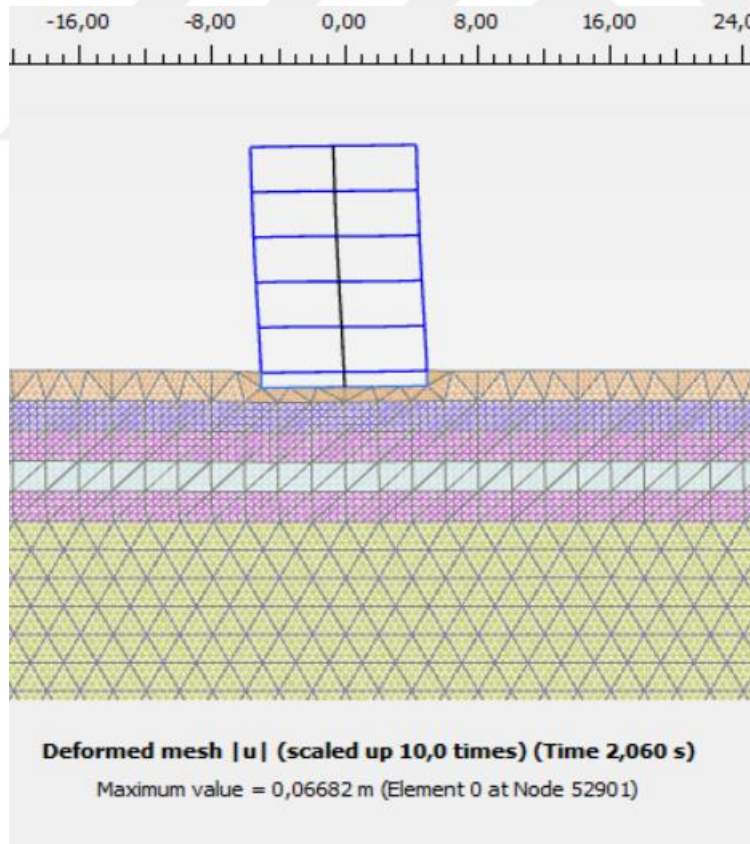
Koordinatlar	Δi (max)	L cm	Kontrol
Kaykılma (-5,0)	1,83	500	1/273
Kaykılma (0,-5)	1,00	500	1/501
Eğilme (-5,0)-(-5,-5)	2,83	1000	2/707

6-4 modeli için binanın temelinde seçilen noktaların zamana bağlı dinamik düşey oturma miktarları (U_y) Şekil 8.60'da gösterilmiştir. Buradan 25 cm'ye varan oturma meydana geldiği, kaykılma ve eğilme kontrolü için en büyük değere 2,06 sn'de ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 8.60. 6-4 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (2,06.sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.61’de sunulmuştur.



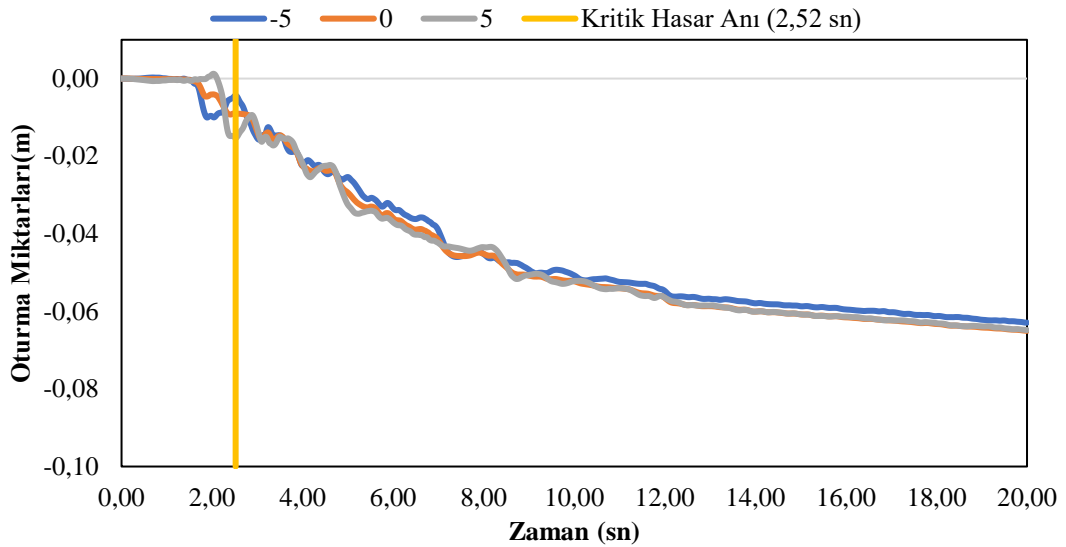
Şekil 8.61. 6-4 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (2,06.sn).

6-4 modeli için bina temelinde seçilen noktalarda kayılma ve eğilme hesap detayı Tablo 8.10'da verilmiştir. Buna göre kayılma değerleri 1/500 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız, eğilme değeri ise 1/300 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız olarak kabul edilmektedir.

Tablo 8.10. 6-4 modeli için kayılma ve eğilme hesabı (2,06.sn).

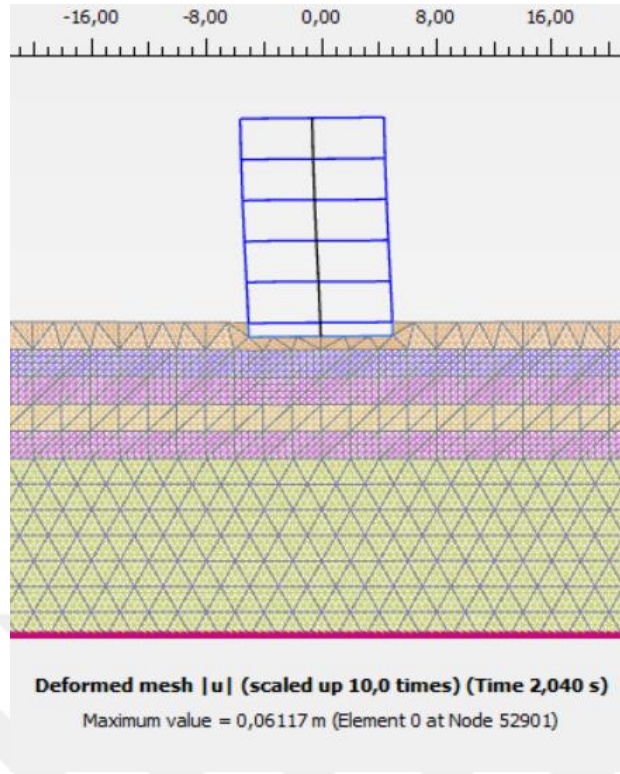
Koordinatlar	Δi (max)	L cm	Kontrol
Kayılma (-5,0)	-0,74	500	- 1/673
Kayılma (0,-5)	-0,74	500	- 1/674
Eğilme (-5,0)-(-5,-5)	-1,48	1000	- 1/674

8-2 modeli için binanın temelinde seçilen noktaların zamana bağlı dinamik düşey oturma miktarları Şekil 8.62.'de sunulmuştur. Şekil 8.62 incelendiğinde 6 cm'ye varan oturma meydana geldiği, kayılma ve eğilme kontrolü için en fazla miktarın 2,52 sn'de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.62. 8-2 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (2,04.sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.63'de sunulmuştur.



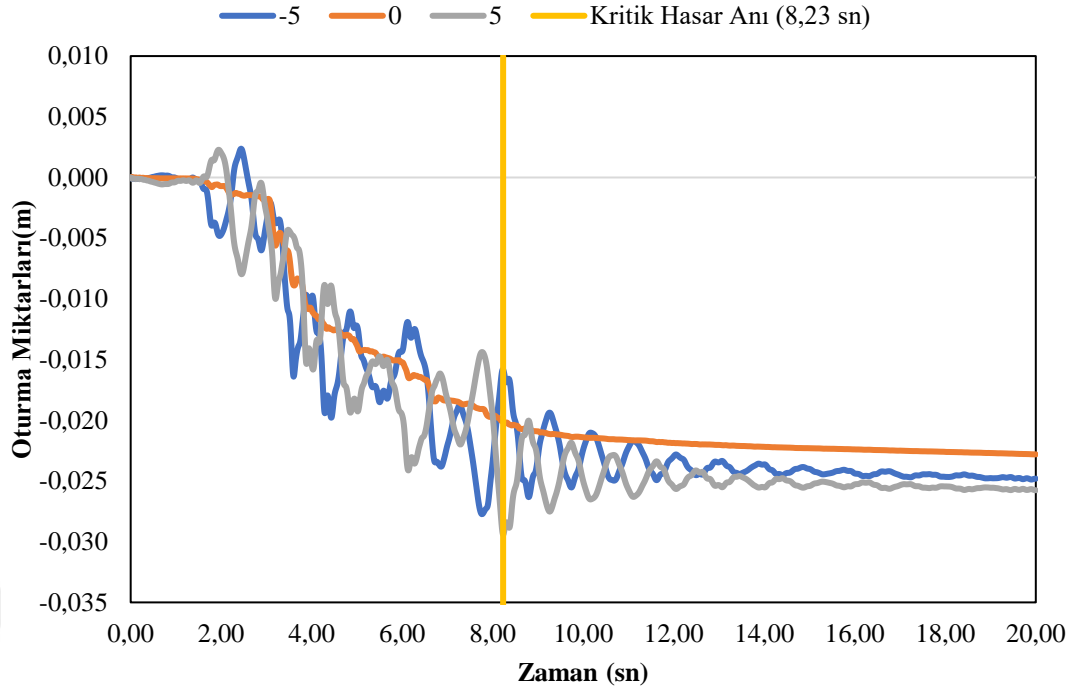
Şekil 8.63. 8-2 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (2,04.sn).

8-2 modeli için bina temelinde seçilen noktalarda kayılma ve eğilme hesap kontrolü Tablo 8.11’de sunulmuştur. Tabloya göre kayılma değerleri 1/500 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız, eğilme kontrolü açısından ise 1/300 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız olarak kabul edilmektedir.

Tablo 8.11. 8-2 modeli için kayılma ve eğilme hesabı (2,04sn).

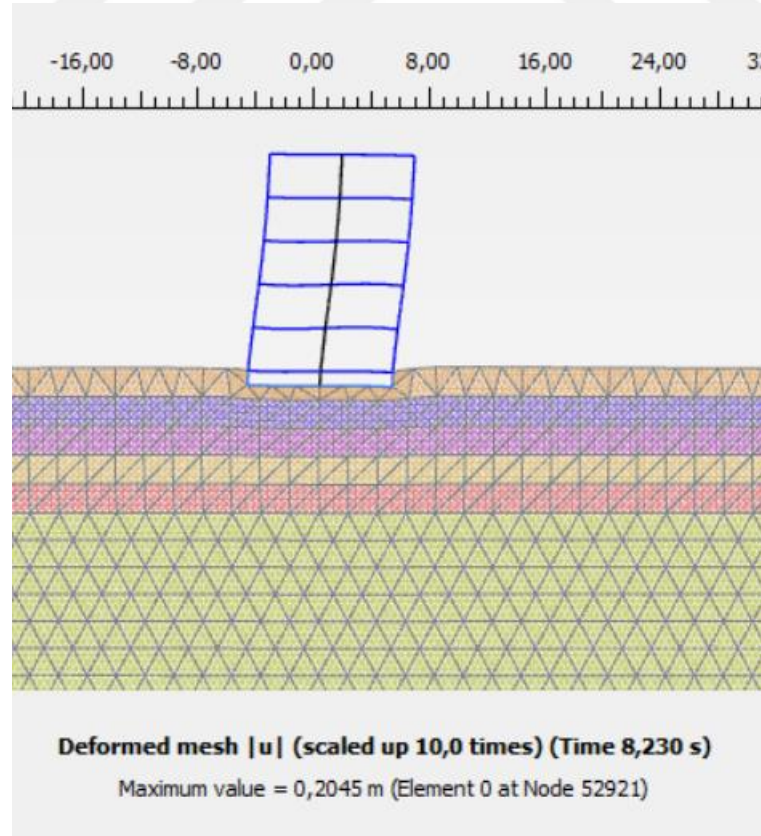
Koordinatlar	Δi (max)	L cm	Kontrol
Kayılma (-5,0)	-0,59	500	- 1/845
Kayılma (0,-5)	-0,53	500	- 1/943
Eğilme (-5,0)-(-5,-5)	-1,12	1000	- 1/891

10-0 modeli için binanın temelinde seçilen noktaların zamana bağlı dinamik düşey oturma miktarları Şekil 8.64’de gösterilmiştir. Şekil 8.64 incelendiğinde 3 cm’ye varan oturma meydana geldiği, kayılma ve eğilme kontrolü için en büyük miktarın 8,23 sn’de olduğu görülmektedir.



Şekil 8.64. 10-0 modeli için zamana bağlı U_z (düşey deplasman) değişimi kritik hasar anı (8,23sn).

Hasar anına ait deformasyon mesh durumu Şekil 8.65’de sunulmuştur.



Şekil 8.65. 10-0 modeli düşey deplasman kritik hasar anı (8,23.sn).

10-0 modeli için bina temelinde seçilen noktalarda kaykılma ve eğilme hesap kontrolü Tablo 8.12’de sunulmuştur. Tablo 8.12’ye göre kaykılma değerleri 1/500 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız, eğilme kontrolü açısından ise 1/300 değerinin üstünde kaldığı için hasarsız olarak kabul edilmektedir.

Tablo 8.12. 10-0 modeli için kaykılma ve eğilme hesabı (8,23.sn).

Koordinatlar	Δi (max)	L cm	Kontrol
Kaykılma (-5,0)	0,43	500	1/1167
Kaykılma (0,-5)	0,93	500	1/538
Eğilme (-5,0)-(-5,-5)	1,36	1000	1/737

8.9. Özet Değerlendirme

Sonlu elemanlar yazılımı ile yüzeyden itibaren 10 m kalınlığındaki zemin profilinde sıvılaşma potansiyeline sahip tabakanın kalınlığının 2’şer metre aralıklarla değiştirilmesi ile oluşturulan modeller üzerinde analizler gerçekleştirildiğinde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi; sıvılaşan tabakanın olmadığı (10-0) modelin “hasarsız” sonucu verdiği, 8 m sıvılaşmayan tabaka altında 2 m sıvılaşan tabakanın olduğu (8-2) modelinde ise modelde yer alan yapıda meydana gelen oturmanın 5 cm’den fazla olmasından dolayı “alt yapının zarar görme hasarı” bulunduğu, 6 m sıvılaşmayan tabaka altında 4 m sıvılaşan tabakanın olduğu (6-4) modelde ise meydana gelen oturma miktarının 7,5’den çok büyük olmasından dolayı “hasarlı”, 4 m sıvılaşmayan tabakanın altında 6 m sıvılaşan tabakanın olduğu (4-6) modelde ise aşırı oturma miktarı açısından “aşırı hasarlı” olarak, bina tabanında meydana gelen kaykılma miktarları açısından değerlendirme yapıldığında “hafif hasarlı”, 2 m sıvılaşmayan tabaka altında 8 m sıvılaşan tabakanın olması durumunda (2-8) modelde ise oturma ve kaykılma açısından “ağır hasarlı”, 10 m sıvılaşan tabakanın olduğu (0-10) model de ise oturma ve kaykılma açısından “ağır hasarlı” olmasının yanında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre görel kat öteleme hesapları açısından da “hasarlı” olduğu sonucuna varılmaktadır. Ancak 1999 Adapazarı depreminden sonra Adapazarı merkezde 80 cm civarında oturma meydana gelen yapıların altyapısı onarıldıktan sonra hali hazırda kullanımına devam ettiği düşünüldüğünde; 10 m’lik sıkı kum tabakasını içeren modelden daha zayıf modele doğru incelendiğinde ilk hasarın 4-6 modelinde, kaykılma kontrolünde “hafif hasar” olarak çıktığı görülmektedir. Sonuç karşılaştırma tablosu Tablo 9.1.’de sunulmuştur.

Tablo 8.13. Tüm modeller için elde edilen sonuçların karşılaştırması.

Model Adı	0-10	2-8	4-6	6-4	8-2	10-0
(LPI)	11,56	8,71	6,01	3,68	1,68	0
Değerlendirme (LPI)	Orta	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Çok Düşük
(LSN)	131,8	65,8	40,14	24	12,22	2,93
Değerlendirme (LSN)	Aşırı Derece	Aşırı Derece	Orta-Yüksek	Orta	Sınırlı	Yok
(LSI)	2,82	2,03	1,37	0,825	0,37	0
Değerlendirme(LSI)	Orta	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Çok Düşük
(IL)	53,26	38,03	25,2	14,56	6,16	0
Değerlendirme (IL)	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
(LS)	71,73	56,1	42,16	29,91	19,35	14,7
Değerlendirme (LS)	Yüksek	Orta	Orta	az	az	Çok az
Binalı- LPI	71,19	53,06	36	22,62	10,33	0
Değerlendirme (Binalı- LPI)	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Orta	Çok Düşük
Binalı- IL	288,24	262,1	209,75	141,62	68,2	0
Değerlendirme (Binalı- IL)	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Düşük
Binalı - LS	72,5	54	37,5	23	10,5	0
Değerlendirme (Binalı - LS)	Yüksek	Orta	Orta	Az	Çok Az	Sıvılaşma Beklenmez
Plaxis - U_z	187,07 cm	80,81 cm	37,01 cm	19,24 cm	6,50 cm	3 cm
Değerlendirme (Plaxis- U_z)	Hasarlı	Hasarlı	Hasarlı	Hasarlı	Hasarsız	Hasarsız
Değerlendirme (Plaxis- Kayılma)	Ağır Hasarlı	Ağır Hasarlı	Hafif Hasarlı	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız
Değerlendirme (Plaxis-Eğilme)	Hasarlı	Hasarlı	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız
Değerlendirme (Plaxis- GKÖ)	Hasarlı	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız

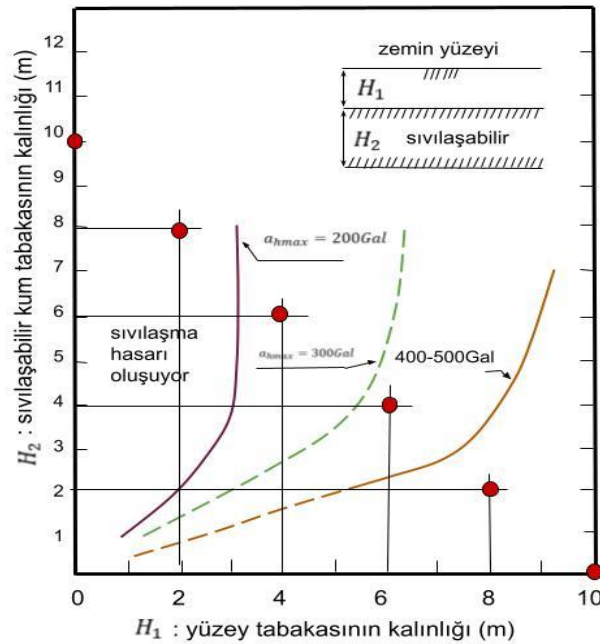
Tablo 9.1’de literatürde yer alan sıvılaşma endeks değerlendirmelerin karşılaştırılması halinde sıvılaşan tabakanın en kalın olduğu durumda bile LPI ve LSI değerlerinin “orta” olarak yorumlandığı, binalı duruma göre IL indeks değerinin sıvılaşan tabakanın yer alması hali bile sonucun “çok yüksek” olarak değerlendirilmesine sebebiyet verdiği görülmektedir.

Sonlu elemanlar yazılımı ile şiddet indeks sonuçları değerlendirildiğinde, binalı duruma göre IL endeksinin kullanılması, alt yapı zararının dahi sıvılaşma şiddetinin “çok yüksek” olarak yorumlanması anlamına gelebileceği, LPI ile ise alt yapı zararını

“orta” olarak değerlendirildiği, yaklaşık 20 cm oturmanın bulunduğu modelde LS indeksine göre “az” olarak değerlendirildiği durumlarda bile binanın “hasarlı” duruma gelebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, bir sahanın sıvılaşma yönünden değerlendirilmesi yapılacağı zaman, LPI ve LSI değerlendirme yöntemi olarak kullanılması halinde dikkatli olunması, LSN, IL, LS şiddet değerleri yorumlanırken “az” ve “sınırlı” olarak değerlendirilmesi halinde dahi gerekli önlem alınma ihtimalinin göz önünde bulundurulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Ishihara (1985) tarafından hacimsel birim deformasyon değerinin %1 dolayına varması kabulüne dayalı ve sadece ön değerlendirme amacıyla kullanılan abakta sonlu elemanlar yazılımı ile tasarlanan ve analizleri gerçekleştirilen altı adet modelin ön değerlendirmesi yapılarak durum şekil 9.1’de gösterilmiştir. Ishihara (1985) tarafından önerilen ön değerlendirme abağına göre en fazla 0,5 g değerine göre ölçek gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ivme kaydının en yüksek ivme kaydının 0,56 g’ye denk gelmesine rağmen Ishihara (1985) tarafından, hacimsel birim deformasyonun sıvılaşmanın başlaması için %1 dolayına varması kabulüne bağlı olarak sadece ön değerlendirme yapılması için önerilen abakta ivme kaydının 0,4 g olduğu durum için bile Plaxis ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 8.66. Ishihara (1985) tarafından önerilen abakta modellerin değerlendirilmesi.

9. SONUÇLAR

Sıvılaşma durumunda üst tabaka etkisinin araştırılması maksadıyla belirlenen altı model üzerinden gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının değerlendirildiğinde;

Sönüm oranının belirlenmesi ile ilgili olarak; sonuçlar üzerinde etkilerini büyük ölçüde etkilediği ayrıca literatürde yer alan sönüm parametrelerinin belirlenme yöntemlerinin birbirinden farklı olduğu ve birçok araştırmada sönüm değerlerinin belirlenme çalışmalarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmesi yönünde değerlendirmelerin yapıldığı görülmektedir.

Artık Boşluk Suyu Basıncı Oluşumu İle ilgili olarak; Bahse konu analizlerde sıvılaşmayan tabaka olarak tariflenen SM3 ve CH4 tabakaları drenajsız davranış seçilerek, sıvılaşan tabakada(SM4) olduğu gibi UBC3D-PLM bünye modeli atanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde sıvılaşmayan tabakaların HS-Small olarak tanımlanması önerilmekte, ancak bu çalışmada sıvılaşan tabaka üzerinde sıvılaşmayan tabakanın sıvılaşım, sıvılaşmayan tabaka üzerindeki etkiyi simüle etmesi maksadıyla tüm tabakaların UBC3D-PLM bünye modeli ile modellenmesi tercih edilmiştir. Sıvılaşmayan tabakada boşluk suyu basıncı artı değerinde basınç üreterek toplam efektif gerilmeye ilave dayanım getirdiği görülmektedir. Boşluk suyu basınının hesaplanmasında hacimsel zorlanmanın etkili olduğu sıkı kumda da kesme kuvvetlerinde artışların meydana gelmesi hacim artmasına yol açtığından, 10-0 binasız modelde yer alan üst tabakanın boşluk suyu basıncı ürettiği, maruz kaldığı dinamik yükler altında sıkı kumun hacimsel genişlemeye çalışması gibi hacim arttığından buna bağlı artık boşluk suyu basıncı oluşumuna neden olduğu görülmektedir. Aynı şekilde binalı modellerde binanın köşe noktalarında oluşturduğu basınç sıkı kumda oluşması halinde hacimsel genişlemeye sebep olacak şekilde davranış sergilediği, sıvılaşan tabakaya denk gelmesi durumunda hacimsel büzülmeye sebep olacak şekilde davranış sergilemektedir.

İvme Değerleri İle ilgili olarak; 0-10 ile 10-0 modeller arasında ivme değerlerinin değerlendirilmesi yazılım tarafından elde edilen PSA diyagramları üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Bahse konu sıvılaşmayan ile kum tabakasının sıvılaşığı modeller arasında büyük farklar olduğu, karşılaştırılmalı grafiklerden de anlaşılacağı

üzere sıvılaşılan tabakadan üst tabakaya ivme değerlerinin sönümlenmesinden kaynaklı daha az olacak şekilde ivme değerlerinin aktarıldığı değerlendirilmektedir.

Binanın zemin üzerinde oturması ile ilgili olarak; sıvılaşımayan üst tabaka kalınlığı arttıkça yapılan oturma miktarında azalmaların olduğu değerlendirilmektedir.

Göreceli kat ötelenmesi açısından hasar derecelerinin tespit edilmesi; Deprem yönetmeliği çerçevesinde ve oturma yönünden hasar değerlendirmeleri yapıldığında sıvılaşımayan tabaka altında yer alan sıvılaşılan tabaka kalınlığı arttıkça alt yapının zarar görme durumundan, ağır hasara doğru bir ilerleme olduğu görülmektedir. İlk 10 m'lik tabakada sıvılaşılan tabakanın var olması halinde önlem alınma ihtimalinin göz önünde bulundurulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.



KAYNAKLAR

- Dülger, M. (2015). UBCSAND Model ile sıvılaşma davranışının incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Özenç, S. (2019). PM4SAND Zemin bünye modeline ait parametrelerin yüzeysel temellerde sıvılaşma kaynaklı deformasyonlara etkisi. İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Nomaler, G.Ş. (2018). 1999 Kocaeli depreminde Adapazarında yapı yükü altında zemin davranışı. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Özener, P. (2019). Sıvılaşmanın UBC3D-PLM Model ile tahmin edilmesi : Santrifüf deney örneği. Teknik Dergi(9421-9442, Yazı 550).
- Ertek, M. K. (2015). Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ve oturmalara etkisinin incelenmesi : Atakum örneği. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Karakan, E. (2016). Silt kum karışımlarının sıvılaşma davranışı ve sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon özellikleri. İMO Teknik Dergi 2016 7593-7617, Yazı 462
- Eseler Bayat, E. (2017). Determining the seismic liquefaction potential of dry sand specimens from cyclic simple shear tests 7'nci Geoteknik Sempozyumu, 2017
- Porcino, D.D. (2019). Recent advances in pore water pressure and liquefaction characteristics of low plasticity silty sands subjected to cyclic loading IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 351 (2019) 012013
- Etminan, E. (2016). Effects of gradation, fines content and silt shape characteristics on static liquefaction of loose Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering And Technology.
- Kanbur, M.A. (2011). Siltlerde sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde boşluk geometresinin etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Sert, S. Özocak, A. (2010). Liquefaction of silts: the Adapazari criteria, Bull Earthquake Eng (2010) 8:859–873 DOI 10.1007/s10518-010-9174-x
- Özocak, A. Sert, S. (2013). Evaluation of the liquefaction potential through dissipation measurement in PCPT, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 46, 2013, pp. 337–350
- Özocak, A. Tapan, M. Siltlerin boşluk boyutu dağılımı ve radyal konsolidasyon özelliğinin sıvılaşma potansiyeline etkisi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 29, No 1, 35-47, 2014
- Sönmezer, Y.B. Siltli Kumların Sıvılaşma Direncinin Dinamik Basit Kesme Testi Kullanılarak Araştırılması, Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği

- Yılmaz, Y. (2006). Değişik gradasyonlu kumların dinamik üçeksenli deneyi ile tespit edilen sıvılaşma dirençleri ile geleneksel direkt kesme ve hidrolik iletkenlik deney bulgularının ilişkilendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Papadopoulou, A. Tıka, T. (2008). The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands, *Soils and foundations* Vol. 48, No. 5, 713–725, Oct. 2008 Japanese Geotechnical Society
- Manav, Y. (2019). Sıvılaşma şiddet parametreleri ile bina deprem performansı ilişkilerinin değerlendirilmesi ve deneysel zemin iyileştirme uygulaması, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Emiroğlu, T. (2018). Serbest arazi koşullarında ve düşey gerilme artışı etkisinde sıvılaşma analizi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Mollamahmutoğlu, M. ve Babuçcu, F. (2006). Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri. (1. Baskı) Ankara: Gazi Kitabevi.
- Özkan, M.Y. (2017). Zemin Dinamiğine Giriş. (1. Baskı) Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kutter, B.L. (1992). The Mechanism of Liquefaction in Layered Soils Article in *Journal of Geotechnical Engineering* · August 1992 DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:4(737)
- Brennan, A.J. (2005). Liquefaction and Drainage in Stratified Soil Article in *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* · July
- Makra, A. (2013). Evaluation of the UBC3D-PLM constitutive Model for prediction of earthquake induced liquefaction on embankment dams· February
- Coduto, Donald P., (2005). Temel Tasarımı İlkeler ve Uygulamalar, çev. Mollamahmutoğlu ve Kayabalı, Yorum Matbaa
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Amini, F. & Qi, G. Z. (2000). Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), 208–217.
- El Fiky, N. E., Metwally, K. G. & Akl, A. Y. (2020). Effect of top soil liquefaction potential on the seismic response of the embedded piles. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 923–931.
- Ibrahim, K. M. H. I. (2014). Liquefaction analysis of alluvial soil deposits in Bedsa southwest of Cairo. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(3), 647–655.
- Lee, C. Y. (2007). Earthquake-induced settlements in saturated sandy soils. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(4), 6–13.
- Mokhtar, A.-S. A., Abdel-Motaal, M. A. & Wahidy, M. M. (2014). Lateral displacement and pile instability due to soil liquefaction using numerical model. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4), 1019–1032.
- Rollins, K. M. & Seed, H. B. (1990). Influence of buildings on potential liquefaction damage. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(2), 165–185.
- Vaid, Y. P. & Thomas, J. (1995). Liquefaction and postliquefaction behavior of sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(2), 163–173.

- Yoshimi, Y. (1967). An experimental study of liquefaction of saturated sands. *Soils and Foundations*, 7(2), 20–32.
- Zeghal, M. & Elgamal, A.-W. (1994). Analysis of site liquefaction using earthquake records. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(6), 996–1017.
- Plaxis. (2015). Petalas A. (2012) Validation and verification of a practical constitutive model for predicting liquefaction in sands PLAXIS B.V., Delftechpark 53, 2628 XJ Delft, The Netherlands, ap@plaxis.com,2012.
- Castiglia M. (2020). Pipeline Performances under Earthquake-Induced Soil Liquefaction: State of the Art on Real Observations, Model Tests, and Numerical Simulations, *Hindawi Shock and Vibration Volume 2020*, Article ID 8874200, 20 pages <https://doi.org/10.1155/2020/8874200> 2020.
- Plaxis. (2015). Site response analysis and liquefaction evaluation.
- Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., Özocak, A., (2010). Liquefaction of Silts: The Adapazarı Criteria. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010:8:859-873, DOI 10.1007/s10518-010-9174-x.
- Iwasaki, T. (1986). Soil Liquefaction Studies in Japan, State-of-Art, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, V.5, N.1, 2-68.
- Sönmezer, Y. B.(2020)., “Siltli Kumlarda Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Sıvılaşma Testlerinin Karşılaştırılması” *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* 2020, 7 (1); 322-337.
- Boulanger, R. W. (2003b). “High overburden stress effects in liquefaction analyses.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(12), 1071-1082.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Abdullah Uğur YILMAZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : Devam Ediyor, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011-halen yılları arasında Milli Savunma Bakanlığı'nda mühendis olarak çalışıyor.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

DİĞER ESERLER: