

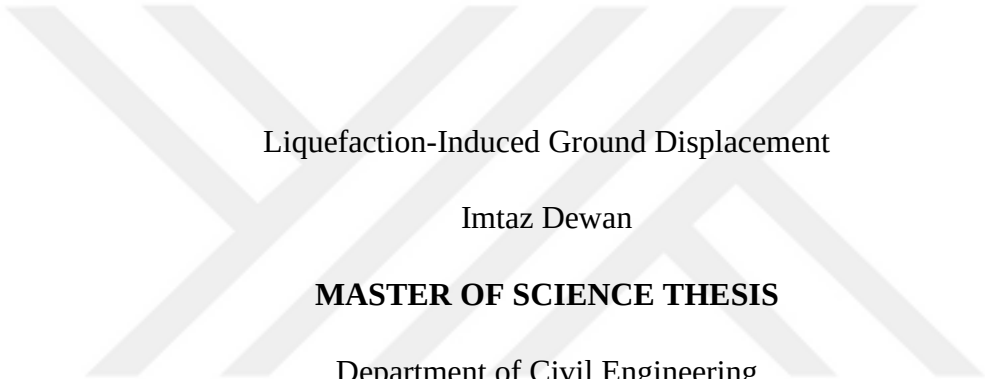
Sıvılaşma Kaynaklı Yer Değiştirmesinin Değerlendirilmesi

İmtaz Dewan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği

Mayıs 2025



Liquefaction-Induced Ground Displacement

Imtaz Dewan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

May 2025

Sıvılaşma Kaynaklı Yer Değiştirmesinin Değerlendirilmesi

İmtaz Dewan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

Mayıs 2025

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **İmtaz Dewan**'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Sıvılaşma Kaynaklı Yer Değiştirmesinin Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

Üye: Prof. Dr. Derviş Volkan OKUR

Üye: Dr.öğr.üyesi Eren BALABAN

Üye:-

Üye:-

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Sıvılaşma Kaynaklı Yer Değiştirmesinin Değerlendirilmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 09/05/2025

İmtaz Dewan

İmza

ÖZET

Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi, mühendislerin sıvılaşma olgusunu incelemesindeki en önemli endişelerden biridir ve genellikle altyapı ile binalarda önemli hasarlara yol açar. Sismik mühendislikte, özellikle gevşek ve suya doymuş zeminlerin bulunduğu bölgelerde, depremler sırasında yapısal çökmelere neden olan zemin sıvılaşması önemli zorluklar yaratmaktadır. Bu çalışma, sıvılaşma derinliği ile zemin üzerinde yatay yer değiştirme ve oturma şeklinde tezahür eden etkiler arasındaki ilişkiyi araştırmayı amaçlamaktadır. Gelişmiş sayısal modelleme teknikleri ve güncel çalışmalardan elde edilen bulgular kullanılarak sıvılaşma davranışının anlaşılmasının derinleştirilmesi hedeflenmektedir. Sismik yükleme ile zemin davranışı arasındaki karmaşık etkileşimleri simüle etmek için PLAXIS 2D'de iki boyutlu bir model kullanılmıştır. Sahada yapılan testlerden elde edilen zemin özelliklerine dayanarak, 13 katmanlı bir zemin profili oluşturulmuş ve sıvılaşabilir tabakanın konumu üstten alta doğru değiştirilerek 11 farklı sismik durum analiz edilmiştir. Çalışma, sıvılaşabilir tabakanın derinliğinin, çeşitli deprem senaryolarında zemin yer değiştirmesinin büyüklüğü ve dağılımı üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Sıvılaşmanın yüzeydeki tezahürü (yanal yer değiştirme ve oturma), sıvılaşabilir tabakanın derinliği arttıkça kademeli olarak azalma eğilimi göstermektedir. Bu, belirli bir derinlikten sonra sıvılaşmanın yüzeydeki etkisinin ihmal edilebileceği anlamına gelir. Ancak, sıvılaşabilir tabakanın kalınlığı ve rijitliğinin, fazla boşluk suyu basıncı oluşumu ve yer değiştirme üzerinde daha kritik bir rol oynadığı da gözlemlenmiştir. Daha kalın sıvılaşabilir tabakalar, zemin sıkılaşmasını artırarak yüzeyde daha fazla oturmaya neden olmaktadır. Düşük SPT-N değerlerine sahip kum tabakaları ise sıvılaşmaya daha yatkın olup daha büyük yer değiştirmelere yol açabilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, sayısal modelleme ve simülasyon yoluyla sismik risk değerlendirmelerinde tahmin yeteneklerini geliştirmeyi ve geoteknik tasarımda daha güvenli mühendislik uygulamalarına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Yatay yer değiştirme, Oturma, PLAXIS 2D, Sıvılaşabilir tabaka

SUMMARY

Liquefaction-induced ground displacement is one of the most important concerns for the engineers for studying liquefaction phenomenon, often leading to considerable damage to infrastructure and buildings. Soil liquefaction poses significant challenges in seismic engineering, particularly in areas with loose, saturated soils, leading to catastrophic structural failures during earthquakes. This study aims to investigate the relation between the depth of liquefaction and its manifestation on the ground in the form of displacement. Both Lateral displacement and settlement are considered for this study. It is aimed to enhance the understanding of liquefaction behavior through advanced numerical modeling techniques while incorporating findings from recent studies to validate and refine the modeling approach. A two-dimensional framework in PLAXIS is employed to simulate the complex interactions between seismic loading and soil behavior. A thirteen layered soil profile is modeled in PLAXIS 2D based on soil properties available from field test. The position of liquefiable layer is changed from the top to the bottom of the soil profile. About eleven seismic cases are studied to ensure comprehensive analysis. The study reveals the significant role of the depth of the liquefiable layer in the magnitude and distribution of the ground displacement during various seismic events. The manifestation of liquefaction on the ground in the form of displacement tends to decrease gradually with increasing depth of liquefaction layer. It means although liquefaction occurs, after a certain depth its effect on ground is insignificant and can be neglected. However, it also reveals the more vital role of stiffness and thickness of liquefiable layer in excess pore pressure generation and displacement. The thicker liquefiable layer means more sand densification and more settlement on the ground. The sand deposits with less SPT-N values are more prone to liquefaction and can lead to larger ground displacement. Ultimately, this study aims to enhance predictive capabilities in seismic risk assessments using numeral modelling and simulation. It contribute to safer engineering practices in geotechnical design.

Keywords: Liquefaction, Lateral displacement, Settlement, PLAXIS 2D, Liquefiable layer

TEŞEKKÜR

Hamd, alemlerin Rabbi olan Allah'a mahsustur. O, Rahman'dır, Rahim'dir. Bu araştırmanın her aşamasında değerli rehberliği, sürekli desteği ve motivasyonu için danışmanım Sayın Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN'a içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin derin görüşleri ve teşvikleri, bu tezin başarıyla tamamlanmasında kritik bir rol oynamıştır. Ayrıca, analizlerin tamamlanmasında önemli bir rol oynayan bilgisayar laboratuvarındaki gerekli kaynaklara erişim sağlama konusundaki nazik yardımları için Öğr. Gör. Turgay URLA'ya içten teşekkürlerimi sunarım. Bu süreç boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, sabır ve anlayış gösteren anneme, babama ve sevgili eşime derin minnettarlığımı ifade ederim. Onların sürekli teşviki ve fedakarlıkları, bana her zaman güç ve ilham kaynağı olmuştur.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
SUMMARY.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Sıvılaşma Olgusu.....	7
2.2. Sıvılaşmayı Etkileyen Zemin Özellikleri.....	14
2.2.1. Zeminin rijitliği.....	15
2.2.1.1. Elastisite modülü.....	15
2.2.1.2. Kesme modülü (Rijitlik).....	17
2.2.1.3. Hacimsel elastiklik modülü (Sıkışmazlık)	18
2.2.1.4. Zeminin sertliği ile sıvılaşması arasındaki ilişki	19
2.2.2. Poisson oranı (μ).....	20
2.2.3. Boşluk oranı (e).....	21
2.2.4. Tane boyutu ve zemin sınıflandırması.....	22

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.2.5. Plastisite.....	24
2.2.6. Zeminin birim hacim ağırlığı (γ).....	25
2.2.7. Kohezyon.....	26
2.2.8. Sürtünme açısı(ϕ).....	28
2.2.9. Geçirgenlik(Permeabilite).....	28
2.2.10. Dalga hızı.....	29
<u>2.2.10.1. Birincil dalgalar (P-dalgaları)</u>	<u>30</u>
<u>2.2.10.2. İkincil dalgalar (S-dalgaları)</u>	<u>30</u>
2.3. Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Sıvılaşma.....	32
2.3.1. Giriş.....	32
2.3.2. SPT-N değeri ve sıvılaşma.....	34
2.3.3. SPT – N değeri ile farklı zemin parametreleri arasındaki korelasyon.....	35
2.4. Sıvılaşma Tetikleme Çerçevesi.....	37
2.4.1. Deprem kaynaklı çevrimsel kesme gerilmesi.....	37
<u>2.4.1.1. Zemin tepki analizi yaklaşımı.....</u>	<u>38</u>
<u>2.4.1.2. Basitleştirilmiş yaklaşım.....</u>	<u>39</u>
2.4.2. Zeminin çevrimsel direnci.....	39
<u>2.4.2.1. Laboratuvar testi yaklaşımı.....</u>	<u>39</u>
<u>2.4.2.2. Saha testi yaklaşımı.....</u>	<u>40</u>

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.4.3. Sıvılaşmanın başlangıcı.....	41
2.5. Sıvılaşma Kaynaklı Yer Değiştirmesinin Mekanizması ve Korelasyonları	42
2.5.1. Yatay yayılma deformasyonu.....	43
2.5.1.1. Kalıcı kesme deformasyonlarının tahmini.....	43
2.5.1.2. Ampirik modellerle yer değiştirme tahmini.....	40
2.5.1.3. Newmark kayma bloğu analizi.....	40
2.5.1.4. Detaylı doğrusal olmayan analizler.....	41
2.5.2. Düşey yer değiştirme (Oturma).....	41
2.5.3. Oturmanın amperik formülleri.....	46
2.6. Sayısal Modelleme ve Sıvılaşma Simülasyonu	48
3. YÖNTEM.....	50
3.1. PLAXIS 2D Programı.....	50
3.1.1 Giriş.....	50
3.1.2 PLAXIS 2D'deki modlar.....	52
3.1.2.1. <u>Zemin modu(Soil mode)</u>	52
3.1.2.2. <u>Yapı modu(Structure mode)</u>	52
3.1.2.3. <u>Ağ modu(Mesh mode)</u>	52
3.1.2.4. <u>Akış durumu modu(Flow condition mode)</u>	53
3.1.2.5. <u>Kademeli inşaat modu(Staged construction mode)</u>	53

İÇİNDEKİLER

Sayfa

3.1.3 PLAXIS 2D Zemin Modelleri.....	53
<u>3.1.3.1. UBC3D-PLM modeli.....</u>	54
<u>3.1.3.2. Mohr-Coulomb modeli.....</u>	57
<u>3.1.3.3. Hardening soil modeli.....</u>	58
3.1.4 Çizgisel yer değıştirmesi tanımlama.....	58
3.1.5 Dinamik Yükleme.....	59
3.1.6 Dinamik Sınır Koşulları.....	61
<u>3.1.6.1. Free field sınır koşulu.....</u>	62
<u>3.1.6.2. Compliant base sınır koşulu.....</u>	63
3.1.7 Dinamik Analiz.....	63
3.2. Zemin Profili ve Zemin özellikleri	65
3.2.1. İdealize zemin profilleri (Arazi zemin modeli).....	67
3.3. PLAXIS'te Zemin Profilinin Modellenmesi.....	68
3.3.1 Zemin modeli.....	68
3.3.2 Zemin modeli parametreleri.....	69
3.3.3 Deprem verileri.....	69
3.3.4 Mesh üretimi.....	72
3.3.5 Yeraltı suyu seviyesi.....	73
3.3.6 Model koşulları.....	73

İÇİNDEKİLER

Sayfa

3.3.6.1. Sınır koşulları.....	74
3.3.6.2. Akış durumu.....	74
3.3.6.3. Deformasyon koşulları.....	74
3.4. Model Analizi.....	75
3.4.1 Analiz senaryoları.....	75
3.4.2 Analiz aşamaları.....	77
3.4.2.1. Başlangıç aşaması(Initial phase).....	77
3.4.2.2. Deprem aşaması(Earthquake phase).....	77
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	78
4.1. Ana Kaya Hareketi ve Zemin Tepkisi.....	79
4.2. Spektral İvme-Periyot Diyagramı.....	82
4.3. Sıvılaşma ve Aşırı Boşluk Su Basıncı Oluşumu	95
4.4. Sıvılaşma Kaynaklı Zemin Yer Değiştirmesi	111
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	122
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	125
EK AÇIKLAMALAR	
Ek Açıklama-A: Ana Kaya Hareketi ve Zemin Tepkisi	128

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Sıvılaşma kaynaklı temel oturması, Hualien, Tayvan (CNA, 2018).....	1
1.2. Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi (Alaska, 1964).....	2
2.1. Sıvılaşma kaynaklı kum kaynaması, Loma Prieta depremi (California, 1989).....	8
2.2. Niigata depreminde apartman binalarının eğilmesi (EERC, 1964).....	9
2.3. Showa Köprüsü'nün çökmesi, sıvılaşma ve yanal yayılmadan kaynaklandı (EERC, 1964).....	9
2.4. Merced Gölü kıyısındaki akma tipi sıvılaşma, San Francisco (USGS, 1957).....	10
2.5. El Centro depremde döngüsel mobilite tipi sıvılaşma (Hwy, 1979).....	10
2.6. Sıvılaşma sahasının episantr uzaklığı ile depremin moment büyüklüğü arasındaki ilişki (Ambraseys, 1988).....	12
2.7. Üç eksenli deneyde Gerilme-Deformasyon grafiği.....	15
2.8. Gerilme-Şekil değiştirme modülü (Bowles, 1997).....	15
2.9. Zemin kayma modülünün gerilme ile değişimi (Atkinson, 2000).....	17
2.10. Zemin kayma modülü değerlendirmesi için farklı testlerin sonuçları (Dyka, 2012).....	18
2.11. Normalleştirilmiş kayma modülü ile gerilim oranı arasındaki temsili korelasyonlar farklı sayıda çevrimde $DA=5\%$ 'e neden olur (Tokimatsu ve Uchida, 1990).....	19
2.12. Poisson oranının gösterimi (Bowles, 1997).....	20
2.13. Aynı etkili sınırlama basıncında gevşek ve yoğun kumlar için (a) Gerilim-şekil değiştirme ve (b) Gerilim-boşluk oranı eğrileri(Casagrande, 1936).....	21

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.14. Gevşek büzülme durumları ile yoğun genişleme durumları arasında bir sınır olarak CVR çizgisinin kullanımı (Casagrande, 1936).....	22
2.15. Akış sıvılaşmasına duyarlı olan ve olmayan başlangıç durumları arasında bir sınır olarak CVR çizgisinin kullanımı. (Casagrande, 1936).....	22
2.16. Kaba taneli Zeminler ve ince taneli zeminler için Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (Casagrande, 1936).....	23
2.17. Plastisite'nin aşırı boşluk su basınçları üzerindeki etkisi (Tamang, 2019).....	25
2.18. Su içeriğinin kohezyon ve kayma açısına ilişkin grafiği (Gusman, 2022).....	27
2.19. P - dalgalarının yayılması (Bolt, 1993).....	30
2.20. S - dalgalarının yayılması (Bolt, 1993).....	30
2.21. Kesme dalgası hızı ve en yüksek yer ivmesinden sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine ilişkin grafik (Stokoe ve diğerleri, 1988'den sonra.).....	31
2.22. Andrus and Stokoe (2000) CRRfield-Vs1 eğrisinin mevcut veri setleriyle karşılaştırılması (Baziar ve Alibolandi, 2024).....	31
2.23. Yarıklı kaşık örnekleme cihazının şematik diyagramı (Coduto, 2001).....	32
2.24. Donut çekiçle standart penetrasyon testinin gösterimi (Coduto, 2001).....	33
2.25. Sıvılaşmaya neden olan döngüsel gerilim oranları ile $M = 7.5$ depremlerindeki temiz kumlar için $(N_1)_{60}$ değerler arasındaki ilişki (Seed vd., 1975 sonrası).....	34
2.26. Sıvılaşmaya neden olan döngüsel gerilim oranları ile $M = 7.5$ depremlerindeki siltli kumlar için $(N_1)_{60}$ değerler arasındaki ilişki (Seed vd., 1975 sonrası).....	35
2.27. Farklı büyüklükteki depremler için eşdeğer düzgün gerilim çevrimlerinin sayısı, N_{eq} (Seed vd., 1975a sonrası).....	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.28. İzotropik olarak konsolide edilmiş üç eksenli numunelerinde ilk sıvılaşmayı ve %20 eksenel gerilmeyi üretmek için gereken döngüsel gerilmeler. (Seed ve Lee,1965'ten sonra.).....	40
2.29. Yükleme parametresi ve sıvılaşma direnci parametresinin kombinasyonlarını tipik gösteren grafik(Kramer, 1996).....	40
2.30. Yatay sarsıntı sırasında yer altındaki bir zemin elemanı üzerindeki döngüsel stresler (Idris ve Boulanger, 2008).....	41
2.31. Beklenen sıvılaşma bölgesi, deprem kaynaklı döngüsel gerilmelerin toprağın döngüsel dirençleriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir (Idris ve Boulanger, 2008).....	42
2.32. Yanal yayılmada karmaşık deformasyon desenleri (Rauch, 1997)	42
2.33. Bir yapının altındaki sıvılaşmış bölgelerin mekânsal dağılımı (Idris ve Boulanger, 2008).....	45
2.34. Doymuş kumlardaki hacimsel gerilmenin döngüsel gerilim oranı ve standart direncinden tahmini için grafik (Tokimatsu ve Seed'den sonra, 1987)	46
2.35. Temiz kumun sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyonunu, sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı veya maksimum kayma deformasyonu fonksiyonuna göre tahmin etmek için grafik. (Ishihara ve Yoshimine'dan sonra, 1992)	47
2.36. Sıvılaşmayı simüle etmek için bazı sayısal modeller	49
3.1. PLAXIS 2D ve 3D versiyonu (PLAXIS, 2010).....	51
3.2. PLAXIS 2D'nin kullanıcı arayüzü (PLAXIS, 2010).....	51
3.3. PLAXIS 2D'de mevcut lisans türleri(PLAXIS, 2010).....	52
3.4. Orijinal UBCSAND sertleştirme kuralı (Beaty ve Byrne, 1988).....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.5. Zemin yoğunlaşmasını, sıvılaşmada yumuşak geçişi ve sıvılaşma sonrası davranışı dahil etmek için iki akma yüzeyinin tanıtılması (Beaty ve Byrne, 1988).....	55
3.6. Elastik plastik bir modelin temel fikri (PLAXIS, 2010).....	57
3.7. Hardening Soil modelinde kullanılan hiperbolik gerilim-şekil değiştirme ilişkisi (Obrzud, 2010).....	58
3.8. Çizgisel yer değiştirmesi parametreleri(PLAXIS, 2010).....	59
3.9. PLAXIS'te Dinamik Çarpanları tanımlama (PLAXIS, 2010).....	60
3.10. PLAXIS'te ivmeölçerleri (accelerograms) tanımlama (PLAXIS, 2010).....	60
3.11. Dinamik analiz için model koşullarının tanımlanması (PLAXIS, 2010).....	61
3.12. Serbest alan sınır koşulunun şematik gösterimi (PLAXIS, 2024).....	62
3.13. Giriş ivme verilerinin ölçeklenmesi (PLAXIS, 2010).....	64
3.14. Zemin katmanlarının a.)SPT-N ve b.)Vs değerleri.....	66
3.15. İdealize zemin profili.....	67
3.16. İdealize zemin profili(PLAXIS 2D).....	68
3.17. On bir adet deprem yatay ivme veri seti(a-k).....	70
3.18. PLAXIS 2D 'de zemin profili modelinin ağ (Mesh) oluşturmaı	72
3.19. Zemin profili modelinin yeraltı su seviyesi	73
3.20. Analiz durumaları.....	76
4.1. Senaryo 4 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiğı	80
4.2. Senaryo 1- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiğı	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3. Senaryo 2- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	84
4.4. Senaryo 3- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği.....	85
4.5. Senaryo 4- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	86
4.6. Senaryo 5- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	87
4.7. Senaryo 6- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	88
4.8. Senaryo 7- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği.....	89
4.9. Senaryo 8- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	90
4.10. Senaryo 9- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	91
4.11. Senaryo 10- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği	92
4.12. Senaryo 11- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği.....	93
4.13. Senaryo 12- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği.....	94
4.14. Mor renk, PLAXIS 2D ‘de Katman 1’den Katman 12’ye kadar her katmanda meydana gelen sıvılaşmayı göstermektedir (Senaryo 1- Senaryo 12).....	95
4.15. Senaryo 1- R_u zaman grafiği.....	96
4.16. Senaryo 2- R_u zaman grafiği.....	97
4.17. Senaryo 3- R_u zaman grafiği.....	98
4.18. Senaryo 4- R_u zaman grafiği.....	99
4.19. Senaryo 5- R_u zaman grafiği.....	100
4.20. Senaryo 6- R_u zaman grafiği.....	101
4.21. Senaryo 7- R_u zaman grafiği.....	102
4.22. Senaryo 8- R_u zaman grafiği.....	103
4.23. Senaryo 9- R_u zaman grafiği.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.24. Senaryo 10- R_u zaman grafiği	105
4.25. Senaryo 11- R_u zaman grafiği	106
4.26. Senaryo 12- R_u zaman grafiği	107
4.27. PLAXIS tarafından Senaryo 4 için oluşturulan yanal yer değiştirme ve oturma- zaman grafiği- a.) kayıt 1, b.) kayıt 2 k.) kayıt 11	115
4.28. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla yanal yer değiştirme	117
4.29. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla zemin oturması	117
4.30. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla zemin oturmasının logaritmik regresyon..	118
4.31. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla yanal yer değiştirme ile zemin oturması arasındaki ilişki.....	120
4.32. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla yanal yer değiştirme ile zemin oturması arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon	120
A.1. Senaryo 1 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	129
A.2. Senaryo 2 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	131
A.3. Senaryo 3 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	133
A.4. Senaryo 4 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	135
A.5. Senaryo 5 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	137
A.6. Senaryo 6 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	139
A.7. Senaryo 7 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	141
A.8. Senaryo 8 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	143
A.9. Senaryo 9 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	145
A.10. Senaryo 10 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	147
A.11. Senaryo 11 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	149
A.12. Senaryo 12 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği.....	151

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Bazı zemin tiplerinin elastisite modülünü göstermektedir(Bowles,1997).....	17
2.2. Bazı tipik zeminlerin Poisson Oranını (Bowles , 1997).....	20
2.3. Plastisite düzeyinin plastik indeks değerine bağlı olduğunu göstermekte	24
2.4. Hacim değişimi ile plastisite indeksi arasındaki ilişki (Bowles,1997).....	25
2.5. Farklı zemin türlerinin birim hacim ağırlıkları (Zekkos, 2006).....	26
2.6. Bazı tipik zemin tiplerinin kohezyon değerini göstermekte (SN 670 010b).....	27
2.7 Tipik zemin tiplerinin sürtünme açısı (SN 670 010b).....	28
2.8. Toprağın geçirgenlik aralığı (Bowles,1997).....	29
2.9. Çeşitli zemin tipleri için SPT – N ve q_u 'nun E_s ile ilişkisi	36
2.10. Farklı SPT-N değerlerine sahip zeminlerin göreceli D_r , ϕ ve γ değerleri.....	36
2.11. Büyüklük düzeltmesi döngüsel stres yaklaşımı için faktörler(Kramer, 1996).....	46
3.1. UBC3D-PLM modelinin parametreleri aşağıda birimleriyle listelenmiştir (PLAXIS, 2011).....	56
3.2. Dinamik analiz için sınır koşullarının tanımlanması (PLAXIS, 2010).....	62
3.3. Sondaj Kuyuları Derinlik-koordinat-SPT Deney Sonuçları Bilgisi.....	65
3.4. UBC3D-PLM ve Hardening Soil modelinin zemin parametreleri	69
3.5. Analizde kullanılan deprem verilerinin özellikleri	72
3.6. Model sınır koşulları	74
3.7. Model sınır akış koşulları.....	74
3.8. Model sınır deformasyon koşulları	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

M_w	Deprem moment büyüklüğü
E	Elastisite Modülü
σ	Normal Gerilme
ε	Birim Şekil Değiştirme
τ	Kayma Gerilmesi
ρ	Yoğunluk
k	Geçirgenlik katsayısı
i	Hidrolik eğim
V_w	Su Hacmi
V_u	Hacimsel Su İçeriği
R_u	Aşırı boşluk suyu basıncı oranı
Δu	Aşırı boşluk suyu basıncı
$\sigma'_{v,0}$	Başlangıç düşey efektif örtü gerilmesi

Kisaltmalar

Açıklama

FLAC	Fast Lagrangian Analysis of Continua
FEA	Finite Element Analysis
EERC	Earthquake Engineering Research Center
RC/TS	Reinforced Concrete / Structural Systems
CVR	Critical Void Ratio

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Acıklama</u>
USCS	Unified Soil Classification System
SN	Swiss Norm
CRR	Cyclic Resistance Ratio
CSR	Cyclic Stress Ratio
ASTM	American Society for Testing and Materials
LEAP	Liquefaction Experiments and Analysis Project
FEM	Finite Element Method
FDM	Finite Difference Method
UBC-PLM	University of British Columbia 3D-PLAXIS Liquefaction Model
RD	Relative Density
YASS	Yer Altı Su Seviyesi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Deprem, insanlığın başlangıcından beri karşılaştığı en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Eski zamanlarda, gelişim daha azdı ve yapıların boyutu küçüktü, bu yüzden depremlerin neden olduğu yıkım da daha azdı. Ancak, altyapının gelişmesiyle birlikte depremlerin etkileri de daha yıkıcı hale gelmiş ve kritik bir çalışma alanı olmuştur. Ayrıca, depremler yalnızca kendi başlarına bir tehdit olmakla kalmaz, aynı zamanda sıvılaşma ve sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi gibi diğer tehditleri de tetikler.

Zemin sıvılaşması, özellikle deprem gibi dinamik yükleme sırasında aşırı boşluk suyu basıncının oluşması nedeniyle doymuş zeminin kayma dayanımını ve rijitliğini kaybederek sıvı gibi davranmasıdır. Sıvılaşma sonrası, zemin tabakası akışkan hale gelerek yapının yüzmesine neden olur ve bu durum yer değiştirme, dönme, eğilme ve oturmaya yol açar. Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesinin en kritik etkilerinden biri, Şekil 1.1’de gösterildiği gibi, yapıda düzensiz düşey yer değiştirmeler oluşturarak kolonlar, kirişler ve temeller gibi taşıyıcı elemanların dayanımını tehlikeye atabilmesidir. Ayrıca, her zemin tabakasının sıvılaşmaya yatkın olmadığı unutulmamalıdır. Bu nedenle, sıvılaşabilir tabakanın derinliği, yapının yer aldığı zemindeki yer değiştirme miktarında belirleyici bir rol oynar.



Şekil 1.1. Sıvılaşma kaynaklı temel oturması, Hualien, Tayvan (CNA, 2018)

Deprem ve sıvılaşma gibi ilgili görüngü incelenmesi, mühendislik bilimlerinin en yeni dallarından biridir. Sıvılaşmanın bilimsel araştırmaları, geçen yüzyılın sonlarına kadar başlamamıştır. Bunun birçok nedeni vardır ve bunlardan biri de depremin doğasının kendisinin bir engel oluşturmasıdır. Depremler, kendi içinde birçok karmaşık olguyu barındırır. Araştırmacılar, dünya genelinde meydana gelen gerçek depremlerden bilgi edinerek depremleri anlamaya başlamışlardır. Depremleri ve sıvılaşmayı laboratuvar ortamında simüle etmek oldukça zordur ve hatta sayısal modellemede bile birçok hipotez ve varsayım içermektedir.

Sismik zemin sıvılaşmasının ve sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesinin geoteknik mühendisliği açısından yıkıcı sonuçlarının farkına varılması, ancak iki büyük depremin ardından başlamıştır: 1964 Alaska Depremi ($M_w = 9.2$) (Şekil 1.2) ve 1964 Niigata Depremi ($M_w = 7.7$). Daha sonra, Seed ve Idriss (1971) gibi araştırmacılar ve ardından Seed ve diğerleri (1984, 1985), sismik zemin sıvılaşmasının başlangıcını ve buna bağlı yer değiştirmeyi tahmin etmek için deterministik ampirik korelasyonlar geliştirmeye başlamışlardır. PLAXIS 2D, FLAC gibi hesaplama araçlarındaki ilerlemeler sayesinde sıvılaşma ve oturma tahmini için sayısal modelleme giderek gelişse de sıvılaşabilir tabaka derinliği ile oturma arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır.



Şekil 1.2. Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi (Alaska, 1964)

Bu çalışmada, sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi kapsamında, zeminin sıvılaşabilir tabaka derinliği ile zemin yer değiştirmesi arasındaki ilişki incelenmektedir. Amaç, sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesinin önemli hasarlara yol açabileceği kritik sıvılaşabilir derinliği belirlemektir. Bu tür hasarlar arasında şev göçmeleri, temel arızaları ve yapıların yüzmesi gibi durumlar yer almaktadır. Örneğin, düşey yer değiştirme 100 mm eşik değerini aştığında, zemin iyileştirme önlemleri gerekmektedir. Benzer şekilde, sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesinin ihmal edilebilir seviyede olduğu kritik derinliğin ötesinde herhangi bir mühendislik önlemi almaya gerek yoktur. Bu nedenle, sismik yükleme altında tipik bir zemin profili için kritik sıvılaşabilir tabaka derinliği belirlenmeye çalışılmaktadır.

Bu amacı gerçekleştirmek için, yaygın olarak kullanılan Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) tabanlı yazılım olan PLAXIS 2D ile sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Ayrıca, farklı akademik çalışmalarda geliştirilen ampirik formüller kullanılarak yer değiştirme hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak daha kapsamlı bir analiz sunulmaktadır. Bu tez, farklı frekans, süre, PGA ve periyot değeri olan deprem veri setleri üzerinde çalışarak, sıvılaşabilir tabakanın konumuna bağlı olarak sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesiyle ilgili belirli eğilim ve kalıpları tespit etmeyi amaçlamaktadır.

Bu analizde, zemin profili üzerinde yalnızca bir tabakanın sıvılaşabilir olduğu, diğerlerinin ise sıvılaşmaya dirençli olduğu bir çalışma kapsamı belirlenmiştir. PLAXIS 2D'de toplam 30 metre derinliğinde ve 100 metre genişliğinde 13 katmanlı bir zemin modeli oluşturulmuştur. İlk 12 katman 1.5 metre kalınlığında olup son katman yüksek SPT değerine sahip 12 metre kalınlığındadır. Katmanların çoğu kil, bazıları silt iken sıvılaşabilir tabaka iyi derecelenmiş kumdan oluşmaktadır. Çalışma, sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi ile sıvılaşabilir tabakanın derinliği arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçladığından, sıvılaşabilir tabakanın zemin seviyesinden artan mesafelerle karakterize edilen farklı profiller, sismik yükleme altında sıvılaşma duyarlılığı ve ilişkili yer değiştirme açısından incelenmiştir. Toplamda 12 farklı durum analiz edilmiş olup, örneğin Durum 1'de sıvılaşabilir tabaka ilk katmanda, Durum 2'de ikinci katmanda yer alacak şekilde her bir durumda derinlik 1.5 metre artırılmıştır.

Ayrıca, kapsamlı sonuçlar için her durum farklı frekans, maksimum yer ivmesi (PGA), periyot ve süreye sahip 11 sismik yükleme altında test edilmiş. Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesinin incelenmesi, deprem dayanıklı yapıların tasarlanması, zemin iyileştirme çalışmalarının yapılması ve sismik tehlikelerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Sıvılaşma etkisini belirleyen birçok faktör arasında, sıvılaşabilir tabakanın derinliği en kritik etkenlerden biridir. Bu çalışma, saha araştırmalarının yalnızca belirli bir kritik derinliğe kadar yapılmasını sağlayarak projelerin daha ekonomik hale gelmesine ve zamandan tasarruf edilmesine katkıda bulunabilir. Kritik Sıvılaşabilir Tabaka Derinliği (KSTD), zemin iyileştirmesi gerekip gerekmediğini belirleyen temel faktördür. Eğer düşey oturma 100 mm'den az ise zemin iyileştirmesi gerekli değildir. Ancak bazı durumlarda, sıvılaşabilir tabakanın derinliği bir bölgede tehdit oluştururken, farklı zemin profili bileşimi ve farklı sismik dalgalar nedeniyle başka bir bölgede aynı derecede risk teşkil etmeyebilir.

Ayrıca, bu çalışmanın bulguları özellikle deprem tehlikesi değerlendirmesiyle ilgilenen jeoteknik mühendisler, şehir plancıları ve politika yapıcılar için önemli bir rehber niteliğindedir. Sayısal modelleme ile ampirik formüller arasındaki karşılaştırmalı analiz, jeoteknik deprem mühendisliğinde doğal olayların yalnızca sayısal simülasyonlara dayanarak tahmin edilmesinin güvenilirliğini sorgulamaktadır.

Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi ile ilgili bu tezin kapsamlı detaylarına rağmen, bazı kısıtlamaların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. PLAXIS 2D, iki boyutlu bir çalışma yaklaşımı sunduğundan, PLAXIS 3D kadar kapsamlı bir görselleştirme ve tüm yönleriyle kavrayış sağlamak mümkün olmayabilir. Ayrıca, çalışmada homojen zemin özelliklerine sahip basitleştirilmiş bir zemin profili kullanılmış olup, bu durum gerçek dünya zemin davranışını ve sahada karşılaşılan doğal değişkenliği tam olarak yansıtmayabilir. Bu araştırmada sıvılaşmanın diğer etkileri, örneğin yatay yayılma (lateral spreading), dikkate alınmamıştır.

Analiz için on bir farklı deprem veri seti kullanılmış olsa da bu sayının dünya genelindeki tüm sismik olayları kapsayacak kadar geniş bir genelleme yapmaya yeterli olduğu söylenemez. Ayrıca, çalışmada her analiz setinde yalnızca tek bir sıvılaşabilir tabaka olduğu varsayılmıştır, ancak gerçek olaylarda birden fazla tabaka aynı anda sıvılaşabilir. Jeoteknik deprem mühendisliğinde sıvılaşma gibi olgular hâlâ yeni çalışma alanlarıdır ve

büyük ölçüde eksik teorilere, varsayımlara ve ampirik korelasyonlara dayanmaktadır. Bu alanda hâlâ keşfedilmesi, incelenmesi ve düzeltilmesi gereken birçok kavram bulunmaktadır. Tezin kapsamı ve içeriği aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

Bu giriş bölümünün ardından, 2. bölümde sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmeleri ile ilgili literatür taraması sunulmaktadır. Bu bölümde, sıvılaşma olgusu ayrıntılı olarak ele alınarak sıvılaşma potansiyelini etkileyen zemin özellikleri, bu özelliklerin belirlenmesinde SPT-N değerinin kullanımı, sıvılaşmanın tetiklenme çerçevesi, sıvılaşmanın başlangıcı, sıvılaşma mekanizması ve sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi arasındaki korelasyon gibi konular incelenmektedir. Ayrıca, depremler sırasında sıvılaşmanın sayısal modellenmesi ve simülasyonu gibi konular da tartışılmaktadır.

3. bölümde, PLAXIS 2D yazılımı tanıtılmakta ve PLAXIS 2D’de bulunan gelişmiş ve modern zemin modelleri, gerçek bir depremi simüle etmek için kullanılan sınır koşulları, dinamik hat yer değiştirmesi, dinamik analiz yöntemleri, modelin geometrisi, saha testlerinden elde edilen zemin özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca, PLAXIS 2D’de modelin oluşturulması, deprem verilerinin modele atanması, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) için ağ (mesh) oluşturma süreci ve diğer analiz aşamaları kapsamlı bir şekilde incelenmektedir.

4. bölümde, araştırmada elde edilen bulguların özetlendiği ve bu bulguların ne anlama geldiğinin tartışıldığı ifade edilmiştir. Sayısal yöntemlerle (PLAXIS 2D) ve ampirik ilişkilerle ulaşılan verilerin karşılaştırıldığı, hangi koşullarda hangi yöntemin daha güvenilir sonuçlar verdiğinin değerlendirildiği belirtilmiştir. Her bir senaryoda ana kaya hareketi ve bunun zemin tepkisi grafiklerle sunulmuş ve yorumlanmıştır. Sismik yükleme süresi boyunca aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu incelenmiş, maksimum yer ivmesi (PGA) zamanlaması ile başlangıç sıvılaşması arasındaki ilişki haritalandırılmaya çalışılmıştır.

Deprem boyunca aşırı boşluk suyu basınç oranı (R_u) değerindeki değişimi göstermek için R_u -zaman grafiği sunulmuştur. Benzer şekilde, sıvılaşma nedeniyle oluşan yatay ve düşey yer değiştirme değerleri her durum için kaydedilerek grafiklendirilmiştir.

5. bölümde, çalışmada elde edilen önemli bulguların özetlendiği ve bu bulgular doğrultusunda yapılabilecek uygulamalara yönelik önerilerde bulunulduğu ifade edilmektedir. Araştırmacının, sıvılaştırılabilir zemin tabakasının derinliğine bağlı olarak düşey ve yatay yer değiştirme miktarlarının değiştiğini ve sadece belirli bir sınırın içinde yer değiştirme gözlemlendiğinde zemin iyileştirmesinin gerekli olduğunu söylediği aktarılmıştır. Ayrıca, sayısal modelleme sonuçlarının daha güvenilir ve ayrıntılı veriler sunduğu, bu nedenle mühendislik uygulamalarında tercih edilmesi gerektiği yönünde görüş bildirdiği belirtilmiştir. Elde edilen bulguların, benzer zemin koşullarında yapılacak projelerde rehber niteliğinde olabileceği vurgulanmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Sıvılaşma Olgusu

Geoteknik deprem mühendisliğinde "sıvılaşma" terimi, birbiriyle ilişkili ancak farklı olayları tanımlamak için kullanılır. Basitçe ifade etmek gerekirse, sıvılaşma; zeminin geçici olarak sıvı gibi davranması ve bu durumun yapıların yüzmesine yol açabilmesidir. Sıvılaşma sırasında, kum gibi kohezyonsuz zeminlerde boşluk suyu basıncı, etkin gerilmenin sıfıra düşeceği seviyeye kadar artar ve zemin taneleri arasındaki bağ tamamen kaybolur. Bu nedenle zemin, sıvı benzeri bir davranış sergilemeye başlar. Sıvılaşma genellikle kumlu zeminlerde gözlemlenir, ancak son çalışmalar siltli kum ve çakıllı zeminlerde de gerçekleşebileceğini ortaya koymaktadır(Kramer, 1994).

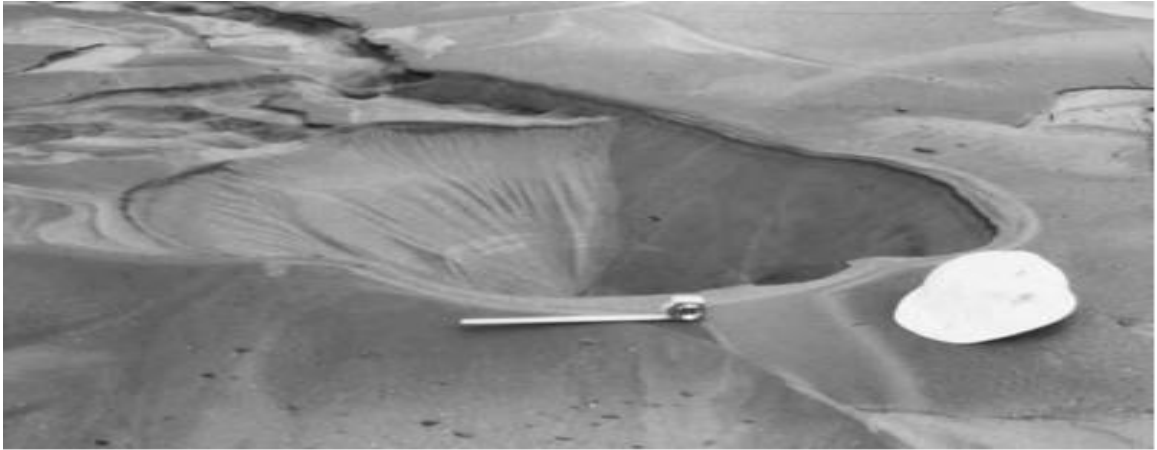
Zemin içindeki boşluklar, doymun durumdaki zeminlerde genellikle su ile doludur. Bu boşluklarda bulunan su, boşluk suyu basıncı olarak adlandırılan bir basınç uygular. Bu basınç, özellikle sıvılaşma sırasında zemin davranışında kritik bir rol oynar. Kumlu zeminler, döngüsel yükleme (deprem gibi) sırasında sıkışma eğilimi gösterir ve bu sıkışma aşırı boşluk suyu basıncı oluşumuna yol açar. Aşırı boşluk suyu basıncı, zemin profilindeki bir noktanın başlangıç düşey efektif örtü gerilmesini aşarsa, sıvılaşma meydana gelir. Bu durumda zemin, kesme mukavemetini tamamen kaybeder ve sıvı benzeri davranış sergiler. Sıvılaşmanın boşluk suyu basıncı kriterini incelemek için aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u) adı verilen yeni bir parametre tanımlanmıştır. Bu oran, basitçe aşırı boşluk suyu basıncının (Δu) başlangıç düşey efektif örtü gerilmesine ($\sigma'_{v,o}$) bölünmesiyle hesaplanır. Eğer $R_u = 0.9$ ile 1 arasında ise, sıvılaşma tetiklenmiş olur ve buna başlangıç sıvılaşması denir.(Jiaer et al., 2004)

$$R_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,o}} \quad (2.1)$$

Depremler, tarih boyunca tanık olunduğu üzere büyük yıkımlara yol açabilen yıkıcı bir güçtür. Ancak depremler, aynı zamanda heyelan, tsunami ve en önemlisi sıvılaşma gibi diğer afetleri de tetikleyebilir. Özellikle kumlu zeminlerde, deprem sırasında yapılarda

meydana gelen hasarın en ciddi sebeplerinden birinin sıvılaşma olduğu da iddia edilebilir. Tüm sıvılaşma olaylarının temelinde, drenajsız (suyun zemin dışına çıkamadığı) koşullar altında uygulanan döngüsel yükleme sonucu aşırı boşluk suyu basıncı oluşması yatar. Kum veya diğer iri taneli zemin tabakalarında, bu tür zeminler doygun hâldeyken ve drenajsız koşullarda ani yükleme meydana geldiğinde, sıkılaşma (yoğunlaşma) riski her zaman vardır. Sıkılaşma eğilimi, aşırı boşluk suyu basıncının artmasına yol açar. Sonuç olarak, zemin içindeki etkin yanal gerilmeler azalır; bu da zeminin mukavemet ve sertliğini kaybederek deformasyona uğramasına neden olur. Sıvılaşmanın yüzeydeki yaygın belirtileri arasında kum kaynamaları veya çamur birikintileri oluşumu sayılabilir.

Depremlerin tarihi, insanlık tarihi kadar eski hatta ondan da öncesine dayanır. Ancak depremlerin bilimsel olarak incelenmesi, son yüzyıldan önce başlamamıştır. Benzer şekilde, sıvılaşma da geoteknik mühendislerin araştırma konusu hâline gelmiş ve tüm dünyada dikkatleri üzerine çekmiştir. Bu ilgi, 1964 yılında üç aylık bir süre içinde Alaska'daki Büyük Cuma Depremi ($M_w = 9.2$) ile Japonya'daki Niigata Depremi'nin ($M_w = 7.5$) ardından artmıştır. Tarihte bu iki deprem, sıvılaşma kaynaklı hasarları net bir şekilde gözler önüne seren ilk önemli olaylardır. Depremlerde; yamaç göçmeleri, köprü ve bina temellerinde çökmeler, yüzen yapılar gibi hasarlar gözlemlenmiştir (Şekil 2.1- Şekil 2.3). Bu depremlerin üzerinden geçen 60 yılda, dünya çapında binlerce araştırmacı tarafından kapsamlı çalışmalar ve araştırmalar yapılmıştır. Yeni terimler tanımlanmış, çok sayıda bilimsel makale yayımlanmıştır. Sıvılaşma hakkında pek çok şey öğrenilmiş olsa da hâlâ keşfedilmeyi bekleyen pek çok bilinmeyen bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Sıvılaşma kaynaklı kum kaynaması, Loma Prieta depremi (California, 1989)



Şekil 2.2. Niigata depremi sonucu sıvılaşmış zeminde gömülü tankın yüzmesi (Kawasuni, 1968)



Şekil 2.3: Showa Köprüsü'nün çökmesi, sıvılaşma ve yanal yayılmadan kaynaklandı (EERC, 1964)

Sıvılaşma, oldukça karmaşık bir doğa olayıdır. İçerisinde akma tipi sıvılaşma ve döngüsel mobilite gibi birçok alt olay, terim ve kavram barındırır. Akma tipi sıvılaşma, zemine uygulanan kesme gerilmesinin zeminin kesme mukavemeti sınırını aşması durumudur. Bu durum, akma kaymasına yol açarak geniş zemin kütlelerinde deformasyon oluşturabilir (Şekil 2.4). Ani gelişen ve geniş çaplı bir olaydır; sıvılaşmayla ilişkili diğer olaylara kıyasla çok daha fazla yıkıma neden olur. Akma tipi sıvılaşma, çeşitli şekillerde başlayabilir.

Örnek olarak doğal zemin tabakalarında gözlemlenen monotonik yükleme (statik sıvılaşma) ile tetiklenebilir (Koppejan ve diğ., 1948; Andersen ve Bjerrum, 1968; Bjerrum, 1971; Kramer, 1988). Ayrıca, deprem kaynaklı titreşimlerin yanı sıra kazık çakma (Jakobsen, 1952; Broms ve Bennermark, 1967) veya tren trafiği (Fellenius, 1953) gibi deprem dışı titreşim kaynaklarıyla da ortaya çıkabilir.



Şekil 2.4. Merced Gölü kıyısındaki akma tipi sıvılaşma, San Francisco (USGS, 1957)



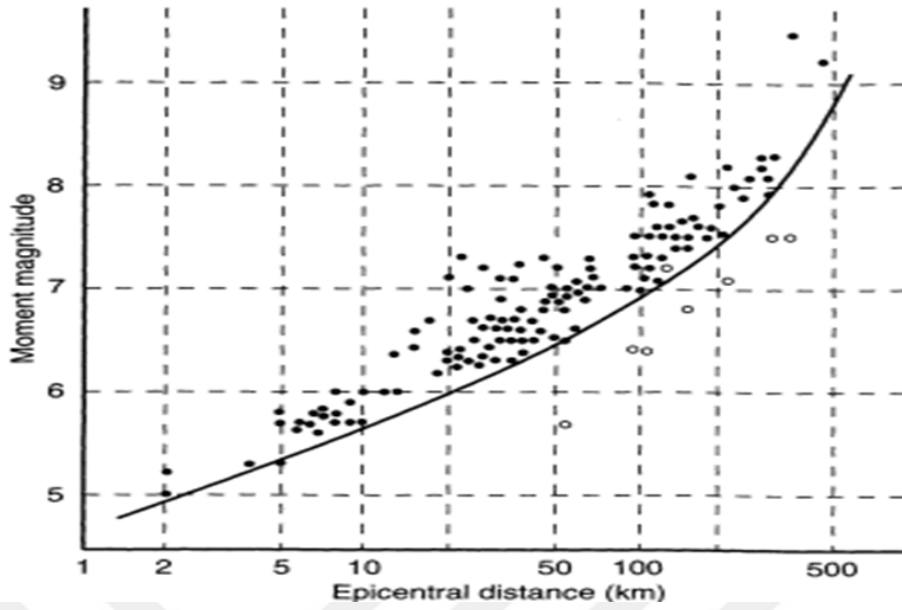
Şekil 2.5. El Centro depremde döngüsel mobilite tipi sıvılaşma (Hwy, 1979)

Akma tipi sıvılaşmanın aksine, döngüsel mobilite yalnızca deprem sırasında gerçekleşebilir. Uygulanan döngüsel kesme gerilmesi, zeminin kesme mukavemetinden düşük olsa bile bu olay tetiklenebilir (Şekil 2.5). Aynı zamanda büyük ölçekli kalıcı hasarlara yol açabilir. Özellikle su kütlelerine yakın hafif eğimli arazilerde yanal yayılmaya (lateral spreading) neden olur.

Sıvılaşma tehlikeleri, bu alanda çalışan araştırmacılar tarafından önerilen çeşitli yöntemlerle değerlendirilmeli ve ortadan kaldırılmalıdır. Bu çalışmada, sıvılaşma riskini sistematik olarak analiz etmek amacıyla farklı kaynaklardan derlenen bir dizi soru şu şekilde tasarlanmıştır:

1. Zemin, sıvılaşmaya duyarlılık kriterlerini karşılıyor mu?
2. Zemin sıvılaşmaya duyarlıysa, tasarım yer hareketi sıvılaşmayı tetikleyebilecek mi?
3. Sıvılaşma tetiklenirse, sonuçları ne olacak? (Tahmin)
4. Olası hasarı önlemek için hangi hafifletme mekanizmaları uygulanabilir?

Sıvılaşma tehlikesinin değerlendirilmesinde ilk ve en önemli adım, zeminin sıvılaşmaya duyarlı olup olmadığının belirlenmesidir. Zemin duyarlı değilse, sıvılaşma gerçekleşmeyecek ve herhangi bir zemin iyileştirme çalışması yapılmasına gerek kalmayacaktır. Benzer şekilde, zeminin sıvılaşmaya duyarlı kabul edilebilmesi için belirli kriterleri sağlaması gerekmektedir. İlk kriter tarihsel kriterlerdir. Daha önce sıvılaşmaya maruz kalmış bir zemin profili, gelecekteki sismik olaylarda büyük olasılıkla yeniden sıvılaşma gösterebilir. Bu nedenle, bir bölgenin sıvılaşmaya duyarlılığı incelenirken, zemin profili ve yer altı suyu koşulları değişmediği sürece tarihsel kayıtlar yol gösterici olabilir (Youd, 1984). Sıvılaşma yaşayan bir zemin profilinde, zeminin kesme mukavemeti belirgin şekilde azalır. Düşük şiddetli sismik yükleme sırasında bile kesme gerilmesi, mukavemet sınırını aşabilir. Ayrıca, birçok çalışmada sıvılaşmanın genellikle belirli bir episantr mesafesi içinde (Şekil 2.6) meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.6. Sıvılaşma sahasının episantr uzaklığı ile depremin moment büyüklüğü arasındaki ilişki (Ambraseys, 1988)

İkinci kriter yer altı suyu kriterleridir. Sıvılaşma yalnızca doymun zeminlerde gerçekleşebilir. Dolayısıyla, yer altı suyu seviyeleri, zeminin sıvılaşmaya duyarlı hâle gelmesinde kritik bir rol oynar. Yer altı suyu seviyesinin yüzeye yakınlığı arttıkça (derinliği azaldıkça), sıvılaşmaya duyarlılık da artar. Su kütlelerine yakın bölgeler gibi yer altı suyu seviyesi yüksek olan alanlar, sismik yükleme sırasında sıvılaşma riski taşır. Ayrıca, kumlu zemin tabakalarının olduğu jeolojik süreçler de sıvılaşma duyarlılığını etkiler. Gevşek zemin tabakaları ve tekdüze tane boyutu dağılımı, sıvılaşmanın tipik belirtileridir. Eski zemin tabakaları, yeni olanlara kıyasla sıvılaşmaya daha az eğilimlidir (Youd ve Hoose, 1977).

Üçüncü kriter ise zeminin bileşimsel özellikleridir. Zeminin bileşimsel karakteristikleri, sıvılaşmadan sorumlu olan hacim değişimi davranışını doğrudan etkiler. Geçmişte, yalnızca kumlu zeminlerin sıvılaşmaya duyarlı olduğu varsayılıyordu; çünkü silt ve kilin yeterli boşluk suyu basıncı oluşturamayacağı düşünülüyordu. Benzer şekilde, iri taneli zeminlerin fazla geçirgen olduğu ve boşluk suyu basıncını koruyamayacağı kabul ediliyordu. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar ve saha verileri, sıvılaşmanın yalnızca tane boyutuna değil, aynı zamanda plastisiteye de bağlı olduğunu kanıtlamıştır (Ishihara, 1984). Sıvılaşma, siltli zeminlerde ve hatta kumlu çakıl gibi iri taneli zeminlerde de gözlemlenebilir. Ayrıca, kil zeminlerde bile sıvılaşmaya benzer gerilme

yumuşaması (strain-softening) davranışı görülebilir. Benzer şekilde, iyi derecelenmiş (well-graded) zemin tabakaları, kötü derecelenmiş (poorly-graded) zeminlere kıyasla sıvılaşmaya daha az eğilimlidir. Yuvarlak taneli zeminler ise hızlı sıkışma eğilimi gösterdiğinden sıvılaşma riski taşır.

Dördüncü kriter başlangıç koşullarıdır. Deprem başlangıcındaki zemin profiline ait başlangıç koşulları, sıvılaşma duyarlılığını önemli ölçüde etkiler. Başlangıç gerilme koşullarının hesaplanması gereklidir. Yüksek başlangıç gerilmesine sahip zeminlerde sıvılaşma daha kolay gerçekleşebilir. Daha sıkı (yoğun) zeminler ise sıvılaşmaya karşı daha dirençlidir.

Sıvılaşma, birçok araştırma ve saha verisinin gösterdiği gibi çeşitli şekillerde tetiklenebilse de aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu sıvılaşmanın başlamasındaki temel unsurdur. Boşluk suyu basıncında artış olmadan, etkin gerilme sabit kalacaktır. Dolayısıyla ne akma tipi sıvılaşma ne de döngüsel mobilite meydana gelebilir. Ancak farklı olayların oluşması, farklı seviyelerde boşluk suyu basıncı gerektirebilir. Drenajsız doğal koşullar, sahadaki boşluk suyu basıncının artmasına imkân tanır. Döngüsel mobilite yalnızca sismik yükleme ile tetiklenebilirken, akma tipi sıvılaşma hem döngüsel hem de statik yükleme ile başlayabilir. Bu olay, statik sıvılaşmaya yol açan monotonik yükleme sırasında da gerçekleşebilir. Statik sıvılaşma, genellikle sıvılaşma mekanizmalarını anlamak amacıyla incelenir. Sıvılaşmanın başlangıcını araştırmak için kullanılan döngüsel gerilme yaklaşımı (cyclic stress approach) ve döngüsel deformasyon yaklaşımı (cyclic strain approach) gibi iki temel yöntem mevcuttur ve bu yöntemler sonraki bölümlerde detaylı olarak tartışılacaktır.

Sıvılaşma olayları sırasında ve sonrasında birçok yıkıcı etki gözlemlenebilir. Bu etkiler arasında; hafif eğimli arazilerden set şevlerine kadar zemin kütlelerinde stabilite kaybı ve deformasyon, istinat duvarlarına etkiyen yanal basıncın artması hem sığ hem de derin temellerin taşıma kapasitesinin azalması, gömülü yapılar veya kazıklarda yanal desteğin kaybolması, tünellerin ve gömülü boruların yüzmesi, yapılarda farklı oturmalar gibi durumlar sayılabilir. Bu yıkımların büyüklüğü temel olarak; zemin özellikleri, sismik olayda

hareket karakteristikleri, saha stratigrafisi ve topoğrafyası, saha koşulları ve bölgedeki yapı türlerine bağlıdır. Sıvılaşmanın teknik etkileri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

1. Zemin hareketinin değişimi ve Zemin kesme mukavemetinin azalması
2. Kum kaynamalarının oluşumu
3. Doygun kum tabakalarında oturma
4. Şev stabilitesinin bozulması ve Yanal yayılma

2.2. Sıvılaşmayı Etkileyen Zemin Özellikleri

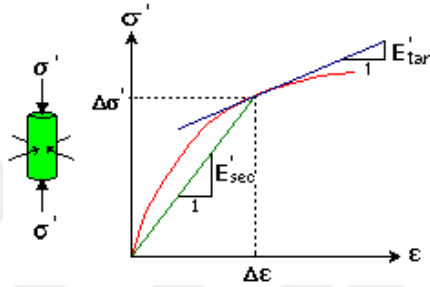
Zemin özellikleri, özellikle dinamik özellikler, sıvılaşma çalışmalarında büyük önem taşır. Sıvılaşmanın yol açtığı hasarın büyüklüğü, türü ve dağılımı, temelde zeminin sismik yükleme sırasındaki davranışına bağlıdır. Dinamik yükleme sırasında zemin davranışının; rijitlik, tane boyutu dağılımı, kohezyon, geçirgenlik gibi özelliklerden önemli ölçüde etkilendiği açıktır. Özellikle sıvılaşma söz konusu olduğunda, boşluk oranı ve boşluk suyu basıncı gelişimi kritik rol oynar. Farklı zemin özellikleri, farklı problemlerde zemin davranışını etkiler. Geoteknik deprem mühendisliği; çeşitli yükleme türlerini ve potansiyel göçme mekanizmalarını kapsayan geniş bir problem yelpazesini ele alır. Bu bölümde, dinamik yükleme ve sıvılaşma olgusunu etkileyen zemin özellikleri kısaca şu şekilde tartışılacaktır:

1. Zeminin rijitliği
2. Poisson's oranı
3. Boşluk oranı ve Porozite
4. Tane boyutu ve Zemin sınıflandırması
5. Plastisite
6. Birim hacim ağırlık
7. Kohezyon
8. Sürtünme açısı
9. Zemin doygunluğu
10. Yer altı su seviyesi
11. Geçmiş gerilme ve konsolidasyon durumu
12. Sismik Etki
13. Dalga hızı

2.2.1. Zeminin rijitliği

Zeminin rijitliği, gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade eder. Gerilme arttıkça veya azaldıkça, zemin numunesi deformasyona bağlı olarak şekil ve boyut değiştirme eğilimi gösterir. 'E' ile sembolize edilen rijitlik, aşağıdaki şekil 2.7'de gösterilen gerilme-deformasyon eğrisinin eğimidir. Bu ilişki şu şekilde yazılabilir:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2.2)$$



şekil 2.7. Üç eksenli deneyde Gerilme-Deformasyon grafiği

Zemin tabakasının rijitliği, geoteknik modellemede önemli bir özelliktir. Zeminin mekanik özelliklerinin şeklini, deformasyon ve oturma değerlerini doğrudan etkiler. Zemin rijitliği için sabit bir değer elde etmek zordur; çünkü gerilme veya deformasyon arttıkça zemin modülü değerleri azalır. Ancak zemin rijitliğinin ölçülmesi, zeminin elastikiyet, rijitlik ve sıkışmazlık varsayımları hakkında bilgi sağlar. Üç temel rijitlik modülü bulunur ve bunlar aşağıda tartışılacaktır:

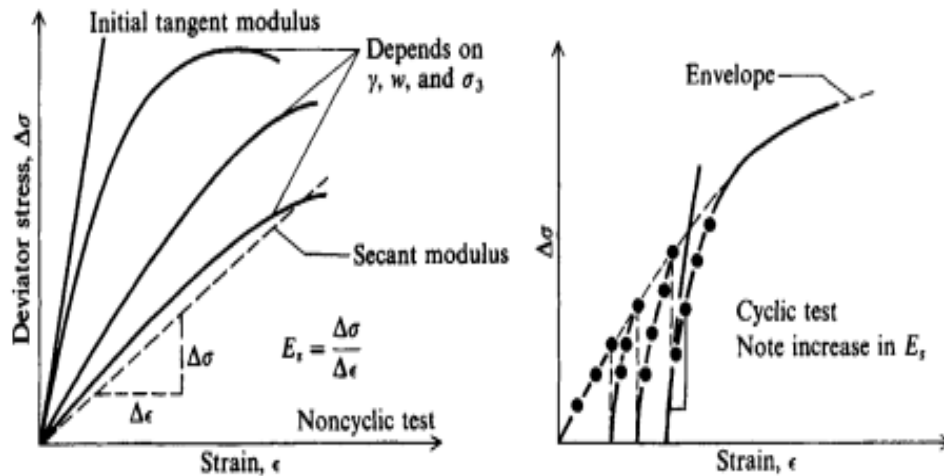
2.2.1.1. Elastisite modülü

Elastisite Modülü (Young Modülü), zeminin normal gerilme altında gösterdiği gerilme ile deformasyon oranını temsil eder. Malzeme biliminde oldukça kritik ve önemli bir kavramdır. Genellikle bir malzemenin rijitlik büyüklüğünü gösterir. Geoteknik mühendisliğinde, bir zemin tabakasının elastisite modülü; temel tasarımı, şev stabilitesi, istinat duvarları, sıvılaşma, oturma analizi gibi birçok alanda kullanılır. Aynı zamanda, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ile zemin davranışını analiz ederken kapsamlı bir girdi parametresidir. Zeminin elastisite modülü; üç eksenli basınç testleri, serbest basınç

testleri gibi laboratuvar deneylerinden veya Standart Penetrasyon Testi (SPT), Koni Penetrasyon Testi (CPT) gibi saha testlerinden elde edilebilir. Genel olarak, zemin rijitliği ve elastisite modülü, zeminin kıvamı ve sıklık derecesine bağlıdır.

Hooke'un genelleştirilmiş gerilme-gerinim yasası, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, zemin mekaniğinde gerilme ve oturma problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılır. Sol grafikte, döngüsel olmayan yükleme sırasında gerilme-gerinim ilişkisi gösterilmektedir; burada deviator gerilmesi ($\Delta\sigma$), şekil değiştirme (ϵ) karşısında çizilmiştir. Grafikte başlangıç teğet modülü, eğrinin başlangıçtaki eğimi olarak belirtilirken, sekant modülü ise belirli bir gerinim aralığında malzeme rijitliğini temsil eder. Modül, kayma gerinimi (γ), su içeriği (w) ve çevresel basınç (σ_3) gibi faktörlerden etkilenir. Farklı eğriler, bu parametrelere bağlı olarak değişen rijitliği gösterir. Bu grafik, tek yönlü yükleme altında zeminin deformasyon davranışını anlamada kullanılır.

Sağ grafikte (Şekil 2.8), döngüsel yükleme altında gerilme-gerinim davranışı gösterilmekte olup, birden fazla yükleme ve boşaltma döngüsü sonucunda histerezis döngüleri oluşur. Zarf eğrisi, genel gerilme-gerinim eğilimini gösterirken, modül (E_s), malzeme sertleşmesi nedeniyle zamanla artar. Bu durum, tekrar eden yüklemelerle birlikte zeminin rijitlik kazandığını ifade eder ve deprem mühendisliği açısından önemli bir faktördür. Grafik, Döngüsel yüklerin zemin tepkisini nasıl etkilediğini gösterir. Bu davranışın anlaşılması, temel ve sismik tasarım için büyük önem taşır.



(a) Stress-strain modulus.

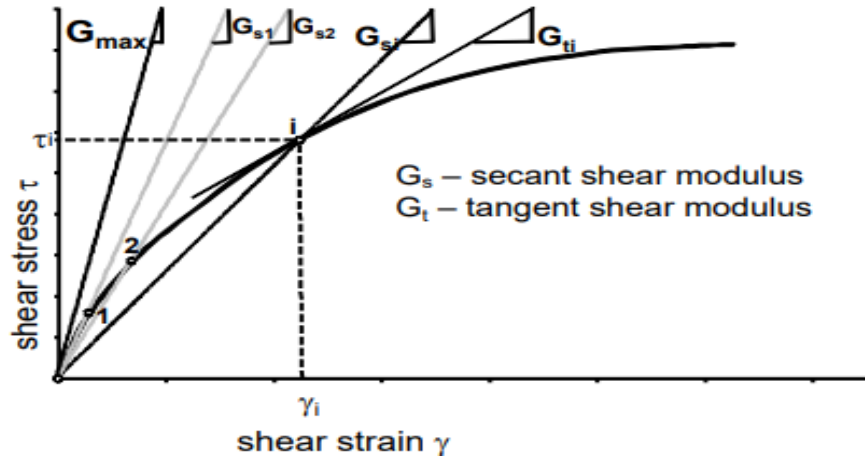
Şekil 2.8. Gerilme-Şekil değiştirme modülü (Bowles, 1997)

Çizelge 2.1. Bazı zemin tiplerinin elastisite modülü.

Zemin		E_s (MPa)
Kil	Çok yumuşak	2 – 15
	Yumuşak	5 – 25
	Orta	15 – 50
	Sert	50 – 100
	Kumlu	25 – 250
Buzul Çökeli	Gevşek	10 – 150
	Sıkı	150 – 720
	Çok sıkı	500 – 1440
Lös		15 – 60
Kum	Gevşek	10 – 25
	Sıkı	50 – 81
	Silti	5 – 20
Kum ve Çakıl	Gevşek	50 – 150
	Sıkı	100 – 200
Şeyl		150 – 5000
Silt		2 – 20

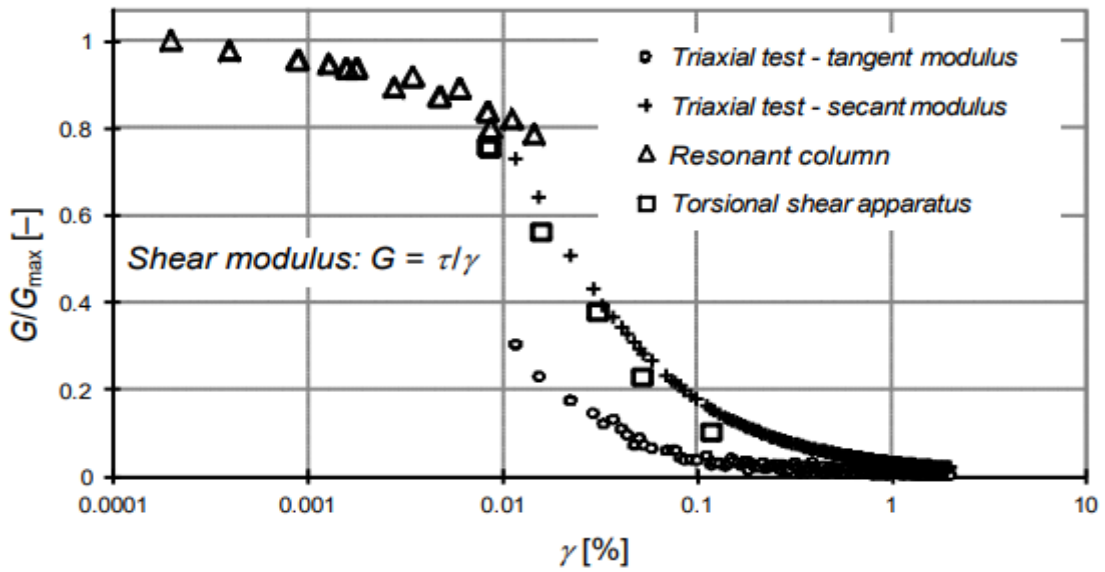
2.2.1.2. Kesme modülü (Rijitlik)

Kesme modülü (Kirchhoff modülü, G), kesme gerilmesindeki değişim ile kesme deformasyonu arasındaki oranı ifade eder. Poisson oranından (μ) bağımsız olması nedeniyle, zemin modellemesinde sıklıkla kullanılır. Kesme modülü, aşağıdaki Şekil 2.9’de gösterildiği gibi üç alt sınıfa ayrılır: Başlangıç Kesme Modülü ($G_{\max}$), Sekant Kesme Modülü (G_s), Teğet Kesme Modülü (G_t).



Şekil 2.9. Zemin kayma modülünün gerilme ile değişimi (Atkinson, 2000)

Çok düşük gerilme ve deformasyon seviyelerinde, kesme modülüne başlangıç kesme modülü ($G_{\max}$) adı verilir. Kesme deformasyonunun $0 - 10^{-5}$ aralığında, $G_{\max}$ değeri sabit kalır. Günümüzde bu değer, geoteknikte bir durum parametresi olarak oldukça kullanışlıdır. Şekil 2.10'de, ölçüm aletleriyle donatılmış üç eksenli sıkışma cihazı ve RC/TS cihazı kullanılarak yapılan zemin testlerinin bazı sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar, $10^{-3} - 1\%$ kesme deformasyonu aralığında zeminin güçlü bir doğrusal olmayan davranış sergilediğini doğrulamaktadır.



Şekil 2.10. Zemin kayma modülü değerlendirmesi için farklı testlerin sonuçları (Dyka, 2012)

2.2.1.3. Hacimsel elastiklik modülü (Sıkışmazlık)

Hacimsel Modül (Sıkışmazlık), zeminin hacimsel deformasyona karşı gösterdiği gerilme değişimini ifade eder. Ortalama gerilme arttığında, malzeme sıkıştırıldığında hacim azalması meydana gelir. K ile sembolize edilir ve formülü şu şekildedir:

$$K = \frac{\text{Hacimsel Gerilme}(\rho)}{\text{Hacimsel Deformasyon}(\Delta v)} \quad (2.3)$$

Bu modül, basitçe bir malzemenin hacimsel sıkışmaya karşı direncini ölçer. Hacimsel deformasyon, sıvılaşma sonrası zemin oturmasını hesaplamak için kullanılır.

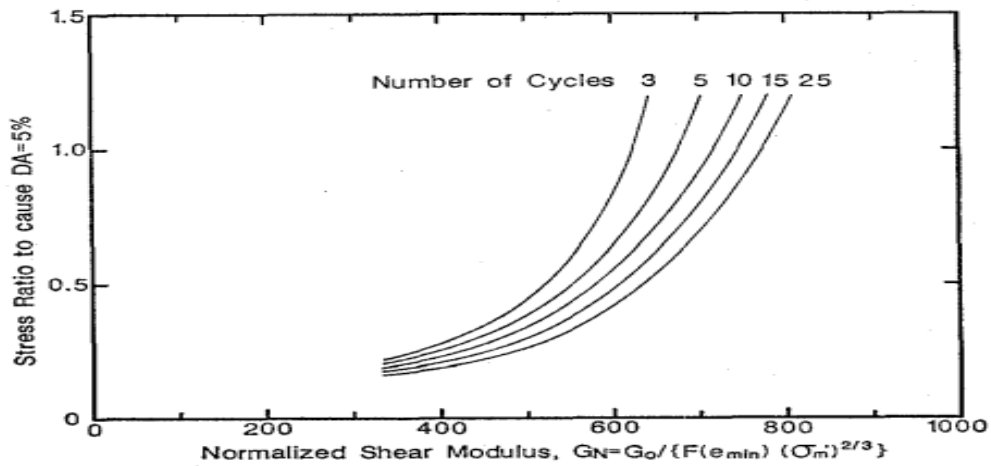
Elastik malzemeler söz konusu olduğunda, üç rijitlik modülü (E, G ve K), Poisson oranı (μ) aracılığıyla birbirine bağlıdır:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (2.5)$$

2.2.1.4. Zeminin sertliği ile sıvılaşması arasındaki ilişki

Elastisite modülü, zeminin rijitliğini gösterir ve sıvılaşmayı birçok yönden etkiler. Yüksek rijitliğe sahip bir zemin tabakası, sıvılaşmaya direnç gösterir. Farklı yoğunluk ve gerilme geçmişine sahip kumlar üzerinde yapılan döngüsel üç eksenli testler; zemin dokusu, bağlı yoğunluk, gerilme-deformasyon davranışı ve aşırı konsolidasyon geçmişinin tümünün, zeminin sıvılaşma davranışını yansıttığını ve büyük ölçüde elastik kesme modülünden (G) etkilendiğini ortaya koymuştur. Sıvılaşma özellikleri ile elastik kesme modülü arasındaki ilişki, Şekil 11’da sunulmuştur. Farklı yoğunluk ve gerilme geçmişine rağmen, tüm verilerin dar bir bant içinde toplandığı görülmekte ve bu durum, stres oranı ile kesme modülü arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışmalar, normalize edilmiş kesme modülünün, zemin türü ve çevre basıncından bağımsız olarak sıvılaşma direnciyle iyi bir korelasyon sergilediğini doğrulamaktadır.



Şekil 2.11. Normalleştirilmiş kayma modülü ile gerilim oranı arasındaki temsili korelasyonlar farklı sayıda çevrimde DA=5%’e neden olur (Tokimatsu ve Uchida, 1990)

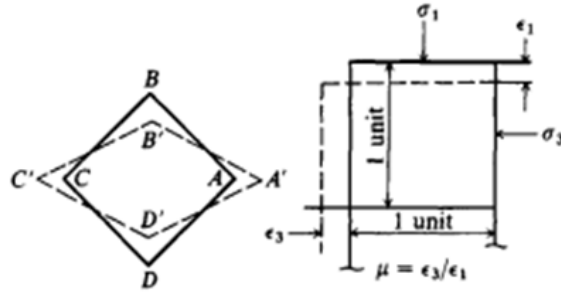
2.2.2. Poisson oranı (μ)

Poisson oranı, eksenel sıkışma (E_v) ile yanlara doğru genleşme (E_l) arasındaki oran olarak tanımlanır. ' μ ' ile sembolize edilir ve matematiksel olarak şu şekilde yazılır:

$$\mu = \frac{E_v}{E_l} \quad (2.6)$$

Bu denklemde oranın pozitif (+) işaret alması için (Şekil 2.12):

1. Sıkışma durumunda: E_v (eksenel deformasyon) sıkışma yönünde, E_l (yanlara doğru deformasyon) genleşme yönünde olmalıdır.
2. Çekme durumunda: E_v eksenel uzama, E_l ise yan boyutta azalma yönünde olmalıdır.



Şekil 2.12. Poisson oranının gösterimi (Bowles , 1997)

Çizelge 2.2. Bazı tipik zeminlerin Poisson Oranı

Zemin tipi	Poisson oranı (μ)
Doygun Kil	0.4 – 0.5
Doygun Olmayan Kil	0.1 – 0.3
Kumlu Kil	0.2 – 0.3
Silt	0.3 – 0.35
Kum ve Çakıllı Kum	-0.1 – 1.00
Genellikle	0.3 – 0.4
Kaya	0.1 – 0.4
Lös	0.1 – 0.3

2.2.3. Boşluk oranı (e)

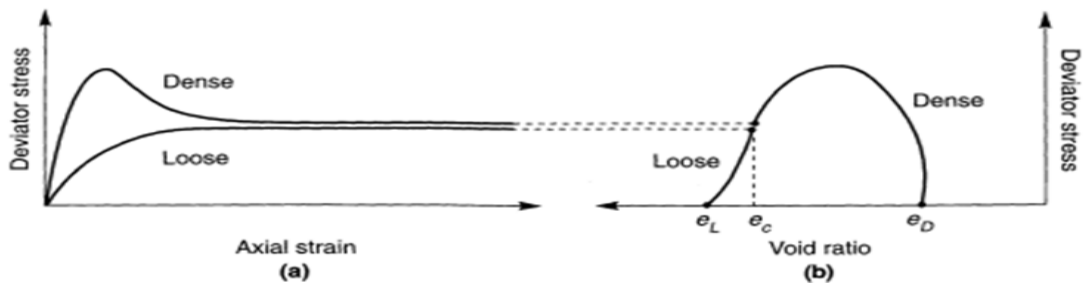
Boşluk oranı, bir zemin kütlesindeki boşlukların oranını ifade eden boyutsuz bir terimdir. Zemin numunesindeki boşluk hacminin (V_v), katı hacmine (V_s) oranı olarak tanımlanır.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.7)$$

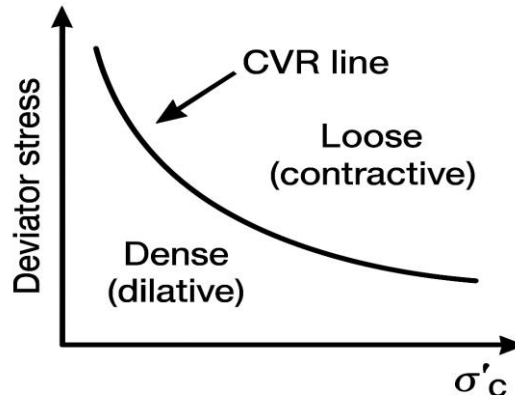
Bu değer, zemin tanelerine kıyasla ne kadar boş alan bulunduğunu gösterir. Geoteknik mühendisliğinde "boşluklar", hem hava hem de suyu kapsar. Boşluk oranı, zeminin geçirgenliğini, sıkışabilirliğini, rijitliğini ve mukavemetini doğrudan etkileyen kritik bir özelliktir. İri taneli zeminlerde boşluk oranı genellikle 0.4 – 1, ince taneli zeminlerde ise 0.5 – 2.5 aralığındadır. Yüksek boşluk oranı, kolayca yüksek boşluk suyu basıncı oluşumuna ve dolayısıyla sıvılaşmaya yol açabilir.

Casagrande (1936), Kritik Boşluk Oranı (CVR) çizgisi kavramını ortaya atmıştır. Yaptığı deneylerde, aynı etkin çevre basıncı altında test edilen tüm numunelerin, büyük kesme deformasyonlarına maruz kaldığında aynı yoğunluğa yakınsadığını gözlemlemiştir. Buna göre gevşek zemin numuneleri büzüşerek sıkılaşır ve sıkı zemin numuneleri önce hafifçe büzüşür, ardından hızla genişlemeye başlar (Şekil 2.13).

Tüm numuneler, belirli bir yoğunluğa ulaştıktan sonra sabit kesme direnci ile deformasyona devam eder. Bu durumda boşluk oranı, etkin çevre basıncıyla doğrudan ilişkilidir ve bu özel orana Kritik Boşluk Oranı (CVR) adı verilir. Şekil 2.14'te gösterildiği gibi, CVR çizgisi, gevşek ve sıkı zemin durumları arasındaki sınırı belirler.

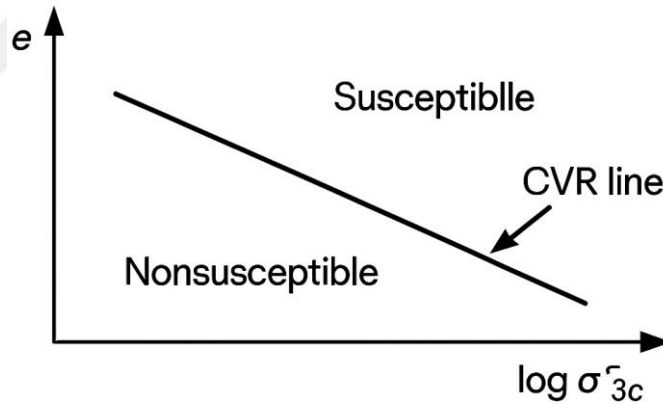


Şekil 2.13. Aynı etkili sınırlama basıncında gevşek ve yoğun kumlar için (a) Gerilim-şekil değiştirme ve (b) Gerilim-boşluk oranı eğrileri(Casagrande, 1936)



Şekil 2.14. Gevşek büzülme durumları ile yoğun genişleme durumları arasında bir sınır olarak CVR çizgisinin kullanımı (Casagrande, 1936)

Ayrıca, CVR çizgisi büzüşme (contractive) ile genişleme (dilative) davranışları arasındaki geçişi işaretlediğinden, sıvılaşmaya duyarlı ve duyarlı olmayan zeminlerin ayrımında kullanılır(Şekil 2.15)



Şekil 2.15. Akış sıvılaşmasına duyarlı olan ve olmayan başlangıç durumları arasında bir sınır olarak CVR çizgisinin kullanımı. (Casagrande, 1936)

2.2.4. Tane boyutu ve zemin sınıflandırması

Zeminler, geoteknik özelliklerine bağlı olarak oldukça farklı davranışlar sergileyebilir. Genel olarak, zeminler iki türe ayrılabilir: İri taneli zeminler ve ince taneli zeminler. Tane boyutu 0.075 mm'den büyük olan zeminler iri taneli, 0.075 mm'den küçük olanlar ince taneli olarak kabul edilir. İri ve ince taneli zeminler arasındaki sınır 0.075 mm'dir; bu, çıplak gözle ayırt edilebilen en küçük tane boyutudur.

Zemin sınıflandırması, tüm geoteknik mühendislerin anladığı evrensel bir dildir ve benzer davranış gösteren zeminler gruplandırılır. Dünya çapında standart zemin sınıflandırma sistemlerinin kullanılması, zemin özelliklerine dair belirsizlikleri ortadan kaldırır. Günümüzde dünya genelinde kullanılan birkaç zemin sınıflandırma sistemi bulunmaktadır. Bunlardan biri, geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'dir (Şekil 2.16).

COARSE-GRAINED SOILS (more than 50% of material is larger than No. 200 sieve size.)			FINE-GRAINED SOILS (50% or more of material is smaller than No. 200 sieve size.)				
GRAVELS More than 50% of coarse fraction larger than No. 4 sieve size	Clean Gravels (Less than 5% fines)		SILTS AND CLAYS Liquid limit less than 50%		ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty of clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity	
		GW		Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines		CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays
		GP		Poorly-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines		OL	Organic silts and organic silty clays of low plasticity
	Gravels with fines (More than 12% fines)				MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	
		GM		Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures		CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays
SANDS 50% or more of coarse fraction smaller than No. 4 sieve size		GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures		OH	Organic clays of medium to high plasticity, organic silts	
	Clean Sands (Less than 5% fines)		SILTS AND CLAYS Liquid limit 50% or greater		PT	Peat and other highly organic soils	
		SW					Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines
		SP					Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines
	Sands with fines (More than 12% fines)						
	SM	Silty sands, sand-silt mixtures	HIGHLY ORGANIC SOILS				
		SC	Clayey sands, sand-clay mixtures				

Şekil 2.16. Kaba taneli zeminler ve ince taneli zeminler için Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi.

Sıvılaşma ile ilişkili olaylar, özellikle kum gibi iri taneli kohezyonsuz zeminlerle bağlantılıdır. Bununla birlikte, çakıl gibi daha iri taneli zeminlerin, sıvılaşmayı tetikleyecek kadar uzun süre boşluk suyu basıncını koruyamayacak kadar geçirgen olduğu düşünülür. İnce taneli zeminlerde, sıvılaşma oluşturacak kadar yüksek boşluk suyu basıncı üretilmediği için sıvılaşma nadiren görülür. Ancak son çalışmalar, sıvılaşmaya duyarlılık için gradasyon kriterlerinin sınırlarını genişletmiştir. Laboratuvar da plastisitesiz siltlerin sıvılaştığı gözlemlenmiştir (Ishihara, 1984, 1985); bu da ince taneli zeminlerin sıvılaşma

duyarlılığının yalnızca tane boyutuna değil, aynı zamanda plastisiteye de bağlı olduğunu doğrulamaktadır. Kaba siltler tamamen sıvılaşmaya duyarlıdır. Killer sıvılaşmaya duyarlı değildir, ancak bazıları sıvılaşmaya benzer gerilme yumuşaması davranışı sergiler. Öte yandan, saha çalışmalarında çakılın da sıvılaşabildiği gözlemlenmiştir (Coulter ve Migliaccio, 1966; Chang, 1978)

2.2.5. Plastisite

Zeminin plastisitesi, çatlama deformasyona uğrama yeteneğidir. Bu, özellikle killi zeminler olmak üzere ince taneli zeminlerin önemli bir özelliğidir. Killi zeminlerde emilen su, zeminin plastisitesine yol açar. Benzer şekilde, zeminin Plastisite İndeksi (PI), Likit Limiti (LL) ile Plastik Limit (PL) arasındaki farktır.

$$PI = LL - PL \quad (2.8)$$

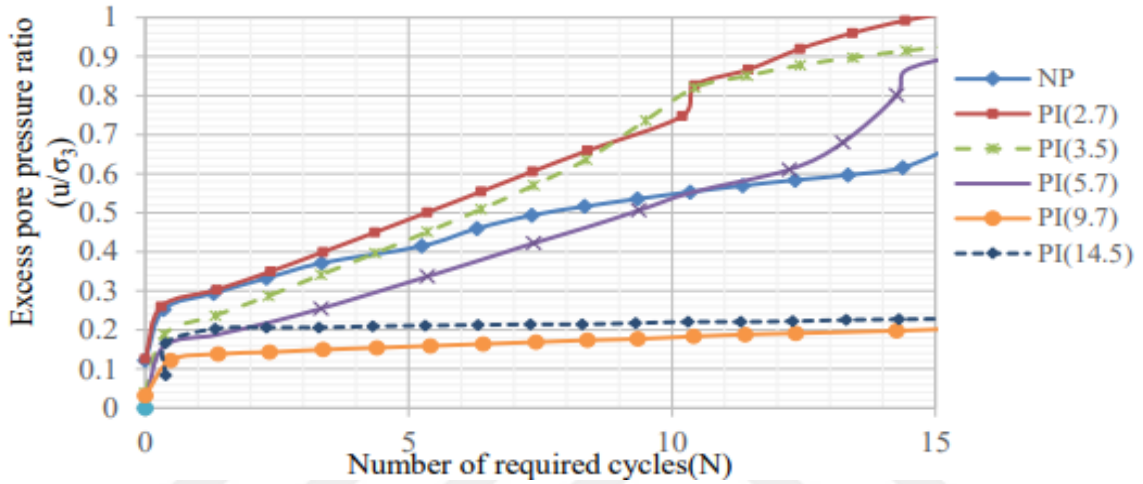
Çizelge 2.3. Plastisite düzeyinin plastik indeks değerine bağlı olduğunu göstermekte:

Plastisite İndeksi	Plastisite
0	Plastik olmayan
1 – 5	Biraz plastik
5 – 10	Düşük plastisite
10 – 20	Orta plastisite
20 – 40	Yüksek plastisite
> 40	Çok yüksek plastisite

Çalışmalar, zemin numunesinin PI'si arttıkça, zeminin sıvılaşma direncinin (deformasyon açısından) önce azaldığını, ardından Plastisite İndeksi artışıyla birlikte yeniden arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, boşluk suyu basıncı oluşum hızı, Pİ'nin plastisitesiz durumdan 3.5'e yükselmesiyle önce artar, ancak Pİ 3.5'i aştığında bu hız azalır (Şekil 2.17).

Çizelge 2.4. Hacim değişimi ile plastisite indeksi arasındaki ilişki (Bowles,1997)

Hacim Değişimi Potansiyeli	Plastisite İndeksi	Genleşme İndeksi
Düşük	< 18	21 – 50
Orta	15 – 28	51 – 90
Yüksek	25 – 41	91 – 130
Çok Yüksek	> 35	> 130



Şekil 2.17. Plastisite'nin aşırı boşluk su basınçları üzerindeki etkisi (Tamang, 2019)

2.2.6. Zeminin birim hacim ağırlığı (γ)

Birim hacim ağırlığı, birim hacimdeki zeminin kuvvet cinsinden ağırlığı olarak tanımlanır. ' γ ' ile gösterilir ve matematiksel olarak şu şekilde yazılır:

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} \quad (2.9)$$

Birim hacim ağırlığın yaygın kullanılan birimi kN/m^3 'tür. Sembol alt indis eklenerek özel durumlar belirtilebilir: γ_{dry} (kuru birim hacim ağırlığını), γ_s (doygun birim hacim ağırlığını) ifade eder. Birim hacim ağırlık değeri, kuru durumda minimumdan, tüm boşlukların suyla dolduğu doygun durumda maksimuma kadar değişebilir. Doygunluk derecesi şu formülle hesaplanır:

$$S = \frac{V_w}{V_u} \times \%100 \quad (2.10)$$

Sıvılaşma, yalnızca doymuş zeminlerde gerçekleşir; kuru zeminlerde sıvılaşma oluşmaz. Zeminin doymuşluk derecesi, sıvılaşmaya duyarlılığı doğrudan etkiler. Doymuşluk derecesi yüksekse, sıvılaşmayı tetikleyecek aşırı boşluk suyu basıncı kolayca oluşabilir.

Çizelge 2.5. Farklı zemin türlerinin birim hacim ağırlıkları (Zekkos, 2006)

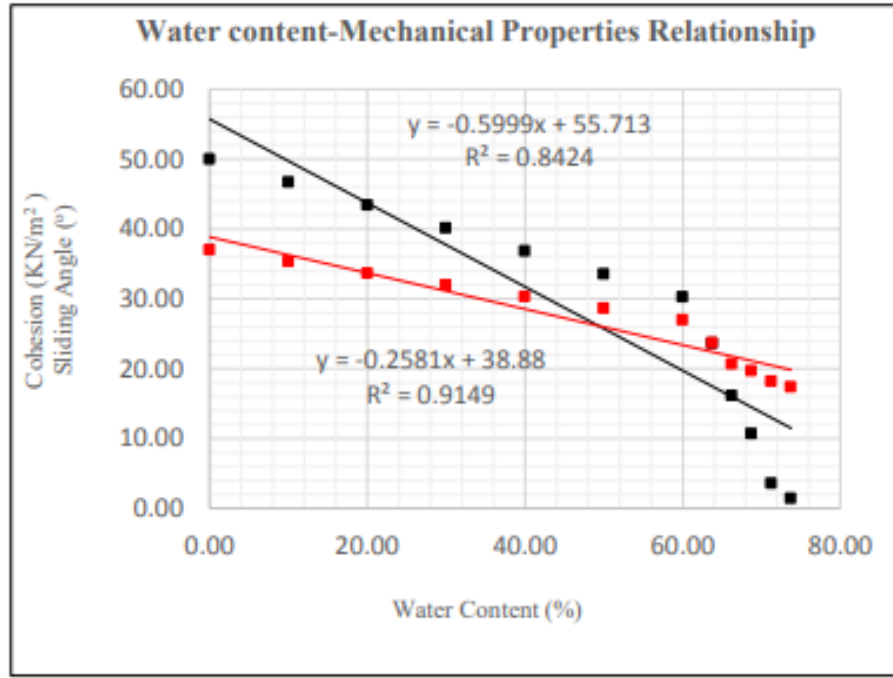
Zemin Turu	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	
	Gevşek	Sıkı
Çakıl	20	21
İyi derecelenmiş kum	20.5	22.5
İnce veya siltli kum	20	21.5
Çok Yumuşak Kil	14	18
Yumuşak Kil	15	19
Sert Kil	18	20

2.2.7. Kohezyon

Zeminin kohezyonu, Van der Waals kuvvetleri ve diğer kimyasal bağlar gibi moleküller arası kuvvetler nedeniyle zemin tanelerinin birbirine yapışma yeteneğidir. Bu, zemin kütlelerinin davranışını etkileyen temel özelliklerden biridir. Kohezyon genellikle siltli ve killi zeminlerde gözlenir; bu nedenle bu zeminler kohezyonlu zeminler olarak adlandırılır. Ancak iri taneli zeminler de çok küçük bir kohezyona sahiptir ve kohezyonsuz zeminler olarak bilinir. Literatürde kohezyon 'c' ile gösterilir ve birimi kPa'dır.

Kohezyon, zeminin yapışkan bir özelliğidir. Kesme gerilmesine direnç gösterir ve zemin kütlelerinin stabilitesini korur. Geoteknik Mühendisliğinde incelenen en kritik konulardan biridir. Şevlerin, dolguların ve temellerin stabilitesini etkiler. Yapı tasarımında önemli bir rol oynar. Bir zemin numunesinin kohezyonunu ölçmek için Doğrudan Kesme Testi, Üç Eksenli Test ve Serbest Basınç Testi gibi birçok test uygulanır. Zemin kohezyonunu etkileyen başka özellikler de vardır: İnce taneli silt ve kil gibi zeminler yüksek kohezyon değerine sahipken, kum gibi iri taneli zeminler düşük kohezyon değeri gösterir.

Zemin tanelerinin şekli de kohezyonu etkiler: Düzensiz şekilli taneler, birbirine kenetlenerek kohezyonu artırır. Kuru veya tamamen doymuş zeminler genellikle düşük kohezyon sergilerken, kısmen doymuş zeminler daha yüksek kohezyona sahiptir.(Şekil 2.18)



Şekil 2.18. Su içeriğinin kohezyon ve kayma açısına ilişkin grafiği (Gusman, 2022)

Çizelge 2.6. Bazı tipik zemin tiplerinin kohezyon değerini göstermekte (SN 670 010b)

No.	Zemin tipi (USCS)	Kohezyon (kPa)
1	GC	20
2	SM	20 – 50
3	SC - sıkıştırılmış	74
4	ML - sıkıştırılmış	67
5	CL - sıkıştırılmış	86
6	CH	25
7	MH	20
8	OH	10

Sıvılaşma olguları, kohezyonsuz zeminler (kaba silt, kum, çakıl) ile ilişkilidir. Kohezyon, zeminin kesme mukavemetini artırarak sıvılaşmaya direnç sağlar. Bu nedenle, yüksek kohezyonlu kil gibi zeminlerde sıvılaşma nadiren görülür.

2.2.8. Sürtünme açısı(ϕ)

Zeminin sürtünme açısı, zeminin kesme mukavemetini temsil eden bir parametredir. Tanımı, Mohr-Coulomb yenilme kriterinden türetilmiştir. Bu açı, zeminin normal etkin gerilme ile birlikte sürtünmeye dayalı kesme direncini açıklamak için kullanılır. Farklı zemin türlerine ait tipik sürtünme açısı değerleri aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Çizelge 2.7. Tipik zemin tiplerinin sürtünme açısı (SN 670 010b)

No.	Zemin tipi (USCS)	Sürtünme Açısı(ϕ°)
1	GW	33-40
2	SW	33-43
3	SP	30-39
4	SM	32-35
5	SC	30-40
6	ML	27-41
7	CL	27-35
8	OL	22-32
9	CH	17-31

Sürtünme açısı, özellikle tane içi sürtünmenin kesme mukavemetini belirlediği kum gibi granüler zeminler için önemlidir. Yüksek sürtünme açısına sahip zeminler genellikle daha yüksek kesme mukavemeti ve dolayısıyla daha fazla stabilite gösterir. Bu nedenle, yüksek sürtünme açılı zeminler sıvılaşmaya direnç gösterir. Düşük sürtünme açılı zeminler (gevşek, düşük yoğunluklu kumlar) ise sıvılaşmaya daha yatkındır. Bu açıdan sürtünme açısı, bir zeminin sıvılaşma potansiyelini belirlemede temel bir parametredir.

2.2.9. Geçirgenlik(Permeabilite)

Geçirgenlik, bir zemin numunesinin sıvıyı geçirebilme yeteneğidir. Gözenekli bir ortamdan sıvının ne kadar kolay akabileceğinin ölçüsü olarak tanımlanır. Geoteknik mühendisliğinde gözenekli ortam zemin, sıvı ise ortam sıcaklığındaki sudur. Geçirgenlik

aynı zamanda zeminin hidrolik iletkenliği olarak da bilinir. Genel olarak, iri taneli zeminler yüksek poroziteye sahiptir ve bu nedenle ince taneli zeminlere göre daha geçirgendir. Geçirgenlik, zeminin suyu geçirme kapasitesinin bir lsdr ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$V = ki \quad (2.11)$$

Geçirgenlik, m/s gibi hız birimleriyle llr. Bazı zemin türlerinin geçirgenlik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.8. Toprağın geçirgenlik aralığı (Bowles,1997)

Zemin	Geçirgenlik katsayıları
Temiz akıl	$10^0 - 10^{-2}$
Temiz akıl ve kum karışımları	$10^{-2} - 10^{-5}$
Kum-silt karışımları	$10^{-5} - 10^{-9}$
Killer	$10^{-9} - 10^{-11}$

Sıvılaşmanın başlaması için yüksek boşluk suyu basıncı gereklidir; bu da ancak yeterli geçirgenliğe sahip zeminlerde mümkündür. Ancak akıl gibi aşırı geçirgen zeminler, suyu yeterince uzun süre tutamadığından aşırı boşluk suyu basıncı oluşamaz ve sıvılaşma tetiklenmez. Benzer şekilde, kil gibi çok düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde de aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu engellenir. Bu nedenle, sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için zemin geçirgenliğinin ne çok düşük ne de çok yüksek, ancak belirli bir aralıktaki olması gerektiği sonucuna varılabilir (şekil 2.19).

2.2.10. Dalga hızı

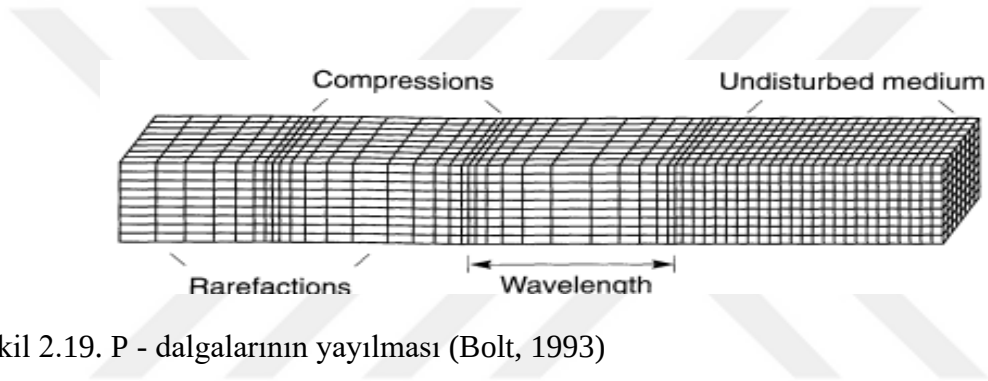
Bir sismik dalğanın (deprem dalgasının) yer kabuğunda veya herhangi bir malzeme içinde yayılma hızını ifade eder. Bu hız, dalğanın türüne, geçtiği ortamın yoğunluğuna, elastik özelliklerine (zellikle elastik modüllerine) ve ortamın doygunluğuna bağlıdır. Sismik dalga türleri ve hızları:

2.2.10.1. Birincil dalgalar (P-dalgaları)

P-dalgaları (boyuna dalgalar veya basınç dalgaları), içinden geçtikleri malzemede ardışık sıkışma ve seyrelme hareketine neden olur. Bu dalganın hızı şu formülle hesaplanır:

$$V_p = \sqrt{\frac{G(2-2\mu)}{\rho(1-2\mu)}} \quad (2.12)$$

Not: Poisson oranı (ν) sıfır olduğunda ($\nu = 0$), V_p sonsuza ulaşır; bu durumda malzeme sonsuz sertlik kazanır.

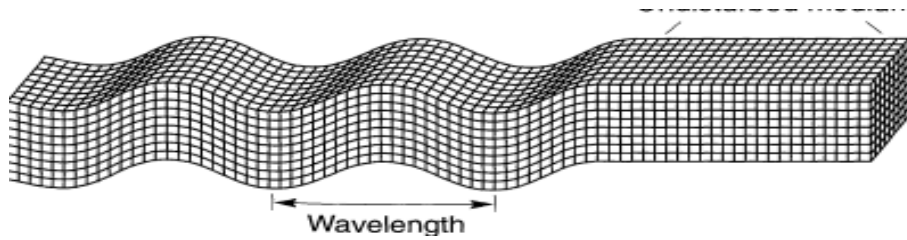


Şekil 2.19. P - dalgalarının yayılması (Bolt, 1993)

2.2.10.2. İkincil dalgalar (S-dalgaları)

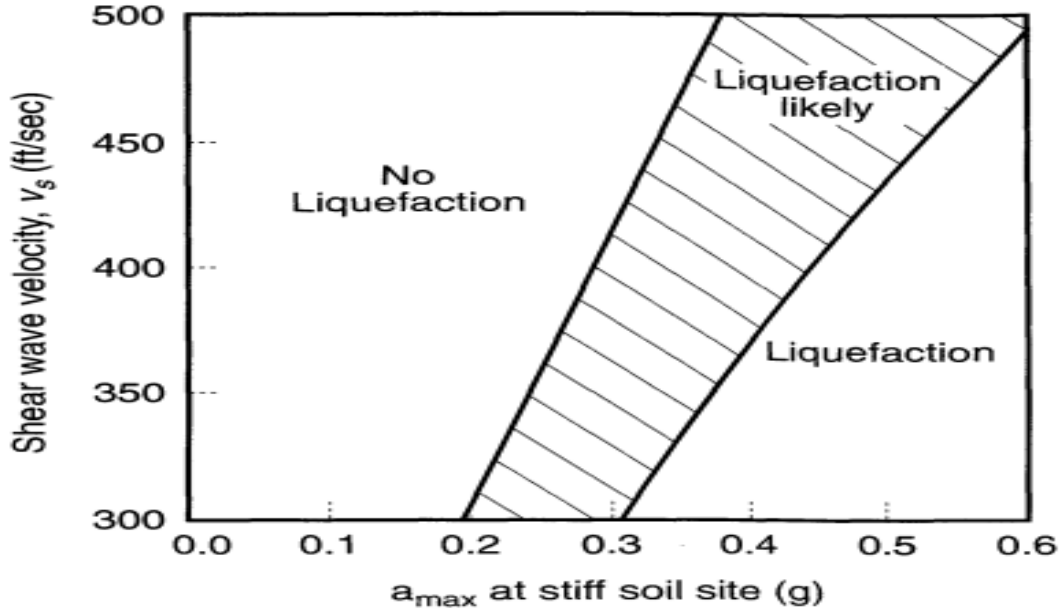
S-dalgaları (kesme dalgaları veya enine dalgalar), malzeme içinde ilerlerken kesme deformasyonu oluşturur. Bu dalgaların hızı şu formülle hesaplanır:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.13)$$

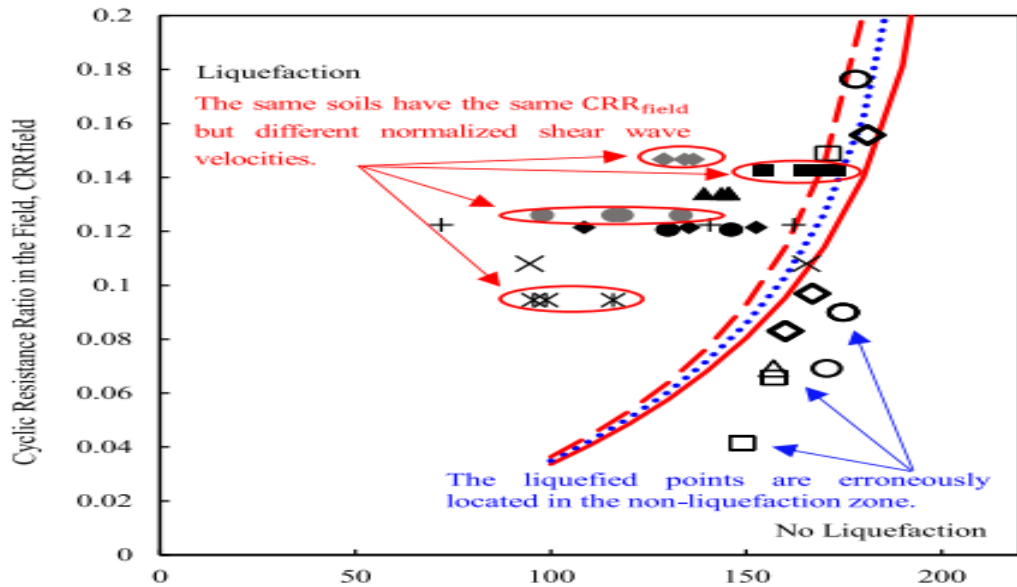


Şekil 2.20. S - dalgalarının yayılması (Bolt, 1993)

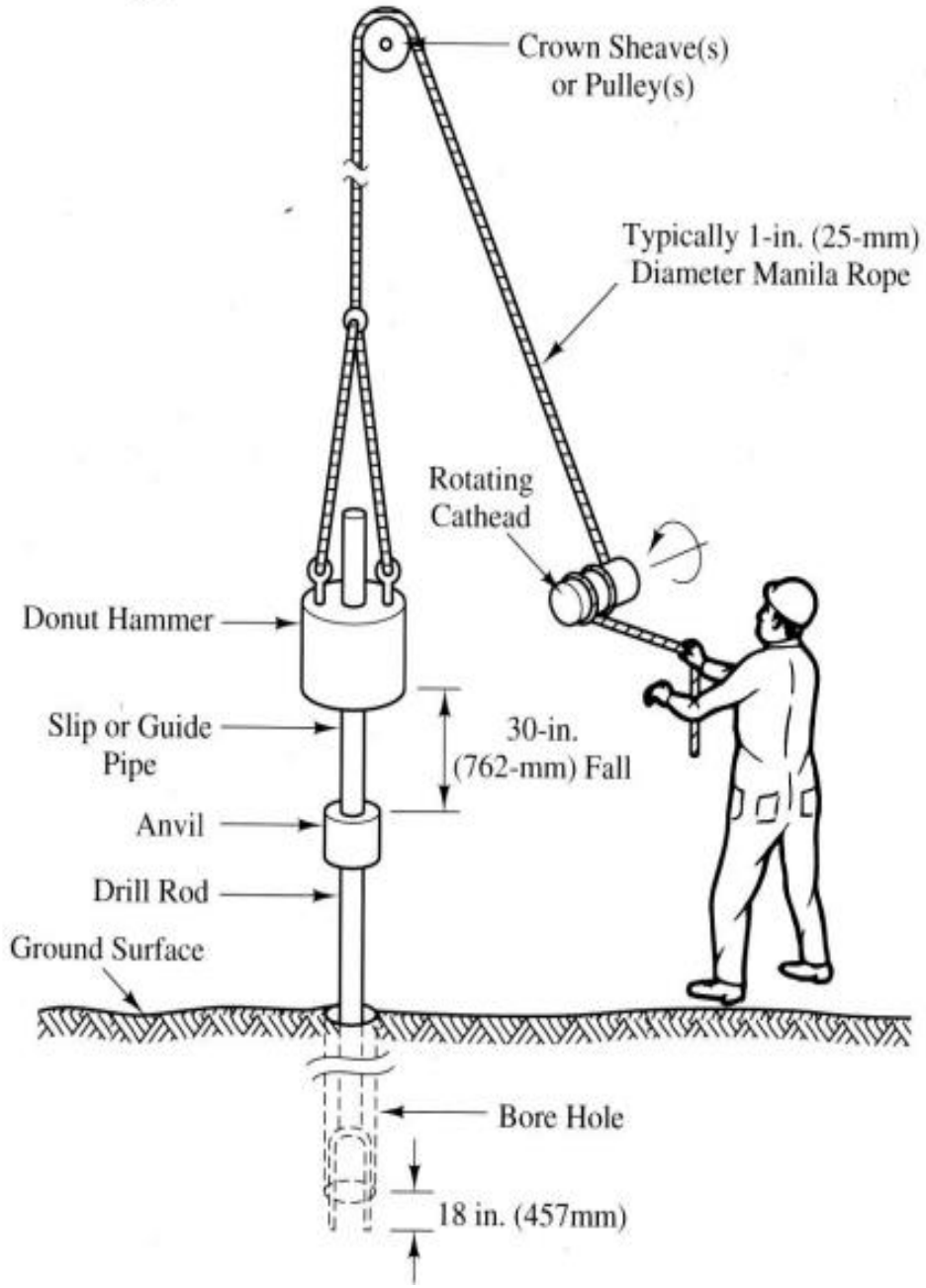
Kesme dalgası hızı ile kesme dayanımı arasındaki ilişki şu şekilde verilir: $G_{max} = \rho V_s^2$. Benzer şekilde, Şekil 21'de kayma dalgası hızının sıvılaşma potansiyeli ile ilişkisi gösterilmektedir. Şekil 2.22, daha yüksek kesme dalgası hızına sahip noktaların daha yüksek sıvılaşma direnci gösterdiğini göstermektedir.



Şekil 2.21. Kesme dalgası hızı ve en yüksek yer ivmesinden sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine ilişkin grafik (Stokoe ve diğerleri, 1988'den sonra.)



Şekil 2.22. Andrus and Stokoe (2000) $CRR_{field}-V_{s1}$ eğrisinin mevcut veri setleriyle karşılaştırılması (Baziar ve Alibolandi, 2024)



Şekil 2.24. Donut çekiçe standart penetrasyon testinin gösterimi (Coduto, 2001)

Ayrıca, çalışmalar saha testlerinden elde edilen SPT-N değerlerinin, ileri hesaplamalarda kullanılmadan önce bazı düzeltmeler gerektirdiğini göstermektedir. Test, farklı bölgelerde farklı makineler ve tekniklerle gerçekleştirildiğinden, SPT-N değerinin çeşitli alanlarda kullanımını standardize etmek için düzeltme uygulanması gereklidir. Bu düzeltme şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$(N_1)_{60} = N \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R \quad (2.14)$$

Bu bağıntıda:

$(N_1)_{60} = N'_{60}$: % 60 enerji ve üst tabaka yükü düzeltmesi yapılmış SPT darbe değeridir.

C_E : Enerji oranı düzeltme katsayısı

C_B : Sondaj kuyu çapı düzeltme katsayısı

C_S : Numune alma yöntemi düzeltme katsayısı

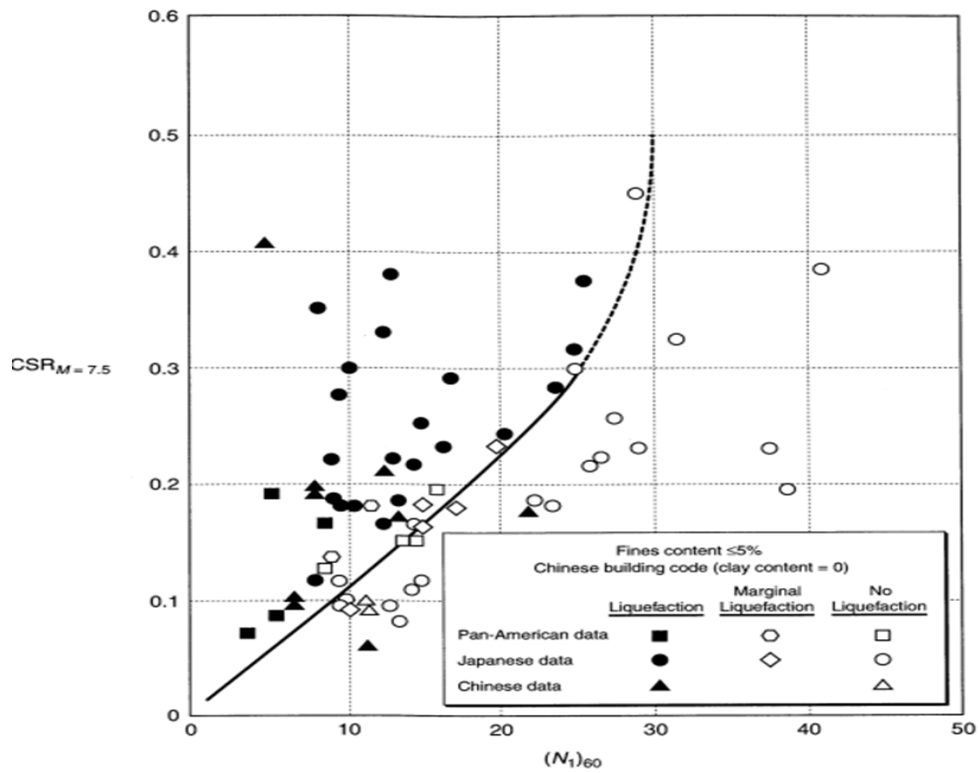
C_R : Tij uzunluğu (deney derinliği) düzeltme katsayısı

N : Arazide ölçülen SPT değeri

C_N : Üst tabaka yükü (örtü yükü) düzeltme katsayısı

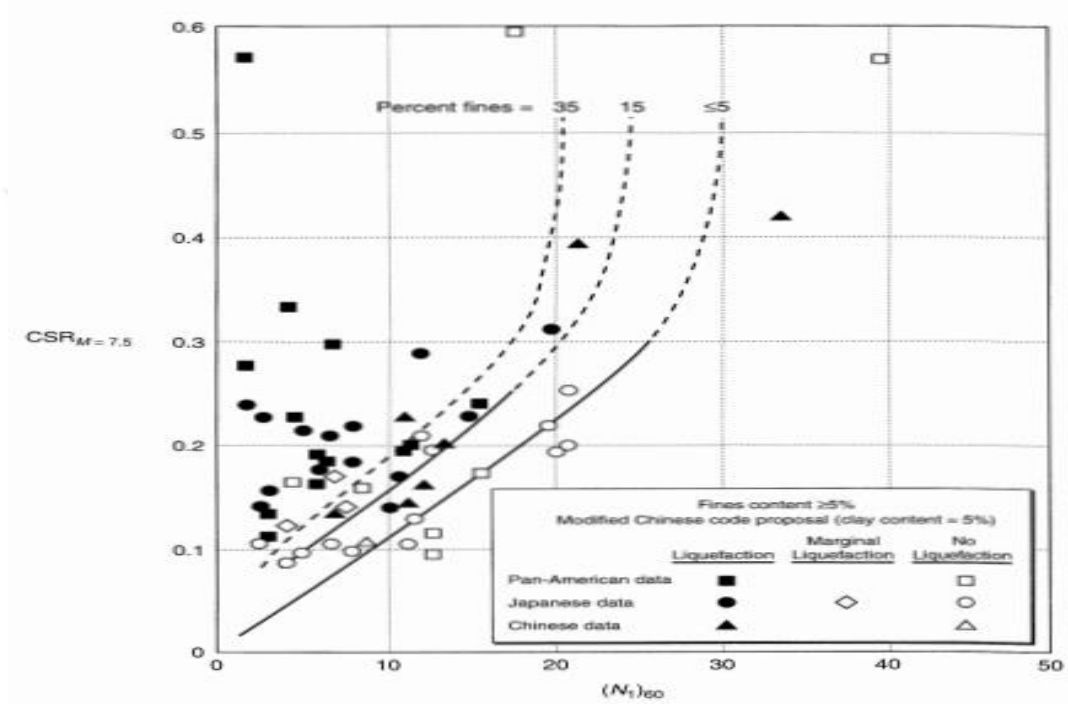
2.3.2. SPT-N değeri ve sıvılaşma

Standart Penetrasyon Testi (SPT), sıvılaşma direncinin karakterize edilmesinde en yaygın kullanılan saha testidir. Son çalışmalar, sıvılaşma direncini artıran faktörlerin aynı zamanda SPT direncini de artırdığını göstermektedir. Bu faktörler şunlar: yoğunluk, önceki sismik deformasyon (prior seismic straining), aşırı konsolidasyon (over consolidation), yanal zemin basıncı, sürekli basınç altında geçen süredir (Seed, 1983).



Şekil 2.25. Sıvılaşmaya neden olan döngüsel gerilim oranları ile $M = 7,5$ depremlerindeki temiz kumlar için $(N_1)_{60}$ değerler arasındaki ilişki (Seed vd., 1975 sonrası)

Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'de, temiz kum ve siltli kum için düzeltilmiş SPT-N değeri ile Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR) karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sıvılaşmanın beklenebileceği minimum CSR değerini belirlemek amacıyla, büyüklüğü $M=7.5$ olan depremlerde sıvılaşma gözlenen ve gözlenmeyen sahalarda yapılmıştır. Şekiller ayrıca, zemin içindeki ince tanelerin (kumun % 5'inden fazlasını oluşturduğunda) SPT-N direncini etkileyebileceğini göstermektedir (Koester, 1994).



Şekil 2.26. Sıvılaşmaya neden olan döngüsel gerilim oranları ile $M = 7,5$ depremlerindeki siltli kumlar için $(N_1)_{60}$ değerler arasındaki ilişki (Seed vd., 1975 sonrası)

2.3.3. SPT – N değeri ile farklı zemin parametreleri arasındaki korelasyon

SPT – N değeri, zemin parametreleri ile ilişkilendirilerek zemin rijitliği, birim hacim ağırlığı, içsel sürtünme açısı, kohezyon, bağıl sıkılık gibi birçok özelliğin belirlenmesinde kullanılır. Bu korelasyonlar, zemin mühendisliği hesaplamalarında ve tasarım çalışmalarında yaygın olarak uygulanmaktadır.

Aşağıdaki Çizelge 2.10, SPT – N ve Stres-Starin modülü E_s arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Bowles, 1997). Tablodaki veriler, Standart Penetrasyon Testi (SPT – N değeri) ve Konik Penetrasyon Testi (CPT- q_c değeri) sonuçları ile farklı zemin türleri

arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Farklı zeminler için elastisite modülü (E_e) değerlerinin nasıl hesaplandığı verilmiştir. Tablo, SPT ve CPT testleri kullanılarak zeminin rijitliği ve mukavemet özelliklerini belirlemek için kullanılan ampirik bağıntıları içermektedir. Bu tür korelasyonlar, jeoteknik mühendisliğinde tasarım süreçlerinde kritik rol oynar ve zemin davranışını tahmin etmede kullanılır.

Çizelge 2.9. Çeşitli zemin tipleri için SPT – N ve q_u 'nun E_s ile ilişkisi

Zemin	Elastisite modülü (E_s)(Kpa)
Kum (normal konsolide)	$E_s = 500 (N+15)$
Kum (doymuş)	$E_s = 250(N+15)$
Kum (aşırı konsolide)	$E_s = 40000+1050N$
Çakıllı kum	$E_s = 1200(N+6)$, $E_s = 600(N+6)$ $N \leq 15$
Killi kum	$E_s = 320(N+15)$
Siltler, kumlu silt veya killi silt	$E_s = 300(N+6)$

Çizelge 2.10. Farklı SPT-N değerlerine sahip zeminlerin göreceli sıkılık (D_r) değeri, içsel sürtünme açısı (ϕ) ve birim hacim ağırlığı (γ) ile nasıl ilişkilendirildiğini göstermektedir.

Açıklama	Çok Gevşek	Gevşek	Orta	Sıkı	Çok Sıkı
RD - Dr	0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT -N					
Ince	1-2	3-6	7-15	16-30	?
Orta	2-3	4-7	8-20	21-40	>40
Kalin	3-6	5-9	10-25	26-45	>45
ϕ					
Ince	26-28	28-30	30-34	33-38	
Orta	27-28	30-32	32-36	36-42	<50
Kalin	28-30	30-34	33-40	40-50	
γ_{wet}	11-16	14-18	17-20	17-22	20-23

2.4. Sıvılaşma Tetikleme Çerçevesi

Son 60 yılda, dünya genelindeki araştırmacılar tarafından sıvılaşma tetikleme potansiyeline ilişkin birçok yaklaşım önerilmiştir. Bunlar arasında en kabul gören yaklaşımlar şunlardır:

1. Gerilme Tabanlı Yaklaşım
2. Deformasyon Tabanlı Yaklaşım
3. Enerji Tabanlı Yaklaşım

En yaygın kullanılan yaklaşım, zeminin çevrimsel direncini sismik dalgaların indüklediği çevrimsel gerilme ile karşılaştıran gerilme tabanlı yaklaşımdır. 1960'lar ve 1970'lerde, özellikle Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'deki Seed ve meslektaşları tarafından bu konuda birçok araştırma ve deney yapılmıştır. Çalışmalar, sıvılaşma tetiklenmesine odaklanmış ve yükleme çevrimsel kesme gerilmesi cinsinden tanımlanmıştır. Çevrimsel kesme gerilmesi yaklaşımı kavramsal olarak basittir: Depremi indüklediği gerilme (çevrimsel kesme gerilmesi olarak ifade edilir), zeminin sıvılaşma direnci (çevrimsel direnç) ile karşılaştırılır. Çevrimsel kesme gerilmesinin (çevrimsel yükleme), zeminin çevrimsel direncini aştığı noktada sıvılaşma beklenir.

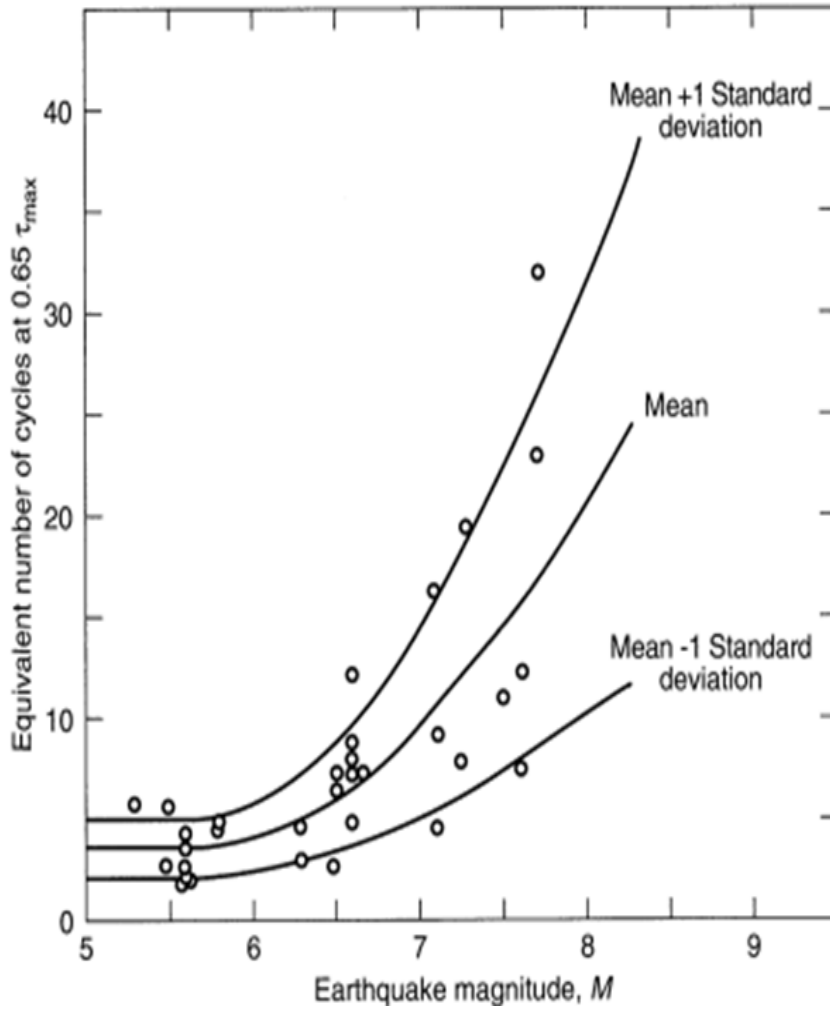
Bu yaklaşımda, sıvılaşma tetiklenme potansiyelini belirlemek için iki temel parametre bulunmaktadır. Bunlardan ilki, deprem kaynaklı döngüsel kayma gerilmesinin büyüklüğü ve genliği, ikincisi ise zeminin döngüsel direncidir. Bu iki parametre aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmış ve hesaplama yöntemleri belirtilmiştir.

2.4.1. Deprem kaynaklı çevrimsel kesme gerilmesi

Çevrimsel gerilme yaklaşımı, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunun temelde çevrimsel kesme gerilmesi ile ilişkili olduğu varsayımına dayanır. Sıvılaşmayı başlatmak için gereken aşırı boşluk suyu basıncı seviyesi, deprem kaynaklı çevrimsel yüklemenin genliği ve süresi ile ilişkilidir. Bu nedenle, çevrimsel yüklemenin çevrimsel kesme gerilmesi cinsinden tanımlanması gerekir. Bunun için iki yaklaşım mevcuttur:

2.4.1.1. Zemin tepki analizi yaklaşımı

Bu yaklaşım, bir zemin tabakası içindeki farklı derinliklerdeki kesme gerilmesinin zamanla değişimini tahmin etmek için kullanılır. Seed (1975), kaydedilmiş kuvvetli yer hareketi verilerinden elde edilen kesme gerilmesi zaman serilerine bir ağırlıklandırma prosedürü uygulayarak eşdeğer düzgün çevrim sayısını (N_{eq}) belirlemiştir (Şekil 2.27). N_{eq} , düzensiz bir zaman serisindeki maksimum çevrim gerilmesinin % 65'ine eşdeğer gerilme üreten tek tip çevrim sayısıdır ($\tau_{cyc} = 0.65\tau_{max}$). Bu gerilme, düzensiz zaman serisi ile eşdeğer bir boşluk suyu basıncı artışına yol açar.



Şekil 2.27. Farklı büyüklükteki depremler için eşdeğer düzgün gerilim çevrimlerinin sayısı, N_{eq} (Seed vd., 1975'a sonrası)

2.4.1.2. Basitleştirilmiş yaklaşım

Düz veya hafif eğimli zeminler için tek tip çevrimsel kesme gerilmesi genliği, Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen şu formülle hesaplanabilir:

$$\tau_{cyc} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d \quad (2.15)$$

a_{max} : Maksimum yer yüzeyi ivmesi

g : Yer çekimi ivmesi

σ_v : Toplam düşey gerilme

r_d : Gerilme azaltma faktörü

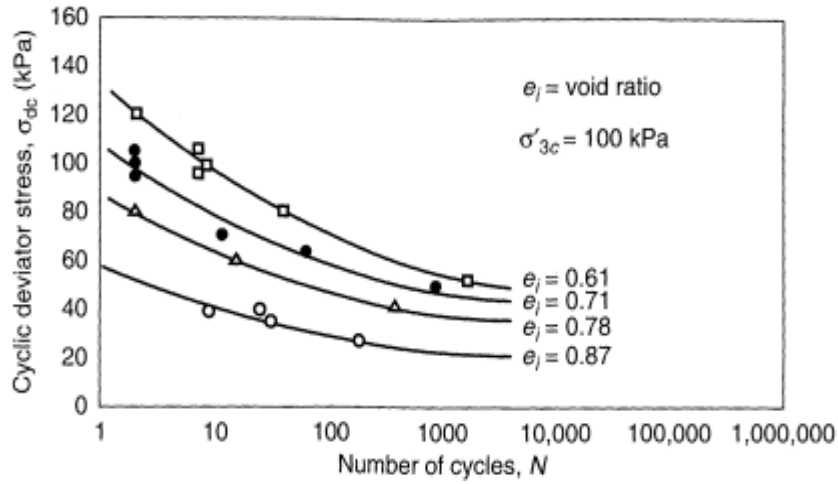
İster zemin yaklaşımı ister basitleştirilmiş yaklaşım kullanılsın, deprem kaynaklı gerilme, belirli bir eşdeğer döngü sayısı boyunca uygulanan sabit bir döngüsel kayma gerilmesi seviyesi ile tanımlanır.

2.4.2. Zeminin çevrimsel direnci

Bu özel çalışma kapsamında, zeminin çevrimsel direnci sıvılaşma direnci olarak da adlandırılabilir. Bir zemin elemanının sıvılaşma direnci, zeminin başlangıç durumunun göçme (failure) durumuna ne kadar yakın olduğuna bağlıdır. Kesme gerilmesi, boşluk suyu basıncı, zeminin kesme mukavemeti gibi başlangıç durum parametreleri, laboratuvar testleri veya saha testleri ile hesaplanabilir.

2.4.2.1. Laboratuvar testi yaklaşımı

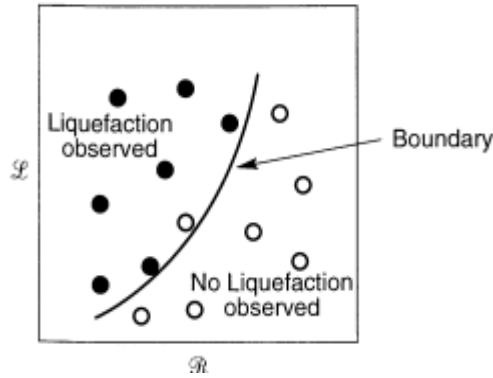
Çevrimsel gerilme yaklaşımının erken gelişim aşamasında, sıvılaşma direncini kontrol etmek için laboratuvar testlerine ağırlık verilmiştir. Yatay düzlemlerdeki gerilme koşullandırmasını simüle etmek amacıyla, çoğunlukla izotropik konsolide edilmiş üç eksenli zemin numuneleri üzerinde testler yapılmıştır (Şekil 2.28). Sıvılaşma göçme noktası genellikle, başlangıç sıvılaşmasının başladığı nokta olarak tanımlanır.



Şekil 2.28. İzotropik olarak konsolide edilmiş üç eksenli numunelerinde ilk sıvılaşmayı ve % 20 eksenel gerilmeyi üretmek için gereken döngüsel gerilmeler. (Seed ve Lee, 1965'ten sonra.)

2.4.2.2. Saha testi yaklaşımı

Bu yaklaşımda, sıvılaşma olayları ile ilgili geçmiş saha verileri, yerinde ölçülen test parametreleri açısından sıvılaşmayı karakterize etmek için kullanılır (Whitman, 1971). Saha test yaklaşımı için, E tüm yükleme parametrelerini, R ise tüm sıvılaşma direnci parametrelerini temsil eden basitleştirilmiş bir analiz yöntemi geliştirilmiştir.



Şekil 2.29. Yükleme parametresi ve sıvılaşma direnci parametresinin kombinasyonlarını gösteren tipik grafik(Kramer, 1996)

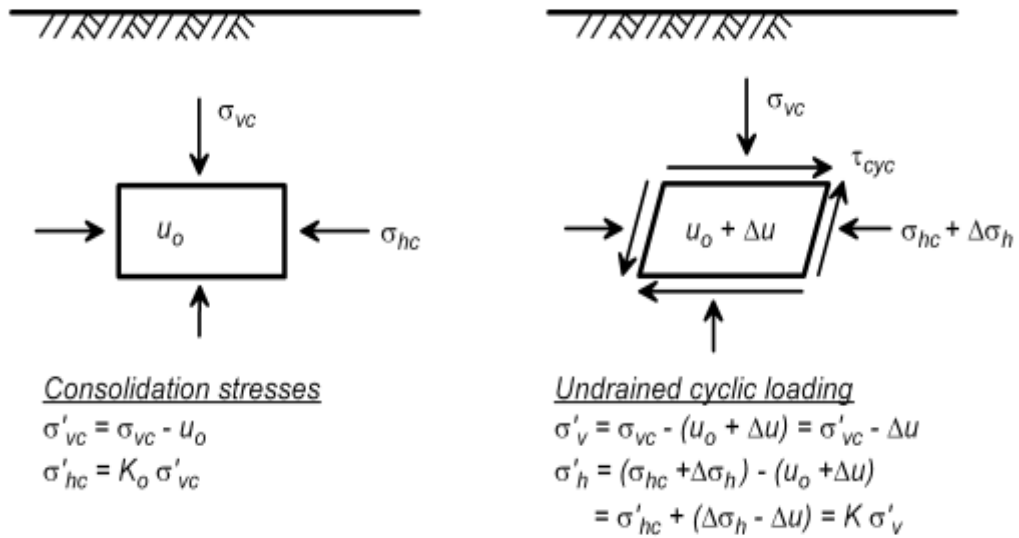
Şekil 2.29'de gösterildiği gibi, E, X-ekseninde ve R, Y-ekseninde olacak şekilde bir grafik oluşturulur. E-R kombinasyonları arasında bir sınır çizgisi çizilir. Bu çizginin üzerindeki noktalar sıvılaşmanın gözlemlendiği, altındaki noktalar ise sıvılaşmanın

gözlenmediği kombinasyonları temsil eder. Saha testi parametreleri, zeminin yoğunluğunu ve boşluk suyu basıncı oluşum özelliklerini yansıtan parametrelerdir. Bu parametreler aynı zamanda sıvılaşma direnç parametreleri olarak kullanılır. Bu parametreleri belirlemek için uygulanan saha testleri şunlardır:

1. SPT - Standart Penetrasyon Testi
2. CPT – Konik Penetrasyon Testi
3. Kayma Hızı Testi

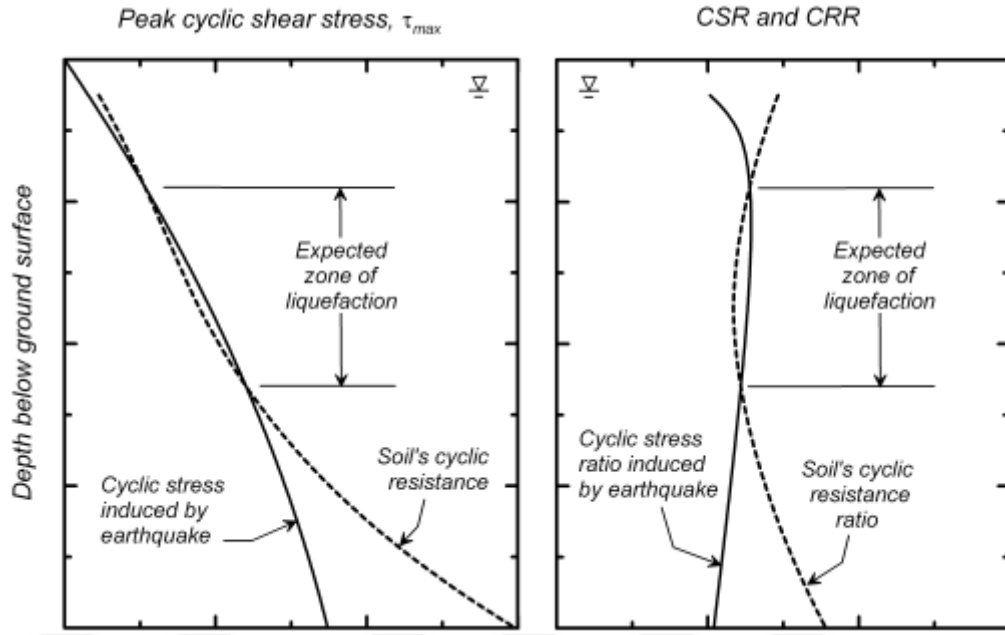
2.4.3. Sıvılaşmanın başlangıcı

Deprem sırasında düz zemin altındaki sahalarda oluşan çevrimsel gerilmeler, temelde yatay sarsıntının etkilerine bağlıdır. Şekil 2.30, deprem sırasındaki yatay sarsıntı öncesinde ve sırasında düz zemin yüzeyi altındaki bir zemin elemanına etki eden gerilme ve boşluk suyu basıncını şematik olarak gösterir.



Şekil 2.30. Yatay sarsıntı sırasında yer altındaki bir zemin elemanı üzerindeki döngüsel stresler (Idris ve Boulanger, 2008)

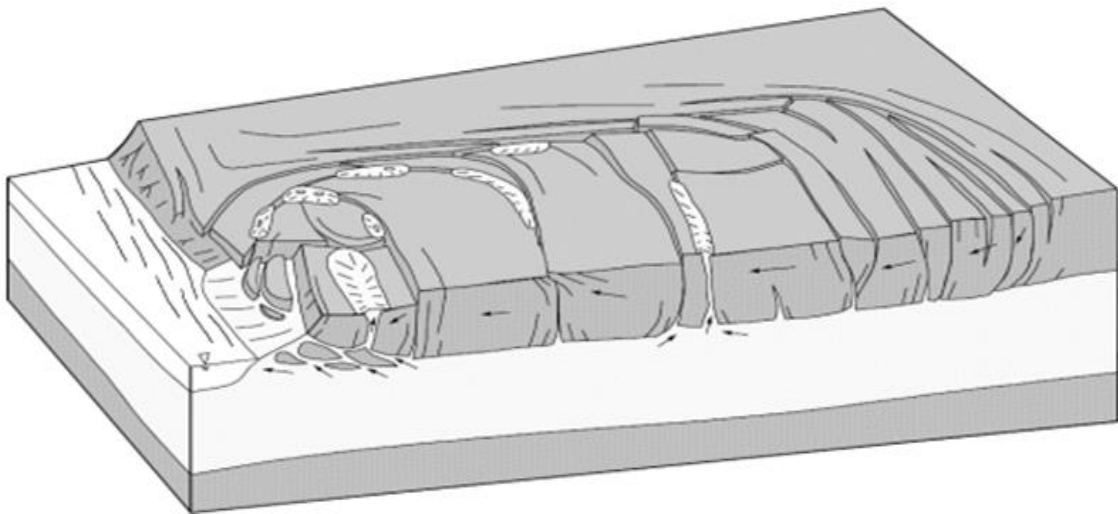
Deprem kaynaklı yatay çevrimsel gerilmeler, zeminin Çevrimsel Direnç Oranı (CRR)'ni belirlemek için düşey etkin konsolidasyon gerilmesi (σ'_v) ile normalize edilir (Şekil 2.31). İndüklenen gerilmelerin zeminin çevrimsel direncini aştığı derinliklerde sıvılaşma beklenir.



Şekil 2.31. Beklenen sıvılaşma bölgesi, deprem kaynaklı döngüsel gerilmelerin toprağın döngüsel dirençleriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir (Idris ve Boulanger, 2008)

2.5. Sıvılaşma Kaynaklı Yer Değiştirmesinin Mekanizması ve Korelasyonları

Sıvılaşma kaynaklı yer değişimi, Şekil 2.32'de gösterildiği gibi çok karmaşık deformasyon desenleri oluşturabilir. Zemindeki yer altı heterojenliği, sıvılaşma kaynaklı yer değiştirmenin büyüklüğünü ve dağılımını güçlü bir şekilde etkiler. Holzer ve Bennelt (2007), yatay yayımların sınırlarının genellikle yer altı hidro-jeolojik koşulları tarafından belirlendiğini göstermek için birkaç vaka geçmişi kullanmışlardır.



Şekil 2.32. Yanal yayılmada karmaşık deformasyon desenleri (Rauch, 1997)

Sıvılaşma tarafından indüklenen deformasyon geniş bir şekilde iki tipe ayrılır.

Bunlar:

1. Yatay Yayılma Deformasyonu
2. Düşey Yer Değiştirme (Oturma)

2.5.1. Yatay yayılma deformasyonu

Yanal yayılma genellikle hafif eğimli veya daha dik yüzeylerde meydana gelir. Hafif eğimli zeminlerde, herhangi bir açık kanal veya yüzeye doğru yanal yayılma gerçekleşebilir ve bu hareket açık yüzeyden çok uzak mesafelere kadar yayılabilir. Yanal yayılmayı tahmin etmek için kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlar kısaca şöyledir:

2.5.1.1. Kalıcı kesme deformasyonlarının tahmini

Sıvılaşmış bölgelerde (ve gerektiğinde sıvılaşmamış bölgelerde) beklenen kalıcı kesme deformasyonlarını tahmin edin. Ardından, bu deformasyonları derinlik boyunca entegre ederek zemin yüzeyindeki olası yanal yer değiştirmeyi hesaplayın. Tahmini yanal yer değiştirme, vaka tarihçesi gözlemlerine göre kalibre edilerek ampirik olarak ayarlanabilir.

2.5.1.2. Ampirik modellerle yer değiştirme tahmini

Geçmiş zemin yer değiştirme gözlemlerine dayalı regresyon analiziyle türetilen ve gözlemlenen yer değiştirmeleri güçlü şekilde etkileyen parametreleri içeren başlıca ampirik modeller kullanarak kalıcı zemin yüzey yer değiştirmesini tahmin edin.

2.5.1.3. Newmark kayma bloğu analizi

Newmark kayma bloğu analizi ile kalıcı yer değiştirmeleri hesaplayın. Bu yöntemde, sarsıntının neden olduğu atalet kuvvetleri, güvenlik faktörünün geçici olarak 1'in altına düşmesine yol açtığı durumlarda yer değiştirme beklenir.

2.5.1.4. Detaylı doğrusal olmayan analizler

Doğrusal olmayan dinamik analizler ve sarsıntı sonrası doğrusal olmayan statik analizler gerçekleştirerek kalıcı yer değiştirmeleri hesaplayın.

2.5.2. Düşey yer değiştirme (Oturma)

Kumun deprem yüklemesi altında sıkılaşma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Deprem kaynaklı sıvılaşma sırasında kumun sıkılaşması, zemin yüzeyinde oturma şeklinde kendini gösterir. Sıvılaşma kaynaklı oturma, genellikle şu hasarlara yol açar: Sığ temeller üzerindeki yapılarda hasar, kazıklı yapıları destekleyen altyapı sistemlerinde hasar, genellikle sığ derinliklerde gömülü olan altyapı hatlarında hasar.

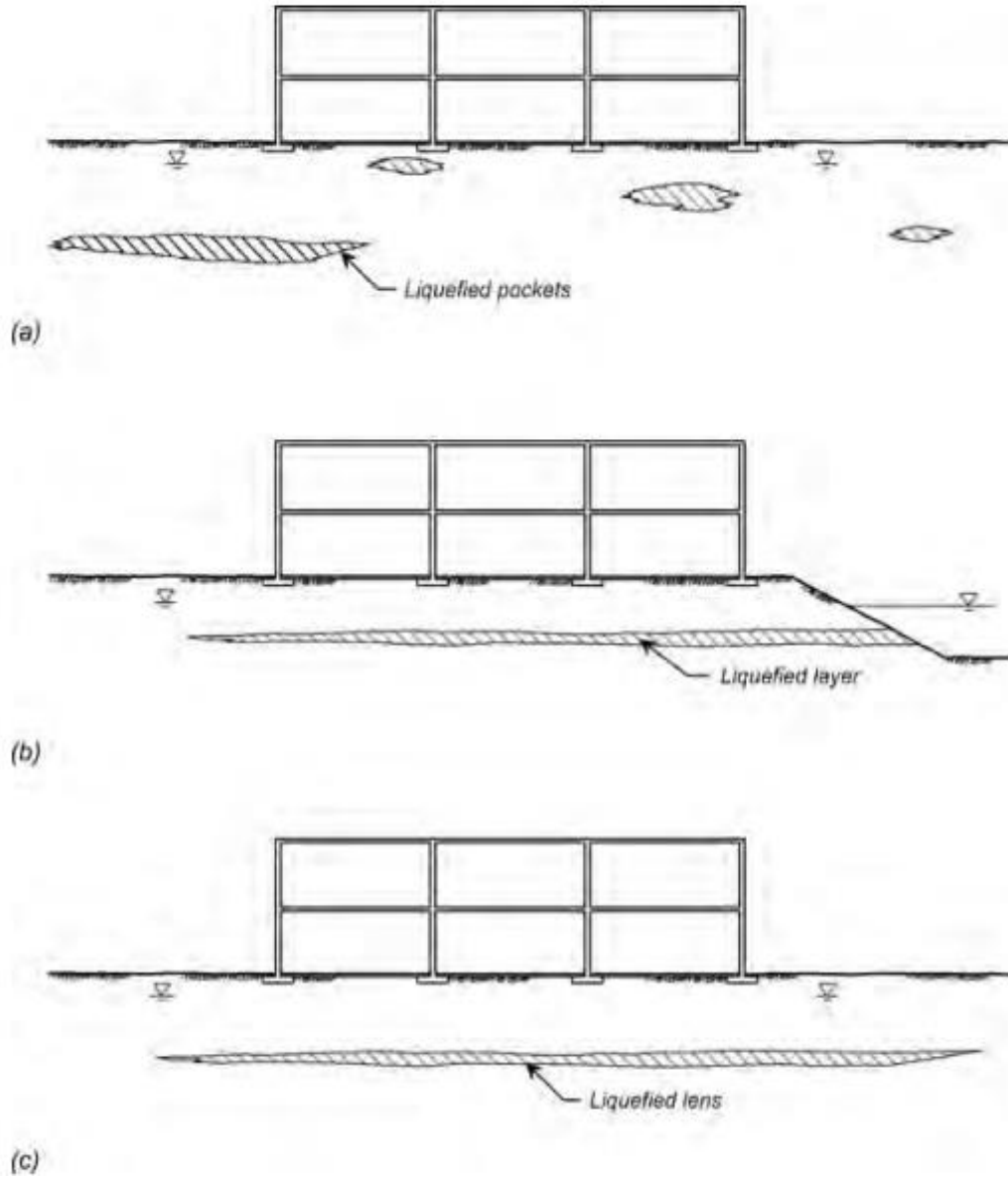
Düşey yer değiştirme iki şekilde gelişebilir:

1. Yanal yayılma ile ilişkili zemin kesme deformasyonunun neden olduğu düşey yer değiştirme
2. Sıvılaşmış zeminin yeniden konsolidasyonu (sıkılaşması) sonucu oluşan oturma.

Şekil 2.33'te, sığ temeller üzerine inşa edilmiş basit bir bina gösterilmektedir. Şekil yanal yayılma veya oturma koşullarını doğru şekilde temsil etmektedir. Durumlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

Şekil 2.33a: Yüzey boyunca dağınık ve süresiz sıvılaşma cepleri oluşması beklenir. Bu durumda, sıvılaşan cepler çevredeki sıvılaşmayan zeminler tarafından sınırlandırıldığı için saha yanal yayılmaya karşı daha dirençlidir. Ancak, tekil temeller önemli miktarda düşey yer değiştirme yaşayabilir. Cep şeklindeki sıvılaşma, binada değişken oturmalarla yol açarak daha ciddi hasarlara neden olabilir.

Şekil 2.33b: Bina temelini boydan boya kaplayan sürekli bir sıvılaşabilir tabaka tespit edilmiştir. Sürekli bir sıvılaşabilir tabaka, zeminin sağdaki kanala doğru yanal yayılma veya kararsızlık gösterme olasılığının yüksek olduğu anlamına gelir. Düşey hareket, sıvılaşan bölgenin yeniden konsolidasyonu ile kanal çevresindeki yanal yayılma ve çökmenin etkilerinin birleşiminden kaynaklanır.

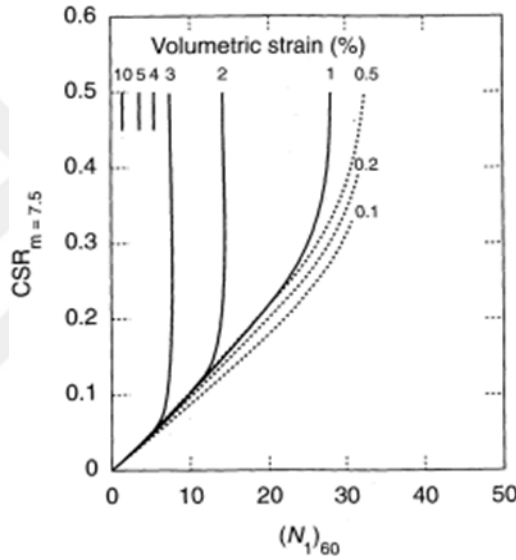


Şekil 2.33. Bir yapının altındaki sıvılaştırmış bölgelerin mekânsal dağılımı: (a) izole cepler, (b) yakındaki serbest bir yüzeye doğru yanal yayılma potansiyeline sahip bir tabaka, (c) yanal yayılma potansiyeli olmayan düz zemin altındaki izole bir tabaka (Idris ve Boulanger, 2008)

Şekil 2.33c: Bu durum, 2.33b'ye benzer, ancak sıvılaştırılabilir tabaka tüm yönlerden sıvılaştırmayan zeminlerle çevrilidir. Bu koşullarda, 2.33b'ye kıyasla daha az yanal yer değiştirme beklenir. Ancak, yapı temellerinin oturması, 2.33a'dakine göre daha düzgün bir şekilde gerçekleşir. Bunun nedeni, sıvılaştırılabilir zeminin daha derinde olması ve kalın sıvılaştırmayan tabakalarla çevrili olmasıdır.

2.5.3. Oturmanın amperik formülleri

Deprem sonrası doygun kumun sıkılaşması, kumun yoğunluğuna, kumda oluşan maksimum kesme deformasyonuna ve depremin ürettiği aşırı boşluk suyu basıncı miktarına bağlıdır. Tokimatsu ve Seed (1987), $(N_1)_{60}$ değeri ve Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR) kullanarak, büyüklüğü $M = 7.5$ olan bir depremde sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyonun doğrudan CSR ve SPT direncinden tahmin edilmesini sağlayan bir grafik geliştirmiştir (Şekil 2.34). $M=7.5$ dışındaki büyüklüklere sahip depremler için, eşdeğer çevrimsel gerilme oranı (CSR_m) elde etmek amacıyla Çizelge 2.13 kullanılabilir.



Şekil 2.34. Doymuş kumlardaki hacimsel gerilmenin döngüsel gerilim oranı ve standart penetasyon direncinden tahmini için grafik (Tokimatsu ve Seed'den sonra, 1987)

Çizelge 2.11. Büyüklük düzeltmesi döngüsel stres yaklaşımı için faktörler(Kramer, 1996)

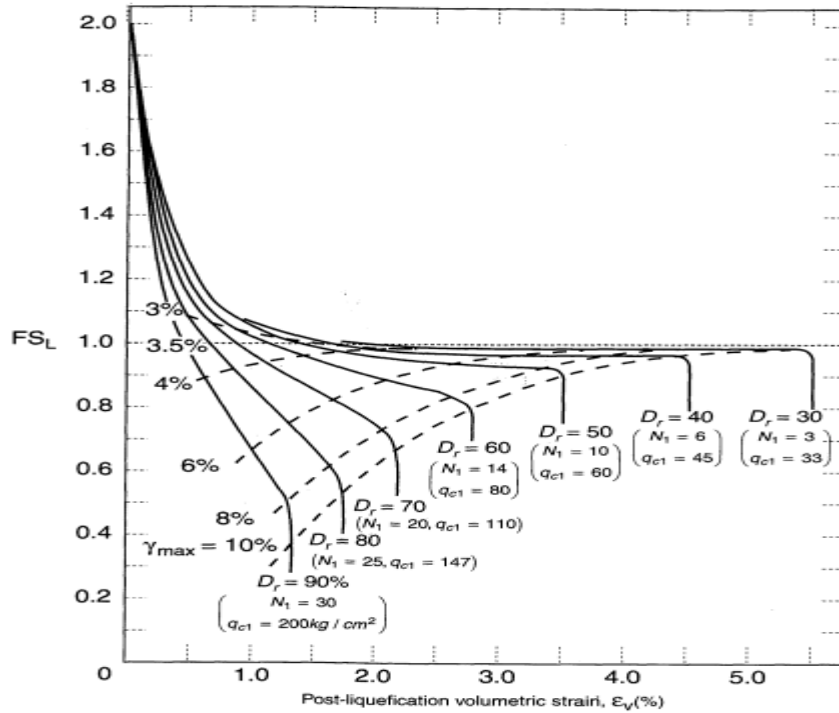
M	$CSR_M / CSR_{M=7.5}$
5.25	1.5
6	1.32
6.25	1.13
7.5	1.00
8.5	0.89

Şunu belirtmek gerekir ki, sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon gevşek kumda %2–3 aralığında iken, orta sıkılıkta kumda bu değer daha düşük olabilir. Çok gevşek kumlarda ise daha yüksek değerler beklenebilir. Şekil 9.53'ü uygulamak için gereken iki parametreden biri olan SPT-N değeri saha testlerinden elde edilebilir. CSR için ise Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen basitleştirilmiş yöntem kullanılabilir.

$$\tau_{cyc} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d \quad (2.16)$$

$$(CSR)_{field} = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v,0}} \quad (2.17)$$

Alternatif bir yaklaşım olarak, hacimsel deformasyon, Şekil 2.35 kullanılarak maksimum çevrimsel kayma deformasyonuna karşı güvenlik katsayısı, bağıl yoğunluk, SPT-N veya CPT direnci ile hesaplanabilir. Bu hacimsel deformasyonların sıvılaşmaya yatkın tabakanın kalınlığı boyunca entegrasyonu, toplam zemin yüzeyi oturmasını verir.



Şekil 2.35. Temiz kumun sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyonunu, sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı veya maksimum kayma deformasyonu fonksiyonuna göre tahmin etmek için grafik. (Ishihara ve Yoshimine'dan sonra, 1992)

Oturma hızı, sıvılaşmaya uğrayan zeminin yeniden konsolidasyon özelliğine bağlıdır. Genellikle, sıvılaşma uğramış zeminin alt kısmından başlayarak yukarı doğru ilerler (Florin ve Ivanov, 1961; Heidari ve James, 1982).

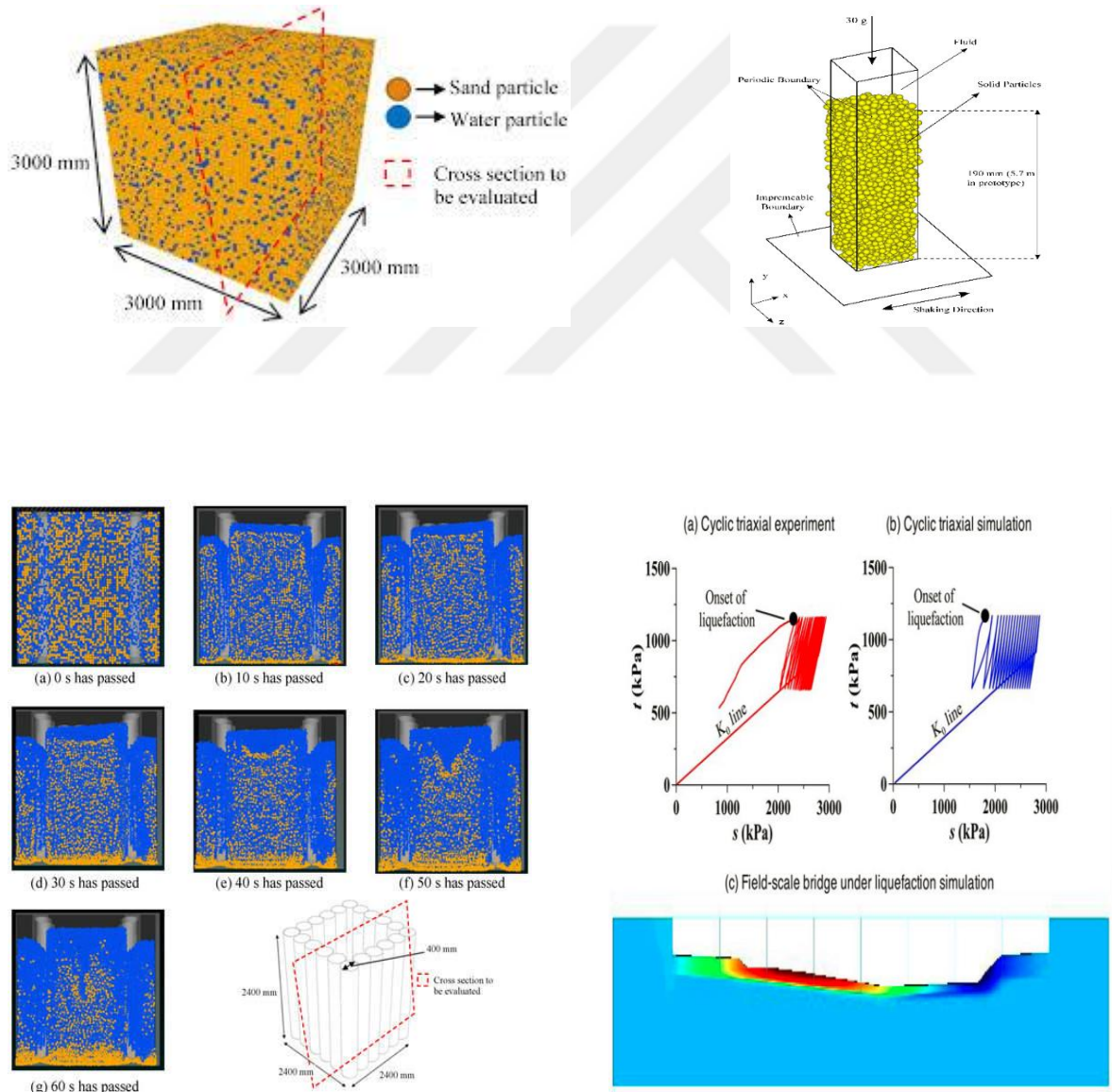
2.6. Sayısal Modelleme ve Sıvılaşma Simülasyonu

Deprem sırasında kumlu zemin kütlelerinin sıvılaşması ve deprem kaynaklı zemin deformasyonları, sivil altyapıların tasarımı ve değerlendirmesiyle ilgilenen mühendisler için önemli bir endişe kaynağı olmaya devam etmektedir. Binalar (okullar, hastaneler), ulaşım tesisleri (köprüler, yollar, limanlar) ve su sistemleri (barajlar, setler, boru hatları) tipik örneklerdir. Deprem sırasında doygun kum ve siltli kum gibi sıvılaşabilir zeminlerin davranışını tahmin etmek için çok sayıda sayısal modelleme platformu geliştirilmiş ve kullanılmaktadır. Örneğin: DEEPSOIL: Tek boyutlu analizler için, PLAXIS: İki ve üç boyutlu analizler için, FLAC: Üç boyutlu (3D) analizler için.

Bu araçlar, doğrulama için resmi bir süreç olmasa da altyapı sistemlerinin değerlendirilmesinde pratikte kullanılmaktadır. Sıvılaşma Deneyleri ve Analiz Projesi (LEAP) (Arulanandan ve Scott, 1990), konstitütif modellerin değerlendirilmesi, kalibrasyonu ve doğrulanması için güvenilir deneysel veri üretmeyi amaçlayan işbirlikçi bir araştırma projesidir. Sıvılaşma ve etkilerinin analizi için mevcut sayısal modelleme teknikleri. LEAP-UCD 2017 güncel bir örnektir.

1964 Alaska depreminin ardından, dünya genelindeki araştırmacılar sıvılaşma üzerine kapsamlı çalışmalar başlatmıştır. İlk aşamada, Çevrimsel Üç Eksenli Test ve Basit Kesme Testi gibi laboratuvar deneyleriyle sıvılaşma davranışı incelenmiştir. Benzer şekilde, Seed ve Idriss (1971), bağıl yoğunluk, tane boyutu, boşluk suyu basıncı, etkin çevrimsel gerilme ve zeminin çevrimsel mukavemeti gibi parametrelere dayalı ampirik ilişkiler geliştirmiştir. 1980'lerde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle, Ishihara (1985) gibi araştırmacılar ilk basit sayısal sıvılaşma modellerini oluşturmuştur (şekilde gösterildiği gibi). Ardından, Sonlu Elemanlar Modeli (FEM) ve Sonlu Farklar Modeli (FDM) gibi yöntemler diğer araştırmacılar tarafından önerilmiştir.

FEM ve FDM, doğrusal olmayan P-y Yay Modeli gibi modellerin boşluk suyu basıncı birikimini ve temel tepkisini simüle edememesi nedeniyle bu amaçla kullanılmaya başlanmıştır. Klasik konstitütif modellerin çevrimsel yükleme altında boşluk suyu basıncını gerçekçi şekilde modellemedeki yetersizliği, son yıllarda daha gelişmiş sayısal kodların kullanımını zorunlu kılmıştır. Deprem tepkisini ve kesme-hacimsel deformasyon birikimini tahmin edebilen konstitütif modeller geliştirmek için büyük çabalar sarf edilmiştir. SANISAND, FLAC'ta PM4S, PLAXIS'te Hardening Soil Model with Small Strain ve UBC-PLM 3D gibi zemin modelleri, gelişmiş model örnekleridir.



Şekil 2.36. Sıvılaşmayı simüle etmek için bazı sayısal modeller

3. YÖNTEM

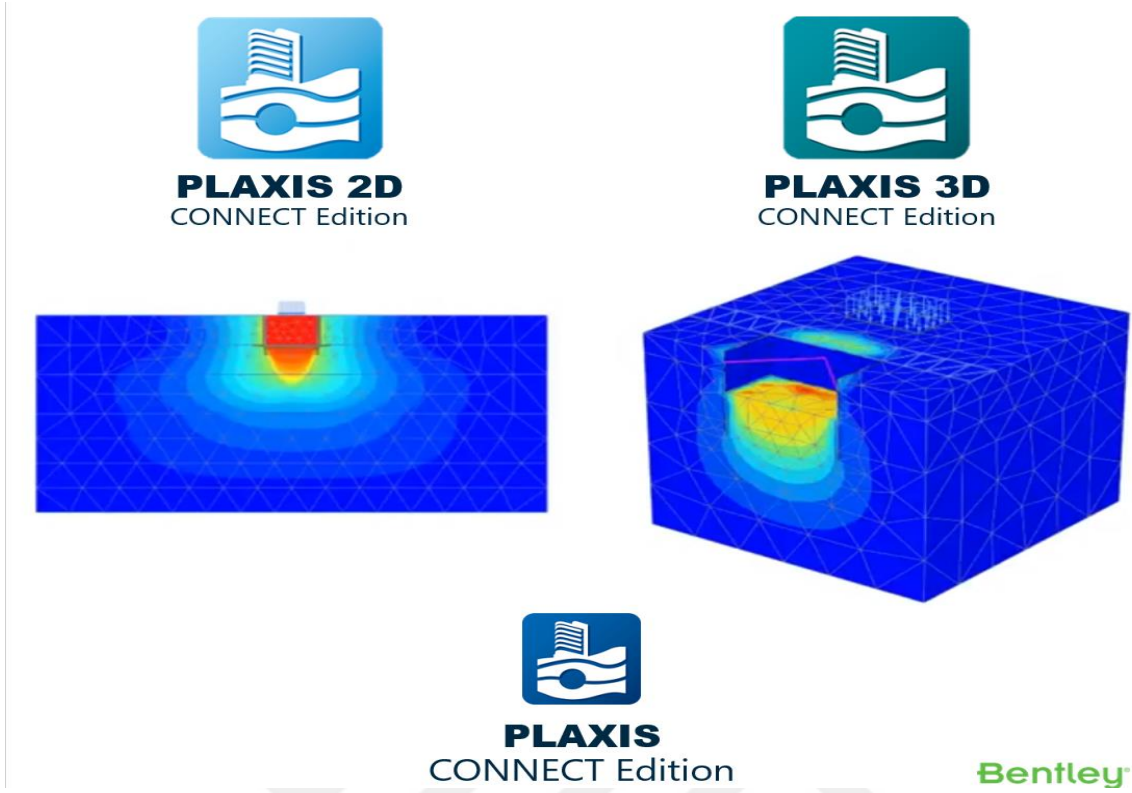
3.1 PLAXIS 2D Programı

3.1.1 Giriş

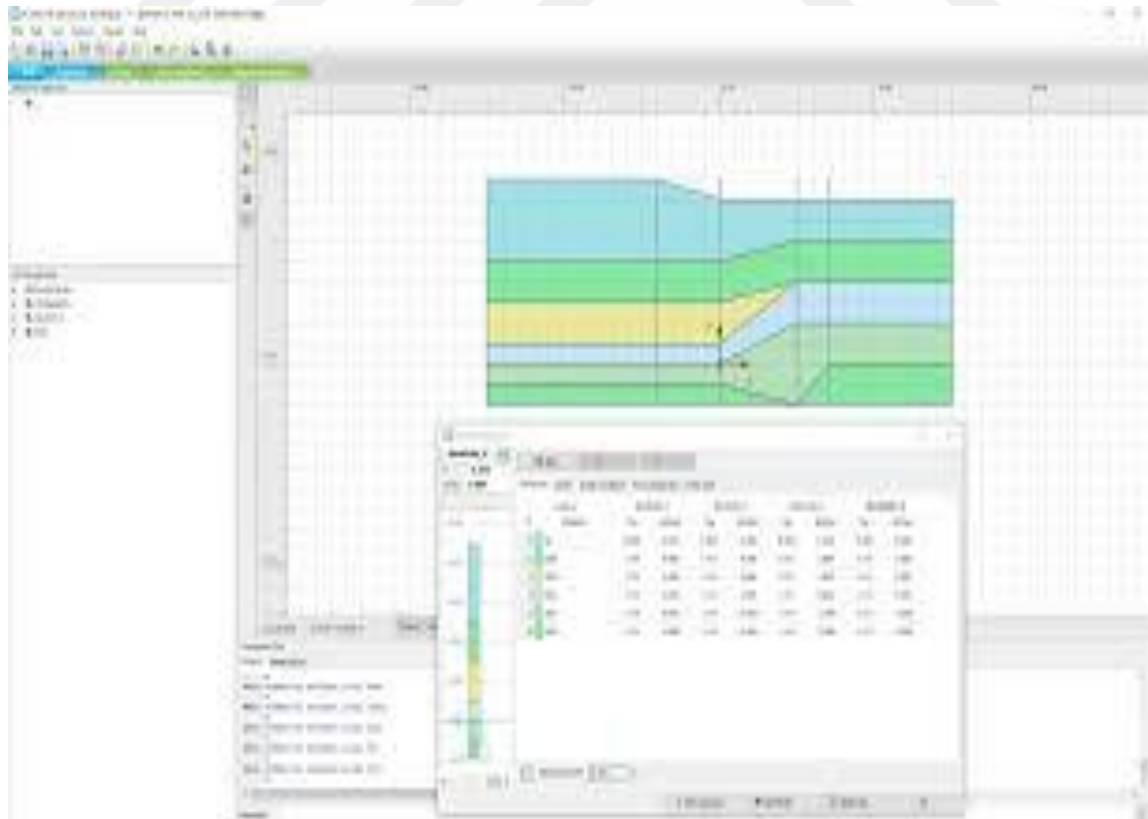
PLAXIS, geoteknik mühendisliğinde deformasyon, şev stabilitesi, yeraltı suyu akışı ve sıvılaşma analizleri için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. PLAXIS'in ilk geliştirilmesi, Hollanda Bayındırlık ve Su İşleri Bakanlığı'nın bir girişimi olarak 1987 yılında Delft Teknoloji Üniversitesi'nde başlamıştır. İlk amaç, nehir setlerinin analizi için kullanımı kolay 2D sonlu elemanlar kodu geliştirmektir. 2018 itibarıyla PLAXIS, altyapı projelerinin planlanması, tasarımı ve izlenmesi için yazılım geliştirme konusunda uzmanlaşmış bir şirket olan Bentley sisteminin bir parçası haline gelmiştir. Ayrıca, 2021 yılında PLAXIS, Bentley'nin yeraltı mühendisliği odaklı şirketi SEEQUENT'in bir parçası olmuştur. PLAXIS, PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D olarak iki farklı versiyonda kullanıcılara sunulmaktadır (Şekil 3.1).

PLAXIS 2D, PLAXIS yazılımının iki boyutlu formatıdır. Geoteknik mühendisliği ve mekaniği alanında deformasyon ve stabilitenin iki boyutlu analizleri için bir Sonlu Elemanlar Yazılım paketidir. Deformasyonlar, zemin gerilmesi, su akışı, gözenek suyu basıncı, yapısal kuvvetler, deprem kaynaklı sıvılaşma, serbest titreşim hesaplamaları ve hatta hem düzlem şekil değiştirme hem de eksenel simetrik problemlerde termal akış hesaplamalarını yapabilme yeteneğine sahiptir. Kazılar, barajlar, dolgular, tünel iyileştirmesi ve zemin iyileştirmesi gibi yapıların tasarımında kullanılır. Hızlı ve verimli model oluşturma için CAD benzeri bir ortam sağlar (Şekil 3.2).

PLAXIS 2D, iki alt programdan oluşur: PLAXIS 2D Input ve PLAXIS 2D Output. PLAXIS 2D Input'ta, zemin ve malzeme özellikleri tanımlanır, zemin profili ve yapı oluşturulur, sonlu elemanlar yöntemine göre ağ (mesh) oluşturulur, su seviyesi belirlenir, farklı aşamalar tanımlanır ve analiz türüne bağlı olarak parametrelere değerler atanır. Örneğin, dinamik analizde dinamik yükleme tanımlanır. Benzer şekilde, PLAXIS 2D Output analiz sonuçlarını görüntülemek, grafikler oluşturmak ve sonuçları yazdırmak için kullanılır.

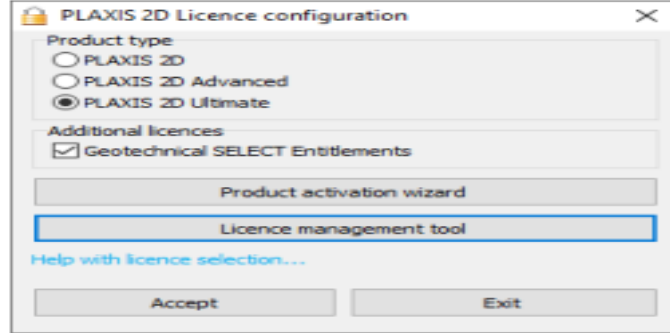


Şekil 3.1. PLAXIS 2D ve 3D versiyonu (PLAXIS, 2010)



Şekil 3.2. PLAXIS 2D'nin kullanıcı arayüzü (PLAXIS, 2010)

Ayrıca, PLAXIS farklı analiz türlerine göre çeşitli versiyonlarda sunulmaktadır. Örneğin, PLAXIS Advanced (Konsolidasyon), PLAXIS Ultimate (Dinamik) (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. PLAXIS 2D'de mevcut lisans türleri(PLAXIS, 2010)

3.1.2 PLAXIS 2D'deki modlar

PLAXIS, mod tabanlı bir programdır. Çeşitli geoteknik problemler ve olayların kolay tasarımı ve analizi için modlar içerir. Temel olarak beş moddan oluşur:

3.1.2.1. Zemin modu(Soil mode)

Zemin profili sondaj opsiyonu kullanılarak bu modda tasarlanır ve su seviyesi tanımlanır. Bu modda malzeme özellikleri atanır ve malzeme veri tabanı oluşturulur.

3.1.2.2. Yapı modu(Structure mode)

Geometrik şekiller, yapısal elemanlar, zemin sınır koşulları, ara yüzeyler, tanımlı dinamik yer değiştirme, yükler ve benzeri parametreler bu modda tasarlanır ve tanımlanır.

3.1.2.3. Ağ modu(Mesh mode)

Ağ (mesh) bu modda oluşturulur. Geometri tamamen tanımlandıktan sonra sonlu eleman hesaplamalarının yapılabilmesi için ağ yapılandırılarak sonlu elemanlara bölünmelidir.

3.1.2.4. Akış durumu modu(Flow condition mode)

PLAXIS 2D'nin bir modudur ve zemin modelinde suyun hareketini veya su seviyesi koşullarını tanımlamak için kullanılır. Akış Durumu Modu, zemin içindeki suyun nasıl hareket ettiğini, yeraltı suyu basıncını ve sıvılaşma gibi etkileri değerlendirmek için çok önemlidir. Zemin üzerindeki yüklemeler ve dinamik etkilerle birlikte yeraltı suyu hareketinin analizi, özellikle sıvılaşma analizi veya su baskınlarının etkilerini modellemek için gereklidir.

3.1.2.5. Kademeli inşaat modu(Staged construction mode)

İnşaat aşamaları bu modda tanımlanabilir. Sonlu eleman hesaplaması birkaç ardışık hesaplama aşamasına bölünebilir. Her hesaplama aşaması belirli bir yükleme veya inşaat aşamasına karşılık gelir. Hesaplama aşamaları, Phase Explorer (Aşama Gezgini) içinde listelenir.

3.1.3 PLAXIS 2D zemin modelleri

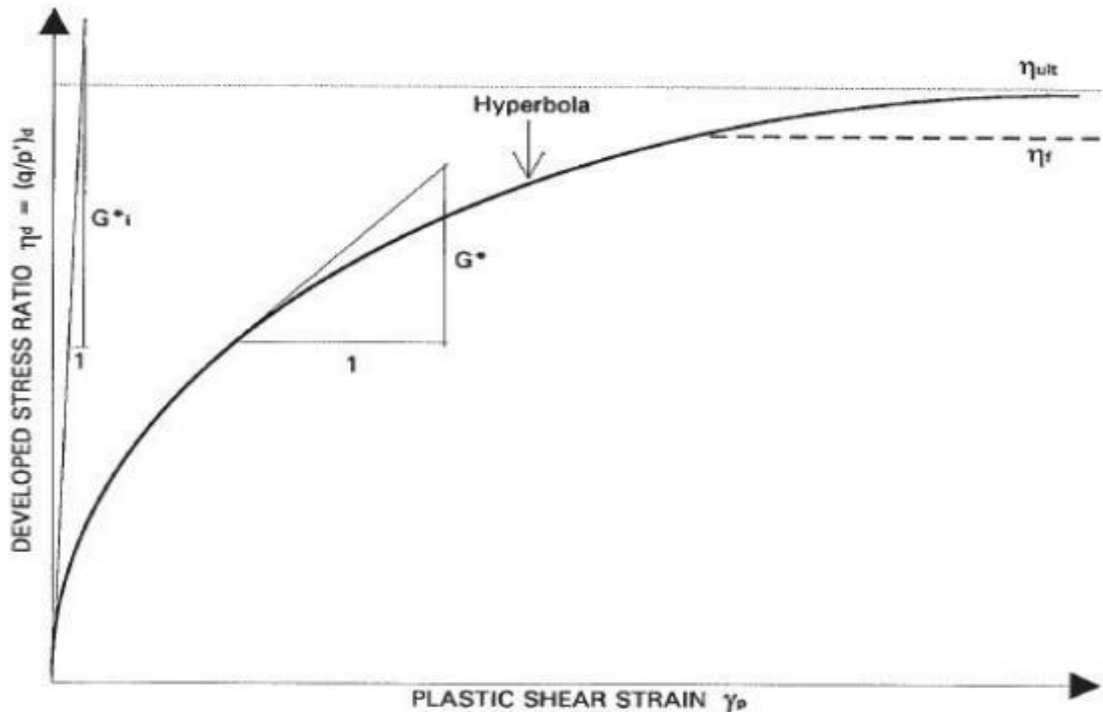
PLAXIS, daha doğru ve gerçekçi hesaplamalar yapmak için çeşitli ileri düzey zemin modelleri sunar. Bunlardan bazı aşağıda listelenmiştir:

1. The Mohr-Coulomb Modeli
2. The Hoek & Brown Modeli
3. The Jointed Rock Modeli
4. The Hardening Soil Modeli
5. The Hardening Soil with Small Strain Stiffness Modeli
6. The Modified Cam Clay Modeli
7. The Soft Soil Modeli
8. The UDCAM-S Modeli
9. The UBD3D-PLM Modeli

Her bir model, belirli zemin türleri ve analiz ihtiyaçları için daha detaylı ve özel çözümler sunar. Bu çalışmada, UBC3D-PLM modeli kum için ve Hardening Soil modeli kil modellemesi için kullanılmıştır. Aşağıda kısaca açıklanmıştır:

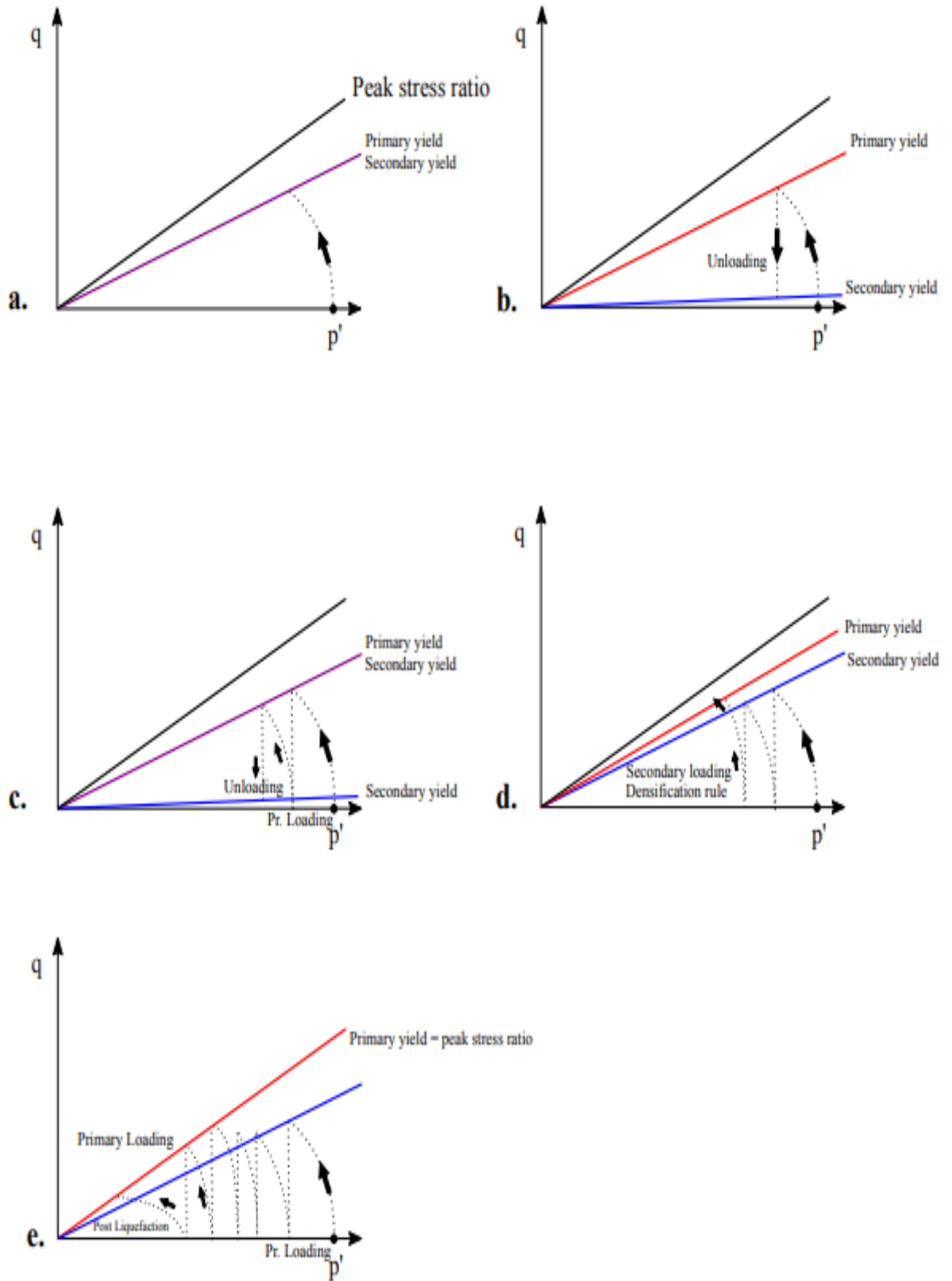
3.1.3.1. UBC3D-PLM modeli

Bu model, kohezif olmayan zeminlerin dinamik davranışı için geliştirilmiştir. Özellikle drenajsız davranışta aşırı boşluk basıncı oluşumu ve sıvılaşma ile ilgili problemlerin analizinde uygundur. UBC3D-PLM modeli, kumlar ve siltli kumların deprem yüklemesi altında sıvılaşma davranışını simüle edebilen etkili gerilme elastoplastik bir modeldir (Tsegaye, 2010; Petalas & Galavi, 2012). UBC3D-PLM modeli formülasyonu, Puebla, Byrne & Phillips (1997) ve Beaty & Byrne (1988) tarafından tanıtılan orijinal UBC kum modeline dayanmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Orijinal UBCSAND sertleştirme kuralı (Beaty ve Byrne, 1988)

UBC3D-PLM modeli, zeminlerin sıvılaşmış duruma geçişini sağlamak için iki yüzey kullanır ve birincil ve ikincil yüklemeleri ayırt etmeyi mümkün kılar, bu şekilde modelin geçişi ve sıvılaşma durumu düzgün bir şekilde simüle edilir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bu yüzeyler, zemin sıvılaştıkça meydana gelen davranış değişimini temsil eder.



Şekil 3.5. Zemin yoğunlaşmasını, sıvılaşmada yumuşak geçişi ve sıvılaşma sonrası davranışını dahil etmek için iki akma yüzeyinin tanıtılması (Beaty ve Byrne, 1988)

Çizelge 3.1. UBC3D-PLM modelinin parametreleri aşağıda birimleriyle listelenmiştir (PLAXIS, 2011)

Sertlik Parametreleri

Parametre	Açıklama	Birim
k_B^e	Elastik hacim modülü katsayısı	[-]
k_G^e	Elastik kayma modülü katsayısı	[-]
k_G^p	Plastik kayma modülü katsayısı	[-]

Gerilime Bağlılık ve Dayanım Parametreleri

Parametre	Açıklama	Birim
m_e	Elastik hacim modülünün	[-]
n_e	Elastik kayma modülünün	[-]
n_p	Plastik kayma modülünün	[-]
P_{ref}	Referans basınç	[kN/m ²]
φ_{cv}	Sabit hacim sürtünme açısı	[°]
φ_p	Zirve sürtünme açısı	[°]
c	Kohezyon	[kN/m ²]
σ_t	Çekme sınırı ve çekme	[kN/m ²]
$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş SPT değeri	[-]
R_f	Kırılma oranı	[-]
f_{dens}	Sıkılaştırma faktörü	[-]
f_{post}	Sıvılaşma sonrası faktörü	[-]

Deneylerde tüm parametrelerin değerlerini doğrudan sahadan almak çok zor olduğu için, Beaty ve Byrne (2011) bu parametreleri başlangıçtaki genel kalibrasyon için hesaplamak üzere normalize edilmiş SPT-N değeri $(N_1)_{60}$ 'ya dayalı bir dizi denklem önermiştir. Bu çalışmada, sadece SPT-N değeri mevcut olduğundan aynı formüller kullanılmaktadır.

$$k_G^{*e} = 21.7 \times 20 \times (N_1)_{60}^{0.3333} \quad (3.1)$$

$$k_B^{*e} = 0.7 \times k_G^{*e} \quad (3.2)$$

$$k_B^{*p} = k_G^{*e} \times (N_1)_{60}^2 \times 0.003 + 100 \quad (3.3)$$

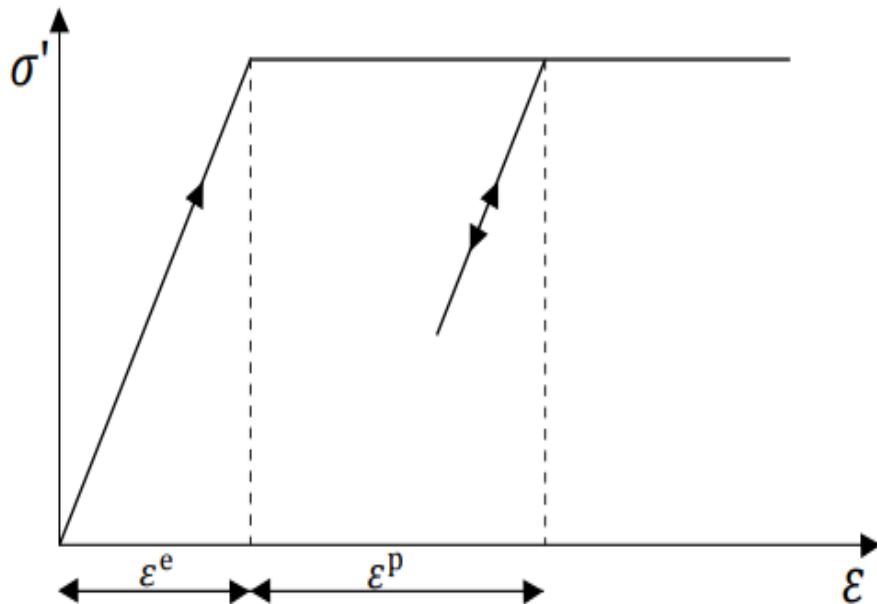
$$\varphi_p = \varphi_{cv} + \frac{(N_1)_{60}}{10} + \max \left(0; \frac{(N_1)_{60} - 15}{5} \right) \quad (3.4)$$

$$R_f \approx 1.1((N_1)_{60})^{-0.15} < 0.99 \quad (3.5)$$

$$(N_1)_{60} \approx \frac{RD^2}{15^2} \quad (3.6)$$

3.1.3.2. Mohr-Coulomb modeli

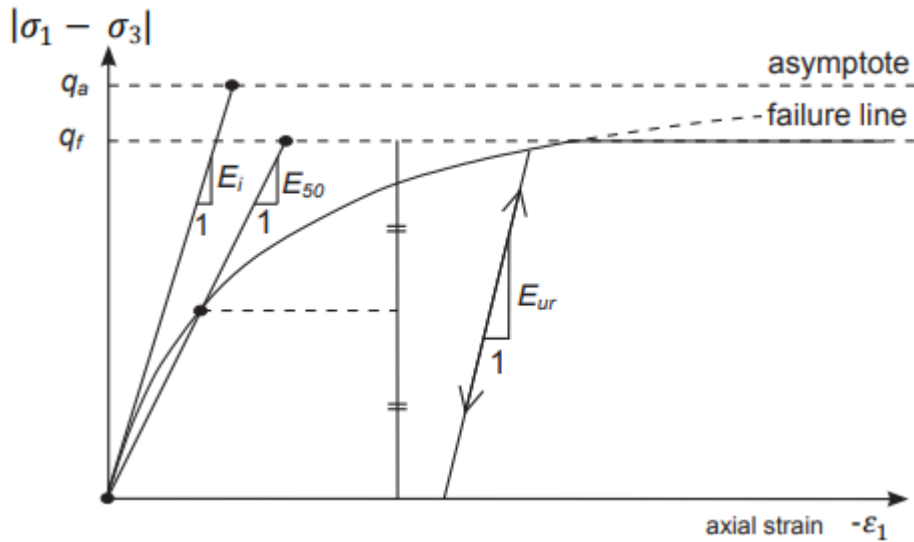
Mohr-Coulomb modeli, kil ve diğer kohezif zeminlerin modellenmesi için yaygın olarak kullanılır. Elastoplastik bir model olup, kesme direncini normal gerilme ile Mohr-Coulomb kırılma kriteri aracılığıyla ilişkilendirir (Şekil 3.6). Bu model, kilin davranışını simüle etmek için kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi parametreleri içerir. Kilin gerilme-şekil değiştirme davranışını temsil etmek için basit ancak etkili bir model olup, kil zeminler üzerinde inşa edilen yapıların stabilitesinin veya drenajsız yükleme koşullarının analizinde sıklıkla kullanılır. Mohr-Coulomb modeli, geoteknik mühendisliğinde hem drenajlı hem de drenajsız kesme direnç koşullarını analiz etmek için yaygın olarak tercih edilir.



Şekil 3.6. Elastik plastik bir modelin temel fikri (PLAXIS, 2010)

3.1.3.3. Hardening soil modeli

Hardening Soil Model, çeşitli durumlarda zeminin davranışını değerlendirmek için kullanılan, yakın zamanda geliştirilmiş ve gelişmiş bir zemin modelidir. Mohr-Coulomb modeline göre daha gerçekçi bir zemin modeli sunar. Modelin temel fikri, zeminin yükleme sırasında sertleşmesi ve dayanımının artmasıdır. Elastisite kuramı çerçevesinde oluşturulmuş olmakla birlikte, zemin özelliklerinin gerilme düzeyine bağımlı olarak değişmesi özelliğini de içerir. Mohr-Coulomb'un aksine, Hardening Soil Model üç rijitlik (stiffness) parametresi kullanır: Triaxial yükleme rijitliği (E_{50}), Boşaltma/yükleme rijitliği (E_{ur}) ve Oedometer rijitliği (E_{oed})(Şekil 3.7). Bu model; zemin oturmasının tahmini, derin kazı ve perde duvarı modellemesi, şev stabilitesinin incelenmesi gibi daha ayrıntılı zemin davranışlarını simüle etmek için kullanılır.(Schanz et al., 1999)

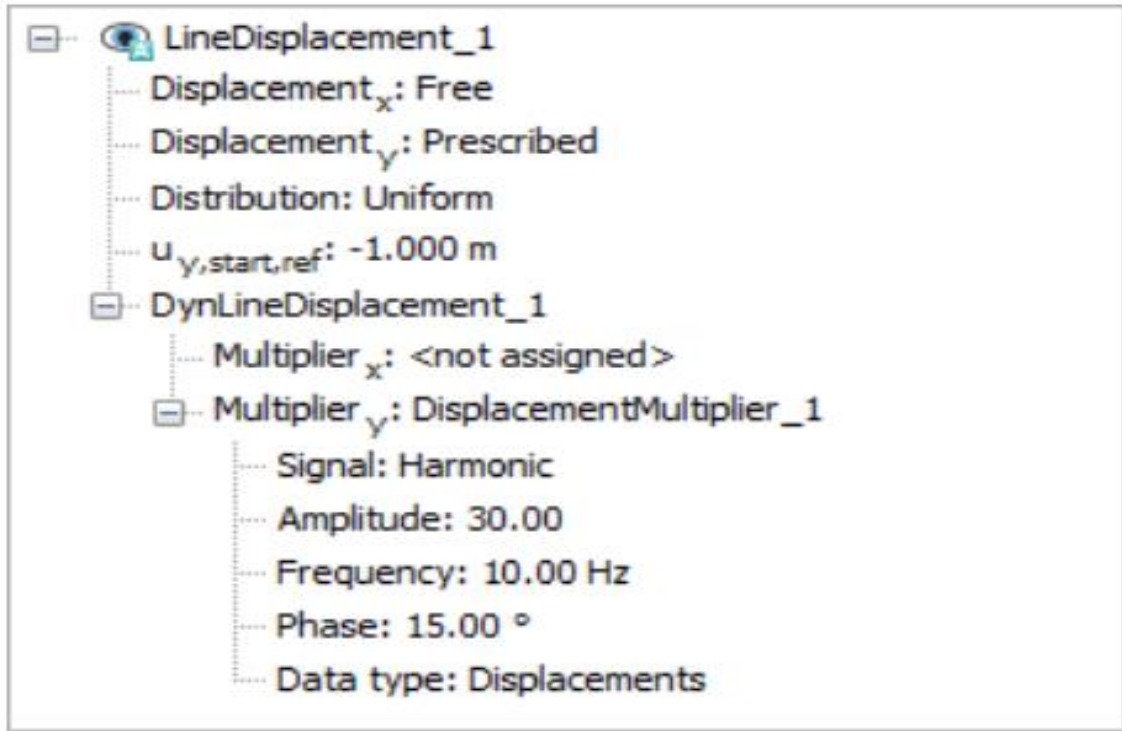


Şekil 3.7. Hardening Soil modelinde kullanılan hiperbolik gerilim-şekil değiştirme ilişkisi (Obrzud, 2010)

3.1.4 Çizgisel yer değiştirmesi tanımlama

Bir modelde çizgi yer değiştirmesi tanımlanabilir. Deprem gibi dinamik analizlerde, çizgi yer değiştirmesi modelin tabanında tanımlanır. Çizgi yer değiştirmesi iki bileşenden oluşur: Statik bileşen ve Dinamik bileşen (Şekil 3.8'de gösterildiği gibi). Çizgi Yer Değiştirme Bileşenleri için Seçenekler: Serbest (Free), Sabitlenmiş (Fixed), Belirlenmiş (Prescribed). Deprem Analizi için Ayarlar: X Yönünde Yer Değiştirme: Belirlenmiş

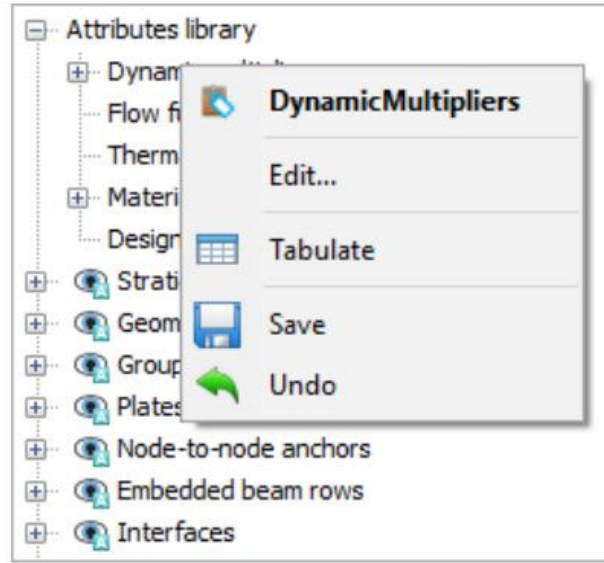
(Prescribed) seçilir, Y Yönünde Yer Değiştirme: Sabitlenmiş (Fixed) seçilir, Dağılım: Düzgün (Uniform) seçilir, Referans Başlangıç Noktası: +1 veya -1 olarak ayarlanabilir. Dinamik Bileşen Ayarları: Yer Değiştirme Çarpanı (Displacement Multiplier): X Çarpanı (Multiplier X): Dinamik yer değiştirme için çarpan değeri atanır. Y Çarpanı (Multiplier Y): Yok (None) seçilir. 'Multiplier' kavramı bir sonraki bölümde detaylandırılacaktır.



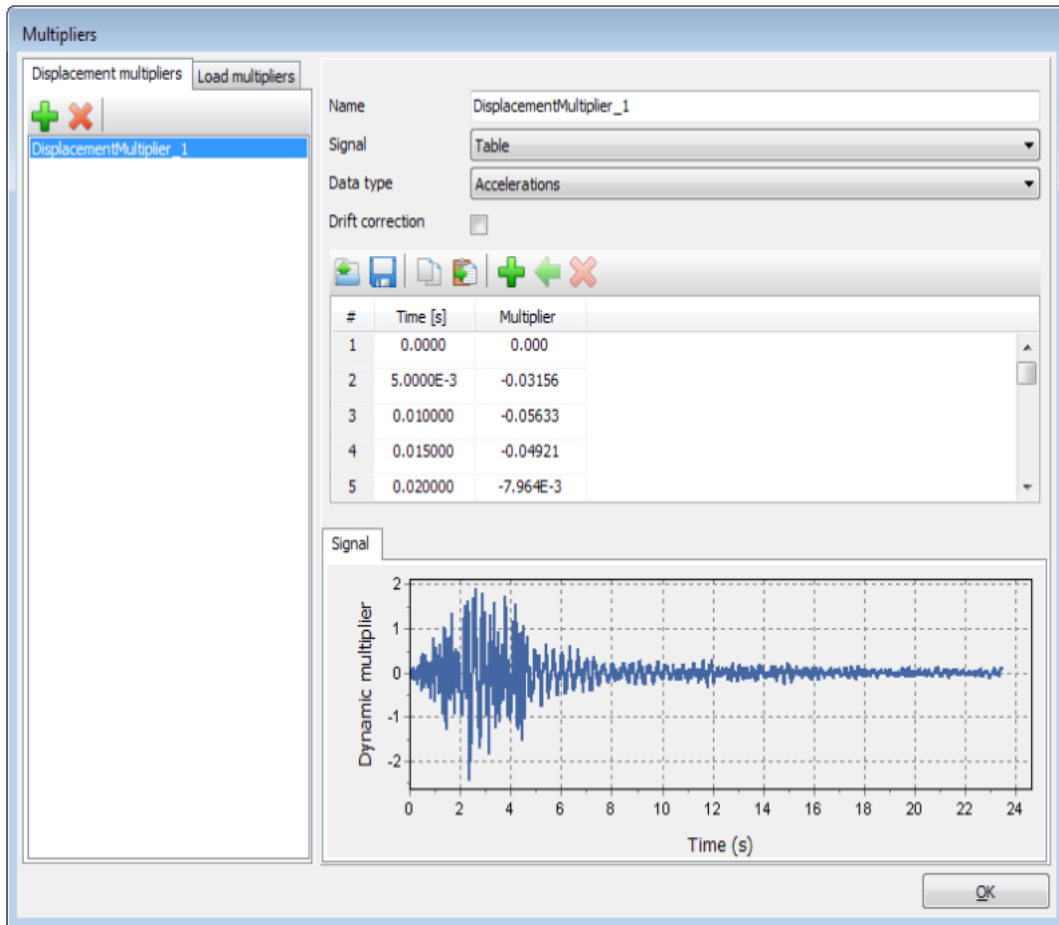
Şekil 3.8. Çizgi yer değiştirmesi parametreleri(PLAXIS, 2010)

3.1.5 Dinamik yükleme

PLAXIS 2D'de, dinamik bir yük bir giriş değeri ve çarpan(Multiplier) aracılığıyla belirtilir. Gerçek dinamik yük değeri, her zaman adımında giriş değeri ile çarpanının çarpımıdır. Deprem analizi durumunda, dinamik çarpan, bölüm 3.1.4'te belirtildiği gibi belirli bir 'Prescribed Displacement'e atanabilir. Modelde görünen dinamik çarpan, model gezginindeki Attribute kütüphanesinde Dinamik Çarpan olarak tanımlanabilir, Şekil 3.9'de gösterildiği gibi. Ivme verisi, Şekil 3.10'de gösterildiği gibi modele atanabilir. Veriler, Düz Metin Dosyası veya Strong Motion CD-ROM dosyaları olarak yüklenebilir.



Şekil 3.9. PLAXIS'te Dinamik Çarpanları tanımlama (PLAXIS, 2010)

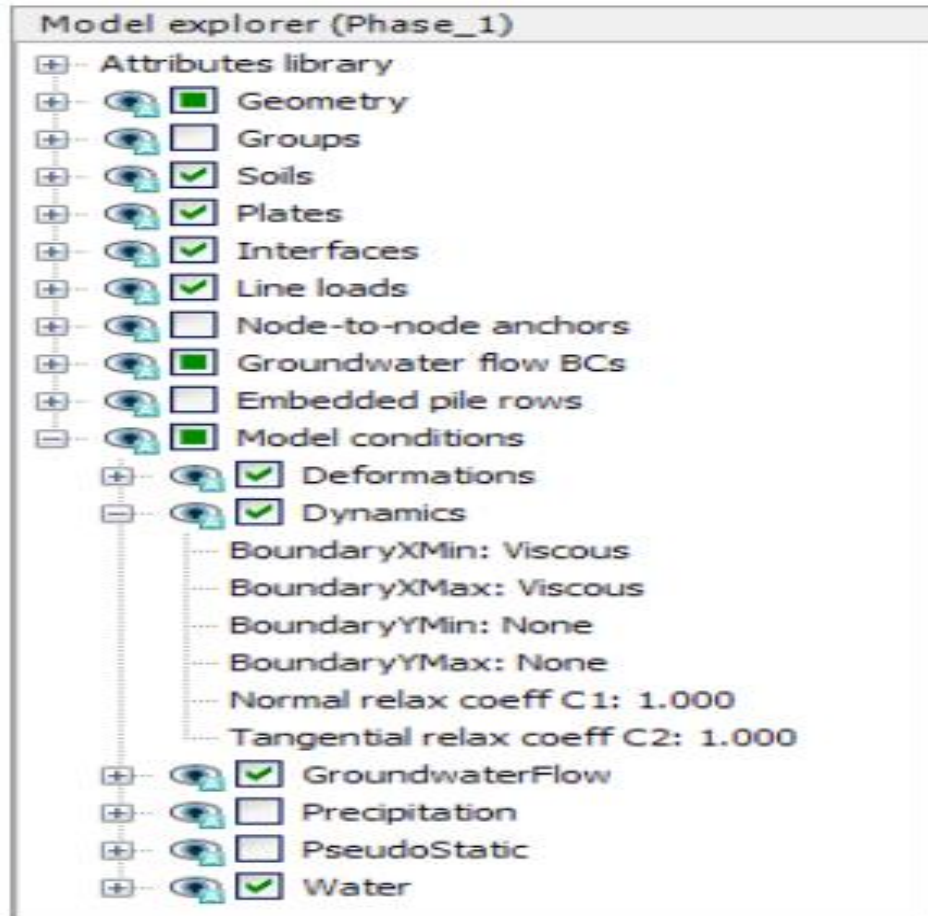


Şekil 3.10. PLAXIS'te ivmeölçerleri (accelerograms) tanımlama (PLAXIS, 2010)

3.1.6 Dinamik sınır koşulları

Deprem hareketi için, model sınırlarında dalga yansımalarını en aza indirmek üzere özel sınır koşulları tanımlanmalıdır. Seçilen bir faz için genel sınır koşulları, Model Explorer içindeki "Model Conditions" alt ağacında tanımlanabilir. Dinamik bir hesaplama tanımlandığında, sınır koşulları "Model Conditions" seçeneği altında görünen uygun seçeneklerle belirlenir. "Dynamic" seçeneği altında, aşağıdaki Şekil 3.11’de gösterildiği gibi model koşulları tanımlanabilir.

Önemli Not: Kullanıcı tanımlı model koşulları, Model Koşulları alt ağacında tanımlanan koşullardan her zaman önceliklidir. Deprem analizi yapılırken, aşağıdaki Çizelge 3.2’de gösterilen sınır koşulları uygulanır:



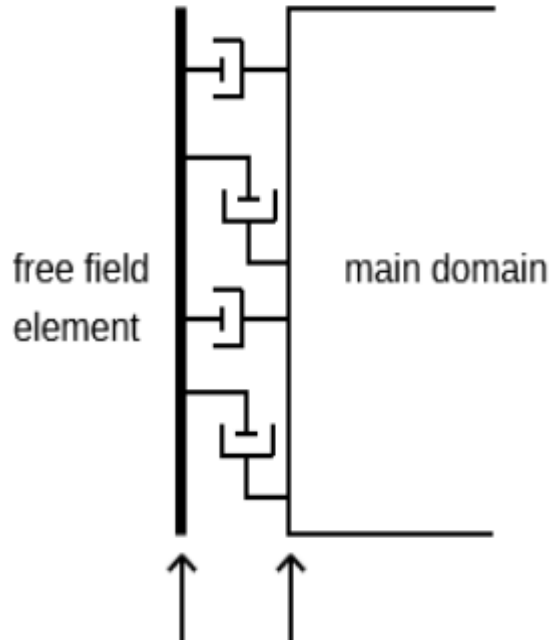
Şekil 3.11. Dinamik analiz için model koşullarının tanımlanması (PLAXIS, 2010)

Çizelge 3.2. Dinamik analiz için sınır koşullarının tanımlanması (PLAXIS, 2010)

No.	Sınır	Sınır Koşulları
1	Boundary X_{min}	Free Field
2	Boundary X_{max}	Free Field
3	Boundary Y_{min}	Compliant Base
4	Boundary Y_{max}	None

3.1.6.1. Free field sınır koşulu

Serbest alan sınır koşulları yalnızca modelin yan sınırları (X_{min} ve X_{max}) için kullanılabilir. Bu koşul, dalgaların sınırdaki minimum yansıma ile serbest alana yayılmasını simüle eder. Sınır koşulları, model ağı içindeki zemin tabakasıyla aynı özelliklerle karakterize edilir. Serbest alan hareketi, eşdeğer normal ve kesme kuvvetleri uygulanarak serbest alan elemanlarından ana modele aktarılır. Yan sınırların her bir düğüm noktasına, iç yapıdan yansıyan dalgaları emmek için normal ve kesme yönünde iki sönümleyici (dashpot) eklenir (Şekil 3.12’de gösterildiği gibi).



Şekil 3.12. Serbest alan sınır koşulunun şematik gösterimi (PLAXIS, 2024)

3.1.6.2. Compliant base sınır koşulu

Uyumlu taban sınır koşulu yalnızca modelin tabanı (Y_{min}) için kullanılabilir ve dalgaların derin zemin katmanlarına sürekli yayılımını simüleyerek taban sınırındaki yansımaları en aza indirir (Toyne ve Chen, 1975). Bu koşul, belirlenmiş yer değiştirme ve viskoz sınır kombinasyonundan oluşur. Girdi sinyali (yer değiştirme, hız veya ivme), eşdeğer normal ve kesme kuvvetleri uygulanarak ana modele aktarılır. Viskoz sınır, tabanın her düğüm noktasına normal ve kesme yönünde sönümleyiciler eklenerek oluşturulur; bu sönümleyiciler, aşağı doğru yayılan sıkışma ve kesme dalgalarını emer.

Serbest alan elemanından ana alana X yönündeki bir sönümleyici için aktarılan normal ve kayma gerilmesi bileşenleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= -C_1 \rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) \\ \tau &= -C_2 \rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff})\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}\sigma_n &= -C_1 \rho V_p (\dot{u}_x^d - 2\dot{u}_x^u) \\ \tau &= -C_2 \rho V_s (\dot{u}_y^d - 2\dot{u}_y^u)\end{aligned}\quad (3.8)$$

Uyumlu bir tabandaki eşdeğer gerilmeler 3.8'deki formüllerle verilir. Sönümleyicilerin tepkisi 2 ile çarpılır, çünkü girişin yarısı viskoz sönümleyiciler tarafından emilirken, diğer yarısı ana alana aktarılır. Uyumlu taban ile serbest alan sınır koşulları arasındaki temel fark budur.

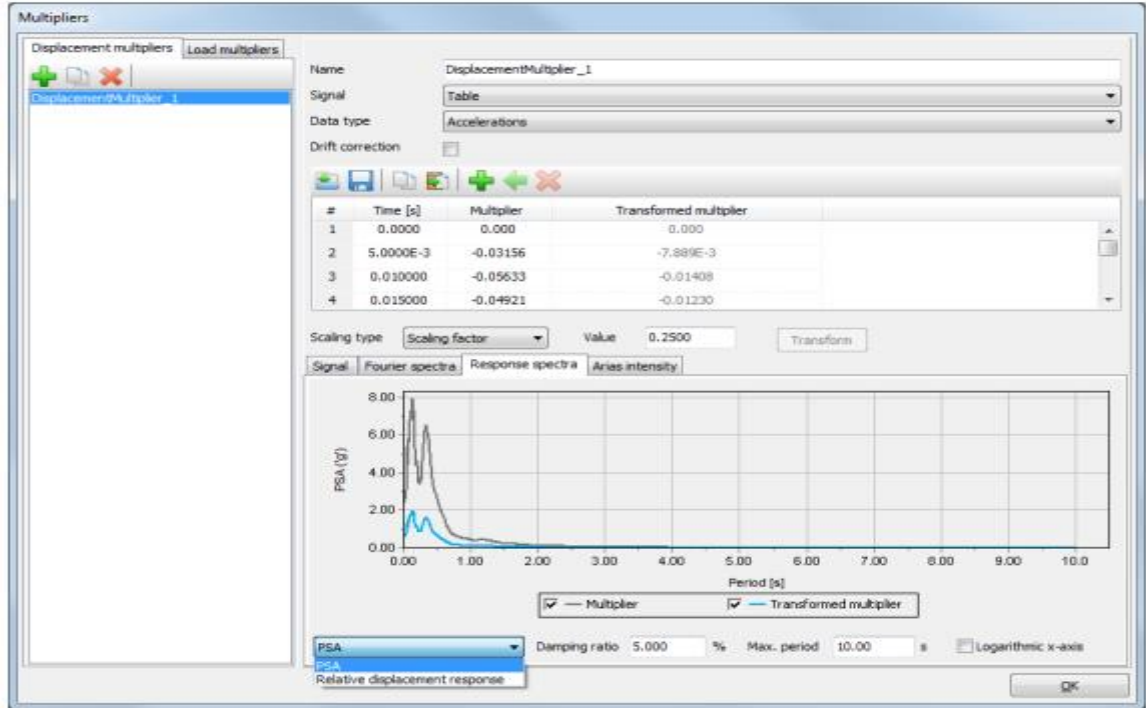
3.1.7 Dinamik analiz

PLAXIS 2D analizinde ilk adım, bir faz eklendikten sonra hesaplama türü menüsünden o faz için bir hesaplama türü tanımlamaktır. Başlangıç fazı için mevcut seçenekler yalnızca K_0 Prosedürü, Saha Gerilmesi ve Yerçekimi Yüklemesidir. Deformasyon analizi için ise Plastik, Konsolidasyon, Güvenlik, Dinamik, Konsolidasyonlu Dinamik ve Tam Birleşik Akış-Deformasyon gibi seçenekler mevcuttur.

Deprem analizi ve buna bağlı sınılaşma gibi olayları gerçekleştirebilmek için Dinamik seçeneği seçilmelidir. Dinamik yükler, Yer Değiştirme Çarpanı veya Yük Çarpanı aracılığıyla uygulanabilir. Bu çarpanlar harmonik formda ya da giriş tablosu şeklinde tanımlanabilir; ancak bu çalışmada giriş tablosu formu tercih edilmiştir. Uygulanan dinamik yük, tanımlanan dinamik yükün giriş değeri ile buna karşılık gelen dinamik yük çarpanının çarpımından elde edilir.

PLAXIS'te deprem analizi için çeşitli doğrusal olmayan yerel (native) ve UDSM modelleri sunulmaktadır. Genel olarak, PLAXIS'te sunulan tüm yerel modeller bazı sınırlamalar göz önünde bulundurularak dinamik analiz ile birlikte kullanılabilir. UBC3D-PLM ve PM4Sand, PLAXIS'te dinamik analiz için mevcut olan sınılaşma modelleridir ve laboratuvar testlerinin bulunmaması durumunda parametreleri SPT veya CPT verilerinden tahmin edilebilir.

Giriş ivme kayıtlarının işlenmesi ve düzenlenmesi, deprem analizinin temel bileşenlerindendir. Gerekli PGA (tepe yer ivmesi) değerine sinyali ölçeklemek için dinamik çarpan sekmesinde seçenekler mevcuttur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Giriş ivme verilerinin ölçeklenmesi (PLAXIS, 2010)

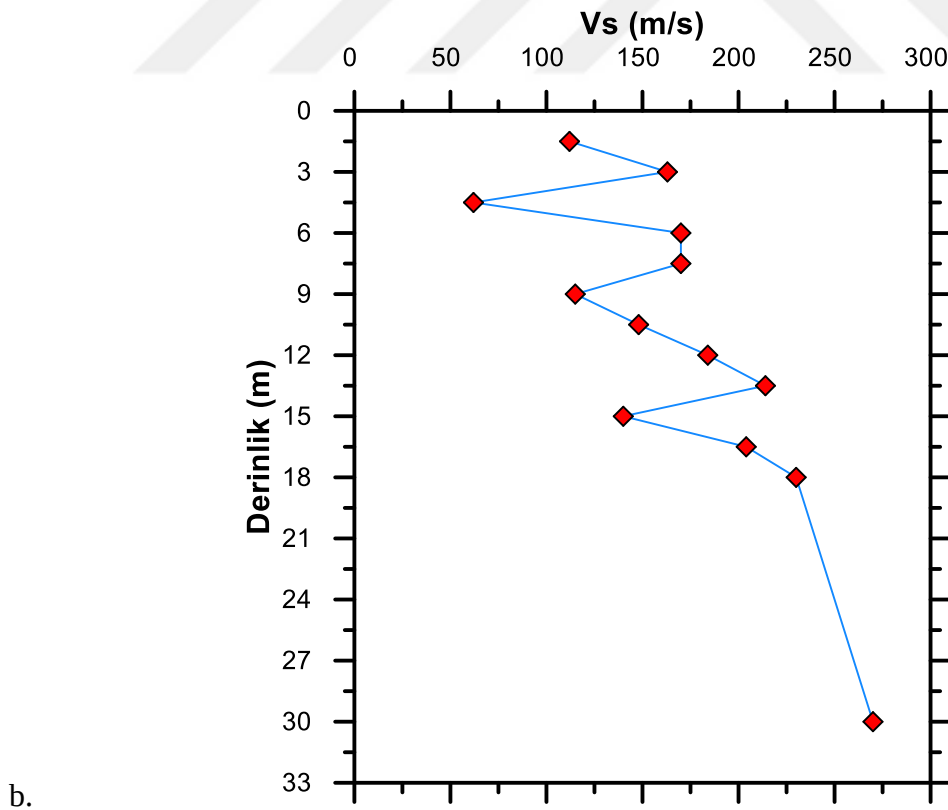
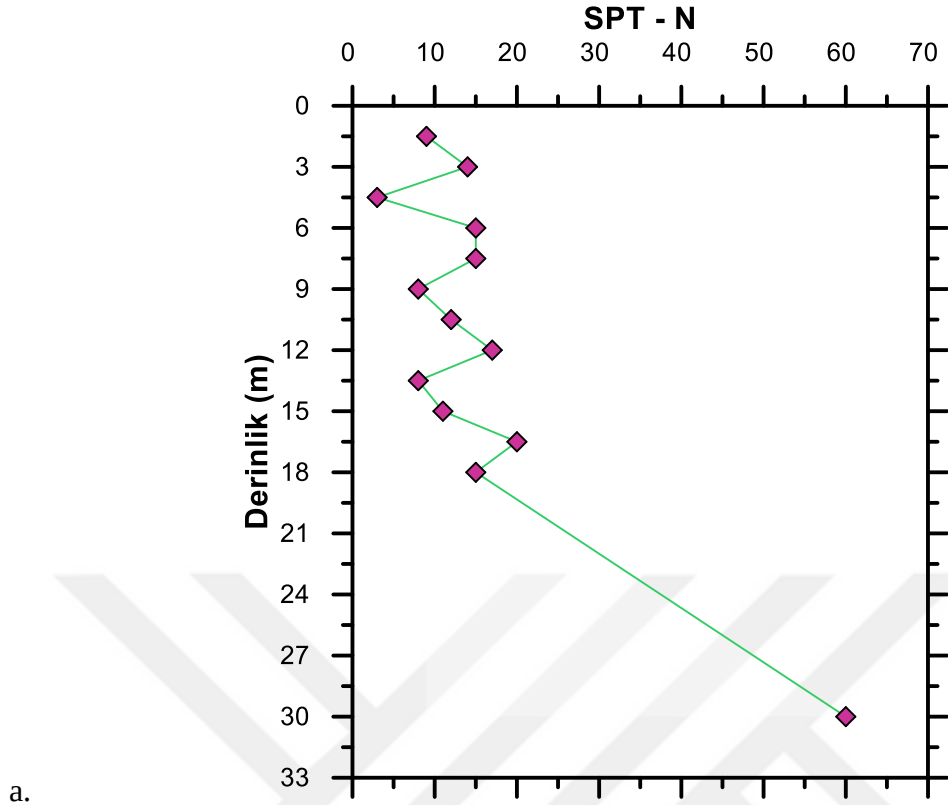
Ayrıca, giriş ivme kayıtları kolaylıkla Fourier Büyütme Spektrumu, Güç Spektrumu, Alan Şiddeti veya PSA olarak aktarılabilir ve görselleştirilebilir. PLAXIS, çeşitli nedenlerle (örneğin, cihaz gürültüsü veya arka plan gürültüsü) oluşan yer değiştirme sapmasını düzeltmek için sapma düzeltme (drift correction) seçeneği de sunar. Döngüsel yükleme nedeniyle oluşan enerji sönümü, sönümleme (damping) yoluyla tanımlanabilir. Histeretik ve viskoz malzeme sönümlemesi ile birlikte sayısal sönümleme seçenekleri mevcuttur. Sayısal sönümleme, varsayılan Newmark Alfa ve Beta parametreleri değiştirilerek uygulanabilir. Otomatik zaman adımı şeması, uygun zaman adımının seçilmesini sağlar. Ancak kullanıcı, yarı otomatik veya manuel seçenekleri kullanarak adım sayısını kontrol ederek daha hassas modelleme yapabilir. Ayrıca, dinamik fazlar için ivme, hız ve yer değiştirme eğrileri oluşturulabilir.

3.2 Zemin Özellikleri ve Zemin Profili

Parsel alanında yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarının sayıları ve ölçüm uzunlukları-derinlikleri; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından hazırlanan, 18 Mart 2018 tarih ve 30364 mükerrer sayılı Resmi Gazetede yayınlanan, 01 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin, 9 Mart 2019 tarih ve 30709 mükerrer sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren ‘Zemin ve Temel Etüdü Uygulama Esasları ve Rapor Formatına Dair Tebliğine’ göre, dikkate alınarak yapılmıştır. İnceleme alanında birimlerin yatay ve düşey değişimlerini belirlemek amacıyla derinlikleri 19,95 m olan toplamda 3 adet sondaj çalışması , 1 adet MASW çalışması yapılmıştır. Sondaj çalışmaları sırasında her 1,50 metrede bir SPT deneyi yapılarak örselenmiş numuneler alınmıştır (Çizelge 3.3).Parsel alanında yapılan arazi deneylerinden Sondaj çalışmaları 26.03.2024 – 26.03.2024 tarihlerinde TSM-750 Model sondaj makinesi ile Alfa Zemin tarafından sorumlu mühendis gözetiminde yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Sondaj Kuyuları Derinlik-koordinat-SPT Deney Sonuçları Bilgisi

Sondaj No.	X(Enlem)	Y(Enlem)	Kot(m)	Derinlik(m)	YASS(m)
SK – 1	36.822907	28.793890	23.00	19.95	0.00
SK – 2	36.822813	28.793873	23.00	19.95	0.00
SK – 3	36.822819	28.793722	23.00	19.95	0.00

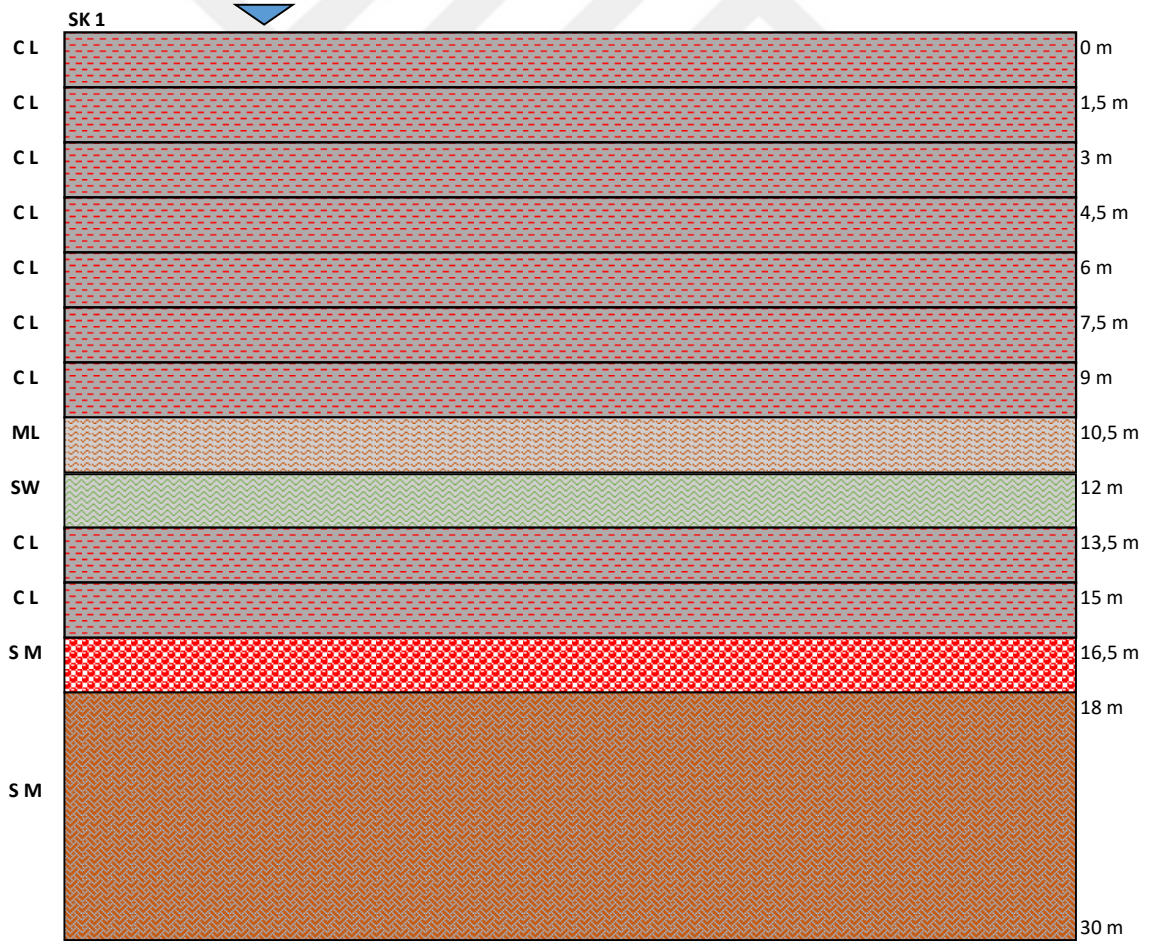


Şekil 3.14. Zemin katmanlarının a.)SPT-N ve b.)Vs değerleri

3.2.1. İdealize zemin profilleri (Arazi zemin modeli)

İnşaat sahasında yapılan tüm zemin araştırmalarının sonuçlarından yararlanılarak belirlenen zemin/kaya birimlerinin tanımlamaları, tabaka kalınlıkları, indeks ve mühendislik özellikleri ve idealize zemin profili verilmiştir (Şekil 3.14).

Sondaj Kuyu-1'den alınan veriler şu şekildedir; 0.00 – 0.50 m arası nebati zemin, 0.50 – 12.00 m arası Gri - Kahve renkli, Plastisitesi Düşük İnorganik Kil (CL), 12.00 – 13.50 m arası Gri - Kahve renkli, Plastisitesi Düşük İnorganik Silt (ML) , 13.50 – 15.00 m arası Gri - Kahve renkli, İyi Derecelenmiş Kum (SW), 15.00 – 18.00 m arası Gri - Kahve renkli, Plastisitesi Düşük İnorganik Kil (CL), 18.00 – 19.95 m arası Gri - Kahve renkli, Siltli Kum (SM) birimi gözlenmektedir.



Şekil 3.15. İdealize zemin profili

Bu çalışmada aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

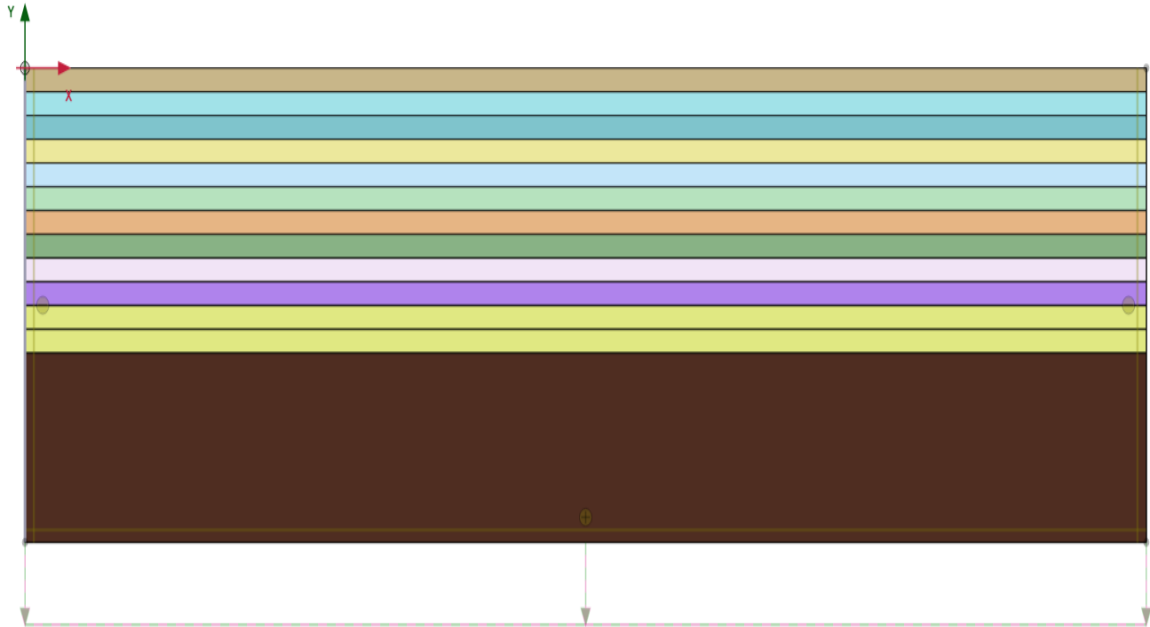
1. Yeraltı su seviyesi zemin seviyesinde kabul edilmiştir.
2. SPT testi 19.5 metre derinliğe kadar yapılmış olmasına rağmen, zemin profili derinliği 30 metre olarak kabul edilmiştir. 19.5 metreden 30 metreye kadar olan bölümde zemin özelliklerinin aynı olduğu varsayılmıştır.

3.3 PLAXIS'te Zemin Profiline Modelleme

Model, laboratuvar ve saha testlerinden elde edilen zemin özellikleri kullanılarak PLAXIS'te oluşturulmuştur. Adım adım modelleme yöntemi aşağıda açıklanmıştır:

3.3.1 Zemin modeli

Bu çalışma için PLAXIS 2D'de oluşturulan model Şekil 15'te gösterilmektedir. Modelde toplam 13 zemin tabakası bulunmaktadır. Modelin derinliği 30 metre, genişliği ise 100 metredir. Zemin profilindeki ilk 12 tabaka her biri 1.5 metre olup, son tabaka 12 metre derinliğindedir. Yeraltı su seviyesi zemin seviyesinde, yani 0.00 m'dedir.



Şekil 3.16. İdealize zemin profili (PLAXIS 2D)

3.3.2 Zemin modeli parametreleri

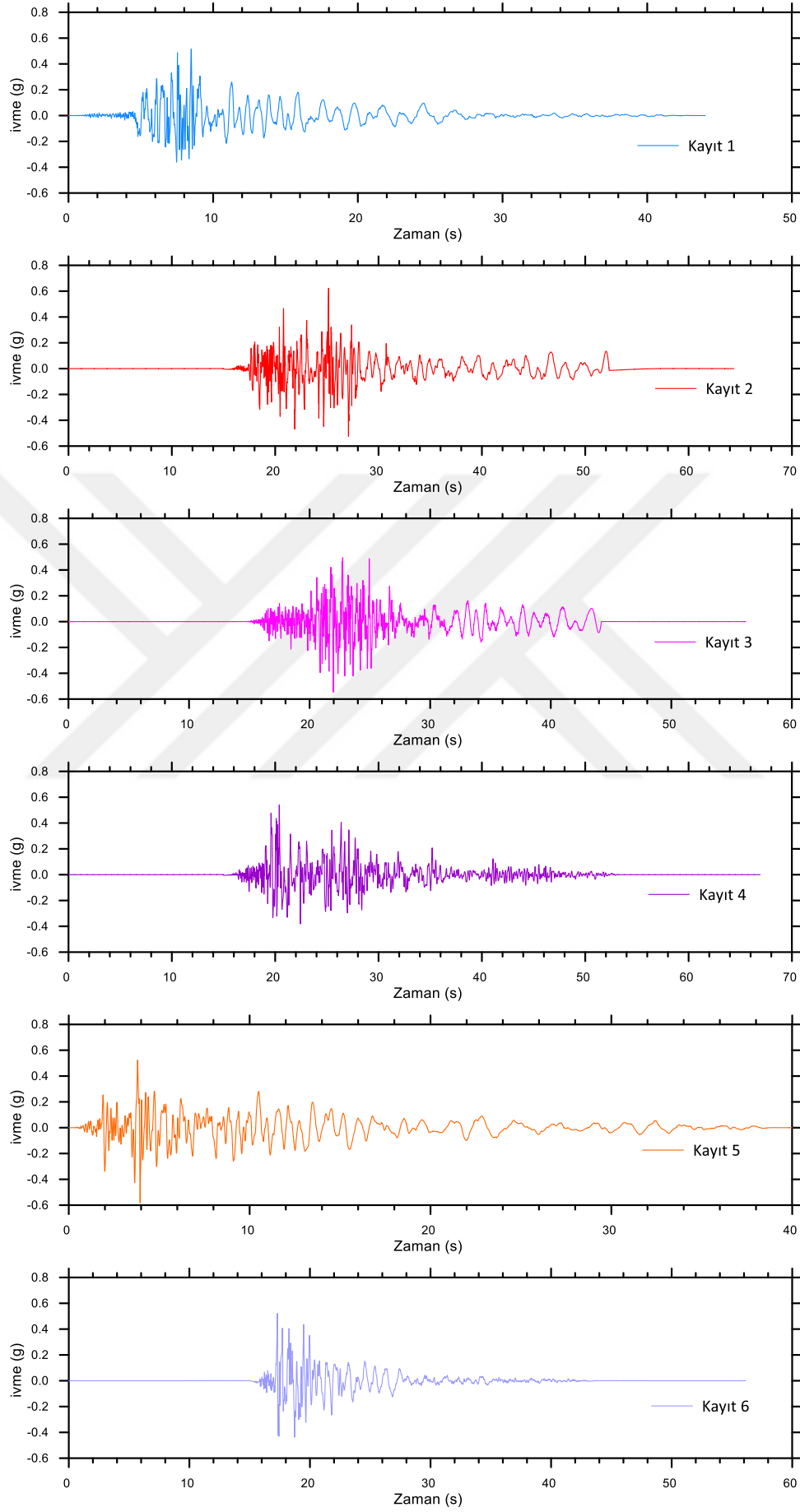
Analiz için iki farklı zemin modeli kullanılmıştır: UBC3D-PLM modeli ve Hardening Soil modeli. Zemin özellikleri ve parametreler, Bölüm 4.1'de sunulan denklemler kullanılarak hesaplanmış olup, aşağıdaki Çizelge 3.5'te verilmiştir.

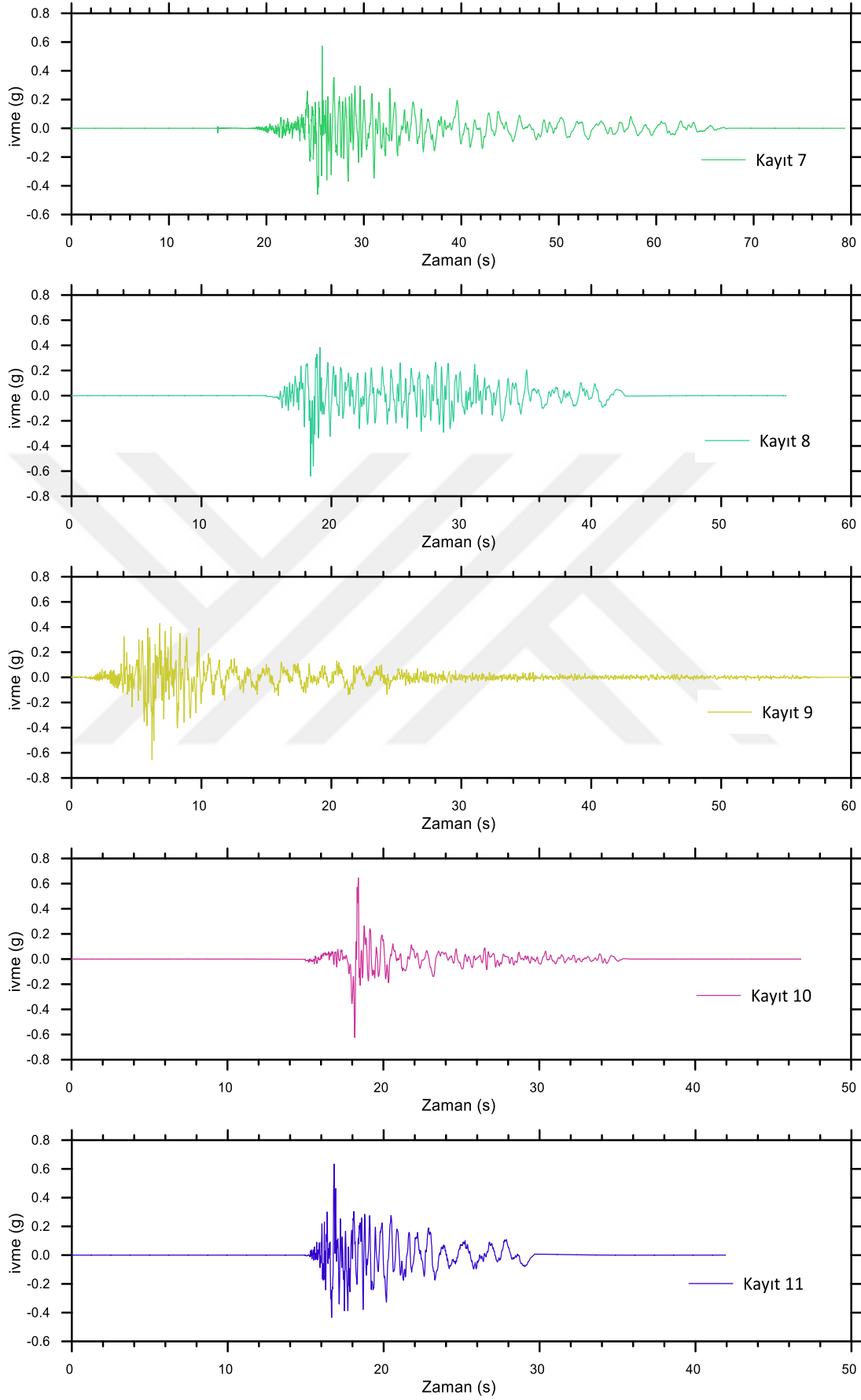
Çizelge 3.4. UBC3D-PLM ve Hardening Soil modeli'nin zemin parametreleri

Tabaka	Mod.	$(N_1)_{60}$	E_{50} (kN/m ²)	E_{oed} (kN/m ²)	E_{ur} (kN/m ²)	C (kN/m ²)	Φ (°)	ν	Ψ (°)	m
1	HS	9	3000	3000	9000	10	20	0.2	0	1
2	HS	14	6667	6667	20001	12	20	0.2	0	1
3	HS	3	5000	5000	15000	13	20	0.2	0	1
4	HS	15	7000	7000	21000	15	20	0.2	0	1
5	HS	15	7000	7000	21000	15	20	0.2	0	1
6	HS	8	4667	4667	14001	11	20	0.2	0	1
7	HS	12	6000	6000	18000	13	20	0.2	0	1
8	HS	17	7667	7667	23001	18	20	0.2	0	1
9	HS	52	19333	19333	57999	1	20	0.2	0	1
10	HS	11	5667	5667	17001	12	20	0.2	0	1
11	HS	20	8667	8667	26001	20	20	0.2	0	1
12	UBC	15	868(K ^e g)	608 K ^e b	267K ^p g	1	30	0.2	0	0.5
13	HS	60	22000	22000	66000	25	36	0.2	0	1

3.3.3 Deprem verileri

Modelde, gerçek kayıtlardan alınan toplam on bir set sismik ivme verisi atanmıştır (Şekil 3.16). PLAXIS'te bu ivme verileri "Dinamik Çarpan" (Dynamic Multiplier) olarak tanımlanmakta olup, ivme kayıtları 'accelerograms' olarak da bilinmektedir. Dinamik ivmeler, çizgi yer değiştirmesinin dinamik kısmına atanmıştır. Deprem hareketini simüle etmek amacıyla, modelin tabanında çizgi yer değiştirmesi tanımlanmıştır. Şekil 13.8'de gösterildiği gibi, a_x serbest(Prescribed) bırakılmış, a_y ise sabitlenmiştir.



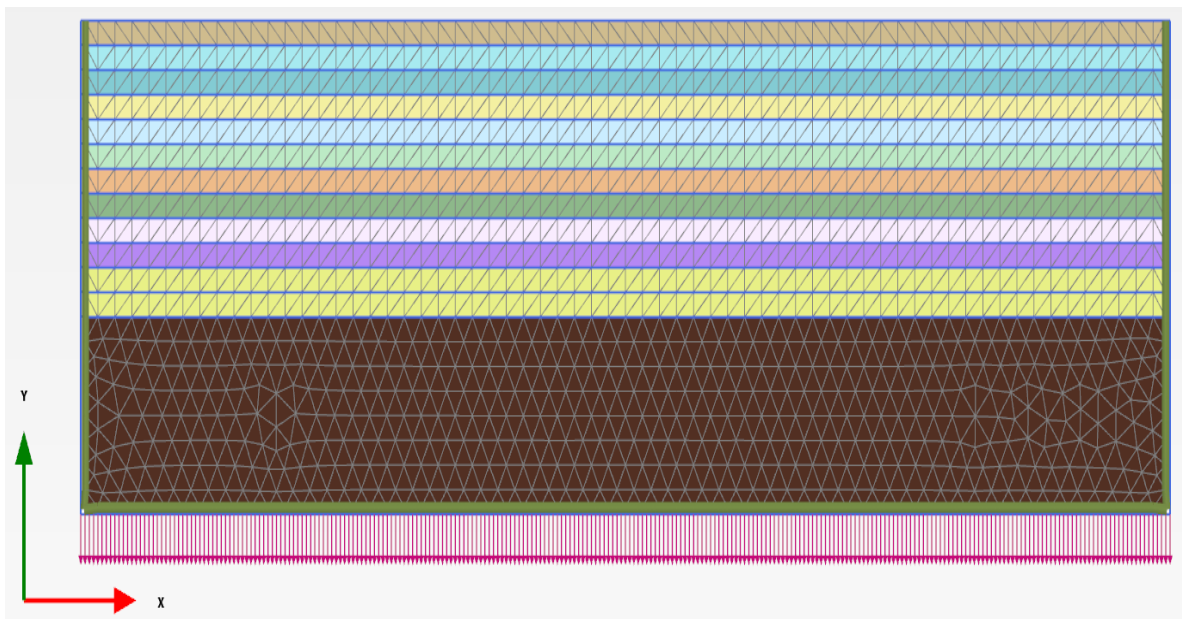


Şekil 3.17. Analizde kullanılan deprem kayıtları

Çizelge 3.5. Analizde kullanılan deprem kayıtlarının özellikleri

Kullanılan Deprem Özellikleri	En Büyük İvme- PHA (g)	En Büyük Hız- PHV (cm/s)	En Büyük Deplasman- PD (cm)	Arias Büyükluğu (m/s)	Baskın Periyot (s)	Süre (s)
Kayıt 1	0.515	44	13.3	3.49	0.01	44.01
Kayıt 2	0.621	43	30.9	5	0.005	64.35
Kayıt 3	0.546	37	10	4.46	0.005	56.16
Kayıt 4	0.54	75	28.5	4.32	0.0024	66.9
Kayıt 5	0.58	46.5	14.5	3.73	0.005	39.99
Kayıt 6	0.522	58	20.5	2.92	0.0024	56.13
Kayıt 7	0.571	59	39	4.8	0.01	79.36
Kayıt 8	0.64	71.1	21.6	5.15	0.005	54.98
Kayıt 9	0.655	56.5	18.9	3.7	0.02	59.98
Kayıt 10	0.646	75.1	21	1.99	0.005	46.78
Kayıt 11	0.633	44.5	21	3.12	0.005	41.92

3.3.4 Mesh üretimi

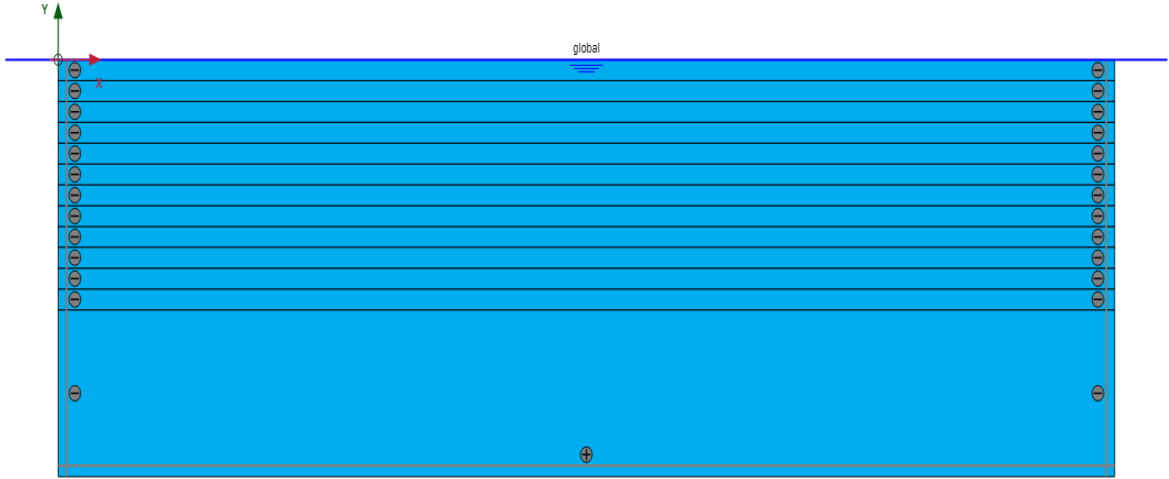


Şekil 3.18. PLAXIS 2d'de zemin profili modelinin ağ (Mesh) oluşturması

PLAXIS 2D, analiz için Sonlu Elemanlar Yöntemini (FEM) kullandığından, modelin ağı (mesh) oluşturulmuştur(Şekil 3.17). Orta seviyede bir ağ (mesh) oluşturulmuştur. Bu seçim, hesaplamayı kolaylaştırmakta, zaman ve depolama tasarrufu sağlamakta ve güvenilir bir doğruluk seviyesi sunmaktadır.

3.3.5 Yeraltı suyu seviyesi

Bu model için yeraltı su seviyesi zemin seviyesinde, yani 0,00 m’de tanımlanmıştır ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19: Zemin profili modelinin yeraltı su seviyesi

3.3.6 Model koşulları

Seçilen bir faz için global sınır koşulları, Model Explorer içindeki Model Conditions alt ağacında tanımlanabilir. Bu bölümde, modelin genel sınır koşulları belirlenerek, analiz sürecinde doğru sınır davranışlarının sağlanması amaçlanır. Dinamik analizlerde özellikle sınır koşulları, dalga yansımalarını önlemek ve gerçeğe uygun simülasyonlar oluşturmak için önemlidir. PLAXIS 2D, kullanıcıların belirli sınır koşullarını varsayılan seçenekler yerine manuel olarak tanımlamasına olanak tanır. Bu, daha karmaşık ve proje özelinde uygun sınır koşullarının uygulanmasına imkân sağlar. Kullanıcı tarafından tanımlanan sınır koşulları, Model Conditions altında belirlenen varsayılan koşullardan önceliklidir. Bu durum, kullanıcıların özel analiz ihtiyaçlarına uygun şekilde model ayarlarını yapmasını sağlar. Böylece analiz sırasında daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

3.3.6.1. Sınır koşulları

Bu çalışma dinamik bir deprem analizi olduğundan, iki yatay sınır serbest alan sınır koşulu (Free field boundary condition) olarak, taban sınırı ise esnek taban sınır koşulu (Compliant base boundary condition) olarak tanımlanmıştır. Bu, dalga yansımalarını önleyecek ve depremin doğru şekilde simüle edilmesini sağlayacaktır (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.6. Model sınır koşulları

Sınır	Sınır Koşulları
X_{min}	Free Field
X_{max}	Free Field
Y_{min}	Compliant Base
Y_{max}	None

3.3.6.2. Akış durumu

Bu çalışma dinamik bir deprem analizi olduğundan İki yatay sınır ile üst sınır açık sınır koşulu (Open boundary condition) olarak, taban sınırı ise kapalı sınır koşulu (Closed boundary condition) olarak tanımlanmıştır. Bu, deprem sırasında su akışının doğru şekilde simüle edilmesini sağlayacaktır (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.7. Model sınır akış koşulları

Sınır	Akış Durumu
X_{min}	Open
X_{max}	Open
Y_{min}	Closed
Y_{max}	Open

3.3.6.3. Deformasyon koşulları

Bu çalışma dinamik bir deprem analizi olduğundan, İki yatay sınır normalde sabit sınır koşulu (Normally fixed boundary condition) olarak, üst sınır serbest sınır koşulu (Free

boundary condition) olarak ve taban sınırı tamamen sabit sınır koşulu (Fully fixed boundary condition) olarak tanımlanmıştır. Bu, deformasyonun doğru şekilde simüle edilmesine yardımcı olacaktır (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8. Model sınır deformasyon koşulları

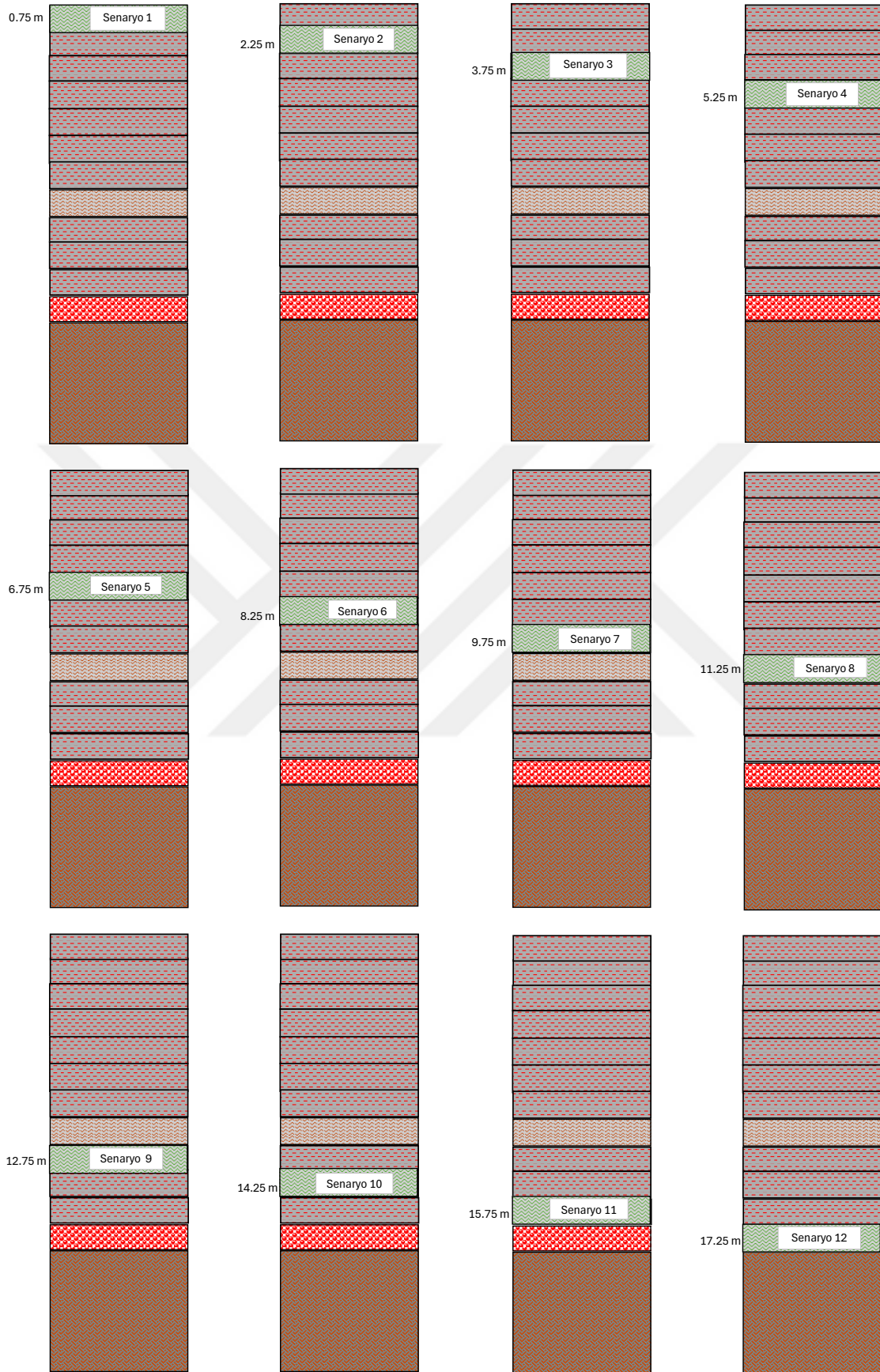
Sınır	Deformasyon Koşulları
X_{min}	Normally Fixed
X_{max}	Normally Fixed
Y_{min}	Fully Fixed
Y_{max}	Free

3.4 Model Analizi

Bu çalışmanın amacı, zeminin üst tabakasındaki sıvılaşma kaynaklı yer değiştirmeyi belirlemektir. Modelde ayrıca hız, ivme, spektral ivme, aşırı boşluk suyu basıncı ve amplifikasyon ile birlikte oturma belirlemek için çeşitli noktalar seçilmiştir. Üç nokta üst tabakada, bir nokta sıvılaşabilir tabakanın merkezinde ve bir nokta modelin en alt kısmında seçilmiştir.

3.4.1 Analiz senaryoları

Zemin modelinde tek bir tabaka sıvılaşabilir tabakadır ve derecelenmiş kumdan oluşmaktadır. Bu çalışma, sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi ile sıvılaşabilir tabakanın derinliği arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçladığından, toplamda 12 farklı senaryo analiz edilmiş olup, örneğin Senaryo 1'de sıvılaşabilir tabaka ilk katmanda, Senaryo 2'de ikinci katmanda yer alacak şekilde her bir durumda derinlik 1,5 metre artırılmıştır (Şekil 3.22). Ayrıca, kapsamlı sonuçlar için her durum farklı frekans, maksimum yer ivmesi (PGA), periyot ve süreye sahip 11 sismik yükleme altında analiz edilmiştir. Bu şekilde, her senaryoda 11 alt senaryo bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma için toplamda 132 analiz yapılmıştır. Her bir analiz hesaplama için ortalama 3,5 saat sürmüştür, bu da tüm analizler için 462 saat anlamına gelmektedir.



Şekil 3.20. Analiz senaryoları (Senaryo 1 – Senaryo 12)

3.4.2 Analiz aşamaları

Bu analizde, sıvılaştırılabilir tabakanın belirlenen konumu için her bir deprem verisi seti iki temel aşamadan oluşmaktadır: Başlangıç Aşaması (Initial Phase) ve Deprem Aşaması (Earthquake Phase).

3.4.2.1. Başlangıç aşaması (Initial phase)

Bu aşama, program tarafından varsayılan olarak tanımlanan bir aşamadır. Modelin herhangi bir yük veya gerilme olmadan başlangıç koşullarını temsil eder. Bu aşama için 'K0 prosedürü' hesaplama türü olarak alınmıştır. Bu aşamada hem statik yükleme hem de dinamik yer değiştirme devre dışı bırakılmıştır. Bu aşama, diğer tüm aşamalar için başlangıç aşaması olarak işlev görür.

3.4.2.2. Deprem aşaması (Earthquake phase)

Başlangıç aşamasını takiben, bu çalışmadaki ana simülasyon aşaması Deprem aşaması olarak adlandırılır. Bu aşamada model, sismik yüklemeye maruz bırakılır. PLAXIS'te dinamik analiz olarak yapılandırılan bu aşamada, döngüsel yüklemeyi simüle etmek için "Belirlenmiş Çizgi Yer Değiştirmesi" (Prescribed Line Displacement) seçeneği kullanılır. Sismik olay süresince aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu sağlamak için drenaj koşulu "Drenajsız A" (Undrained A) olarak ayarlanır.

Zamana bağlı bir aşama olarak, dinamik süre deprem yüklemesinin süresiyle eşleşecek şekilde tanımlanır. Hesaplamaları birkaç saniyede tamamlanan Başlangıç fazının aksine, Deprem Fazı yükleme periyoduna bağlı olarak 2 ila 3 saatlik hesaplama süresi gerektirebilir. Bu faz sırasında modelin ivme, hız, yer değiştirme, deformasyon ve aşırı boşluk suyu basıncı gibi dinamik tepkileri izlenebilir. Bu amaçla üç özel izleme noktası seçilmiştir: Yüzey yer değiştirmesi ve zemin tepkisini kaydetmek için ilk zemin katmanının üstünde bir nokta, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu izlemek için sıvılaştırılabilir kum tabakasının merkezinde bir nokta ve ana kaya hareket girişini kaydetmek için alt sınırdaki (ana kayada) bir nokta.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deprem yüklemesi altında zemin davranışının karmaşık özelliklerini, özellikle sıvılaşma fenomenini incelemek için ileri düzey sonlu eleman tabanlı simülasyon aracı PLAXIS 2D kullanılarak toplam on iki farklı senaryo dikkatlice analiz edilmiştir. Bu sayısal çalışmanın temel amacı, deprem olayları sırasında sıvılaşabilir tabakanın derinliğinin zemin tepkisiyle ilişkili çeşitli kritik parametreler üzerindeki etkisini araştırmaktır. Her senaryo, 30 metrelik tabakalı bir zemin profili içinde sıvılaşabilir kum tabakasının dikey konumunun sistematik olarak değiştirilmesiyle özgün şekilde tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, sıvılaşabilir tabakanın konumunun sismik dalga yayılımı, aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi ve zemin deformasyonları üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde incelemeyi mümkün kılmıştır.

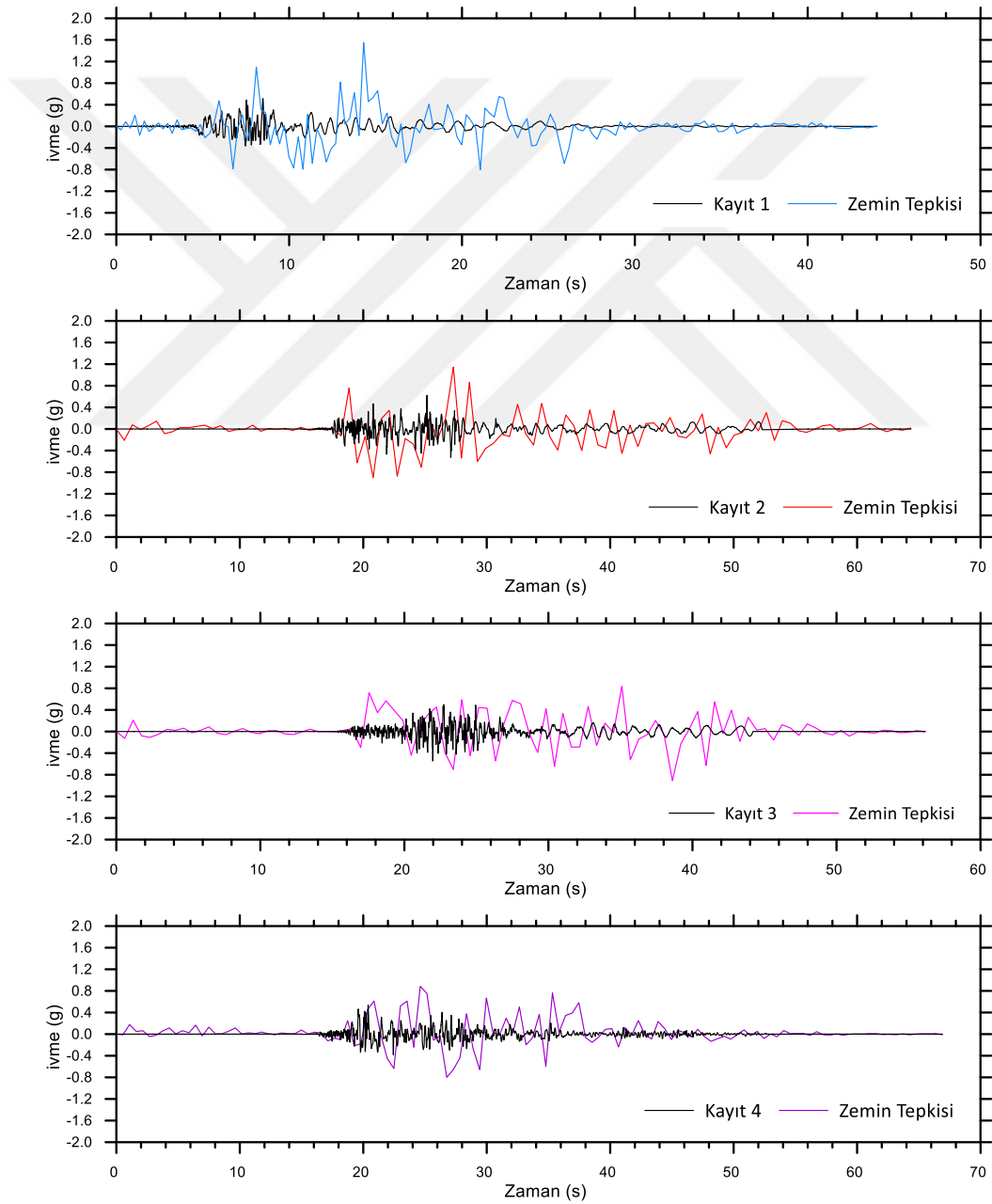
Simülasyonlarda, sıvılaşma bölgesini temsil eden tek bir kum tabakasına sahip homojen killi bir zemin profili dikkate alınmıştır. Bu kum tabakasının konumu, sabit kalınlık korunarak farklı senaryolarda yüzeye yakın derinliklerden daha derin seviyelere kadar değiştirilmiştir. Deprem yüklemesi, modelin tabanına on bir farklı zemin hareketi kaydı kullanılarak uygulanmıştır. Bu veri seti, geniş bir büyüklük, süre ve frekans içeriği yelpazesini kapsayarak, zemin davranışının çeşitli sismik koşullar altında gerçekçi bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır. Çalışma, PLAXIS 2D sonuçlarından çıkarılan aşağıdaki dört temel parametre üzerine odaklanmıştır:

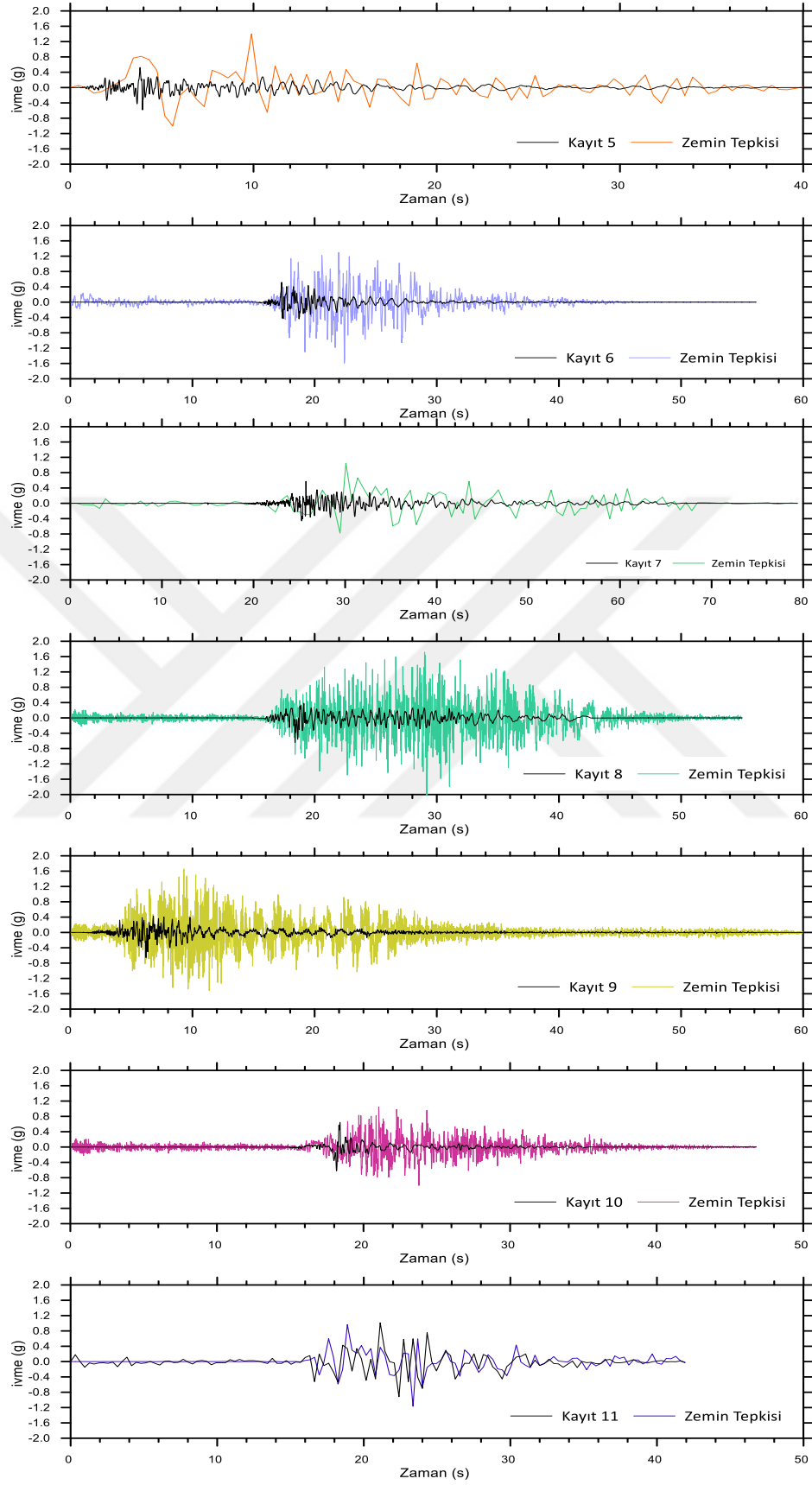
1. Ana kaya hareketi ve zemin tepkisi
2. Spektral ivme-periyot diyagramı
3. Sıvılaşma ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu
4. Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesi

Bu çok boyutlu analiz, deprem sırasında sıvılaşabilir tabaka derinliğinin zemin davranışı üzerindeki etkilerini anlamak için sağlam bir çerçeve sağlamaktadır. Bulgular, jeoteknik deprem mühendisliğine önemli katkılar sunarak, sismik saha değerlendirmesi, temel tasarımı ve zemin iyileştirme stratejileri için pratik sonuçlar içermektedir. Sayısal modelleme ile gerçekçi sismik girdilerin birleştirilmesi, bu çalışmanın depreme eğilimli bölgelerde sıvılaşma ile ilişkili riskleri tahmin etme ve azaltma yeteneğimizi geliştirmektedir.

4.1. Ana Kaya Hareketi ve Zemin Tepkisi

Analizin ilk adımı, sismik dalgaların zemin profili boyunca yukarı doğru ilerlerken nasıl dönüştüğünü değerlendirmektir. Ana kaya hareketi ile zemin yüzeyi tepkisinin karşılaştırılması, özellikle sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği ve sertliğinden etkilenen saha büyütmesi ve dalga bozulması hakkında içgörüler sağlamıştır. Şekil 4.1, ana kaya hareketlerini ve Senaryo 4 için zemin tepkisini göstermektedir. Diğer durumların sonuçları EKLER bölümünde sunulmuştur.





Şekil 4.1. Senaryo 4 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği

Tüm senaryolarda, yüzeye yakın konumlanan düşük yoğunluklu ve düşük sertlikteki zemin katmanlarının varlığı nedeniyle saha büyütmesi gözlemlenmiştir. Bu büyütme etkisi, yüzey katmanları ile altındaki daha sert katmanlar arasındaki empedans farkı enerjinin hapsolmesine ve yüzeyde zemin hareketi şiddetinin artmasına yol açtığı için, özellikle yumuşak zeminlerde daha belirgindir. Sonuç olarak, zemin yüzeyi tepkisinde (ana kayada kaydedilen harekete kıyasla) sağa kayma veya gecikme görülmesi yaygındır. Bu faz kayması, genellikle sismik dalgaların tabakalı zemin profili içinde yukarı doğru ilerlemesi için gereken süreyi yansıtır. Bu değişim, sismik dalgaların yüzeye ulaşmadan önce, her biri farklı kesme dalgası hızları ve dinamik özelliklere sahip birden fazla zemin katmanından geçmesi gerektiğinden kaynaklanır. Dalgalar bir katmandan diğerine geçerken, hızları malzemenin sertliği ve yoğunluğundan etkilenir. Düşük sertlik, daha yavaş dalga iletimine neden olarak kümülatif bir gecikmeye yol açar. Ayrıca, katmanlar arası geçişler yansımalar ve kırılmalar neden olarak dalga formlarında ek bozulma ve dağılım yaratır.

Zemin profilinde sıvılaşabilir bir tabakanın bulunması, bu gecikme ve bozulmayı daha da şiddetlendirir. Şiddetli sismik sarsıntıya maruz kaldığında, doygun kumlu tabakadaki boşluk suyu basıncı hızla yükselerek etkin gerilmeyi azaltır ve tabakanın geçici olarak mukavemetini ve sertliğini kaybetmesine neden olur. Sıvılaşma başladığında, etkilenen zemin akışkan bir sıvı gibi davranır, bu da kesme dalgası hızında belirgin bir düşüş ve dalga yayılım özelliklerinde önemli bir değişimle sonuçlanır. Bu tabakadan geçen sismik enerji yalnızca gecikmez, aynı zamanda artan sönümleme ve enerji dağılımı nedeniyle önemli ölçüde zayıflar.

Sıvılaşabilir tabakanın derinliği arttıkça, dalga yayılımı üzerindeki etki daha belirgin hale gelir. Bunun nedeni, sismik dalgaların yukarı doğru hareketi sırasında düşük sertlik bölgesi ile daha erken karşılaşması ve yüzeye ulaşmak için daha uzun bir seyahat süresine ihtiyaç duymasıdır. Sıvılaşabilir tabaka ne kadar derinde olursa, dalga değişimi o kadar uzun sürer ve bu da genişletilmiş, gecikmiş ve genellikle zayıflamış bir yüzey hareketi zaman geçmesine yol açar. Özünde, deprem sırasında sertliğini kaybeden ve sıvılaşan bir tabaka, dalga hızının azalması, sönümlemenin artması ve karmaşık dalga-zemin etkileşimlerinin birleşik etkileri nedeniyle sismik dalgaları yavaşlatan, yayan ve şeklini değiştiren bir tampon bölge görevi görür.

4.2. Spektral İvme-Periyot Diyagramı

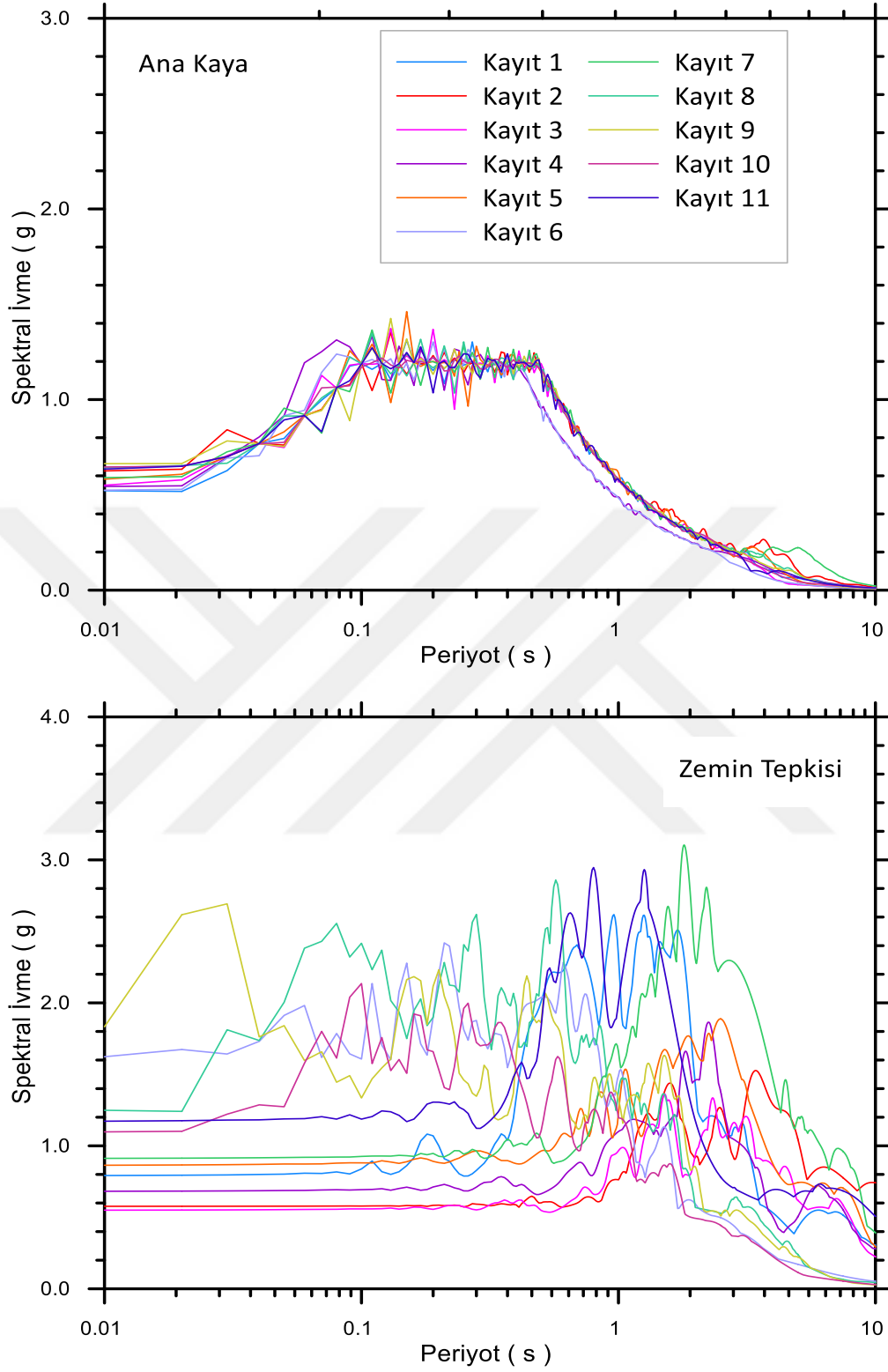
Her bir hareket için, sismik enerjinin dinamik özelliklerinin zaman içinde zemin yüzeyinde nasıl evrildiğini değerlendirmek amacıyla PSA–zaman ilişkileri çizilmiştir(Şekil 4.2 - Şekil 4.13). Bu grafikler, sıvılaşabilir tabakanın derinliğinin yüzey ivmelerinin genliği ve süresi üzerindeki etkisini ortaya çıkarmış.

Ana kaya hareketi ile zemin tepkisi PSA-zaman grafikleri arasında belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Senaryo 3'te ana kaya seviyesindeki sismik hareketler 1.2 g civarında zirve yapıp 0,6 saniye içinde sıfıra yaklaşırken, yüzey tepkisi 5 g' ye kadar ulaşan PSA değerleri ve 3-4 saniyeyi aşan süre ile çok daha yüksek şiddet sergilemektedir. Bu belirgin büyütme ve uzamış süre, yumuşak ve doygun zemin katmanlarından geçen enerji Emilimi ve yeniden yayılım nedeniyle, sıvılaşabilir tabakanın derinliği arttıkça daha da belirginleşir.

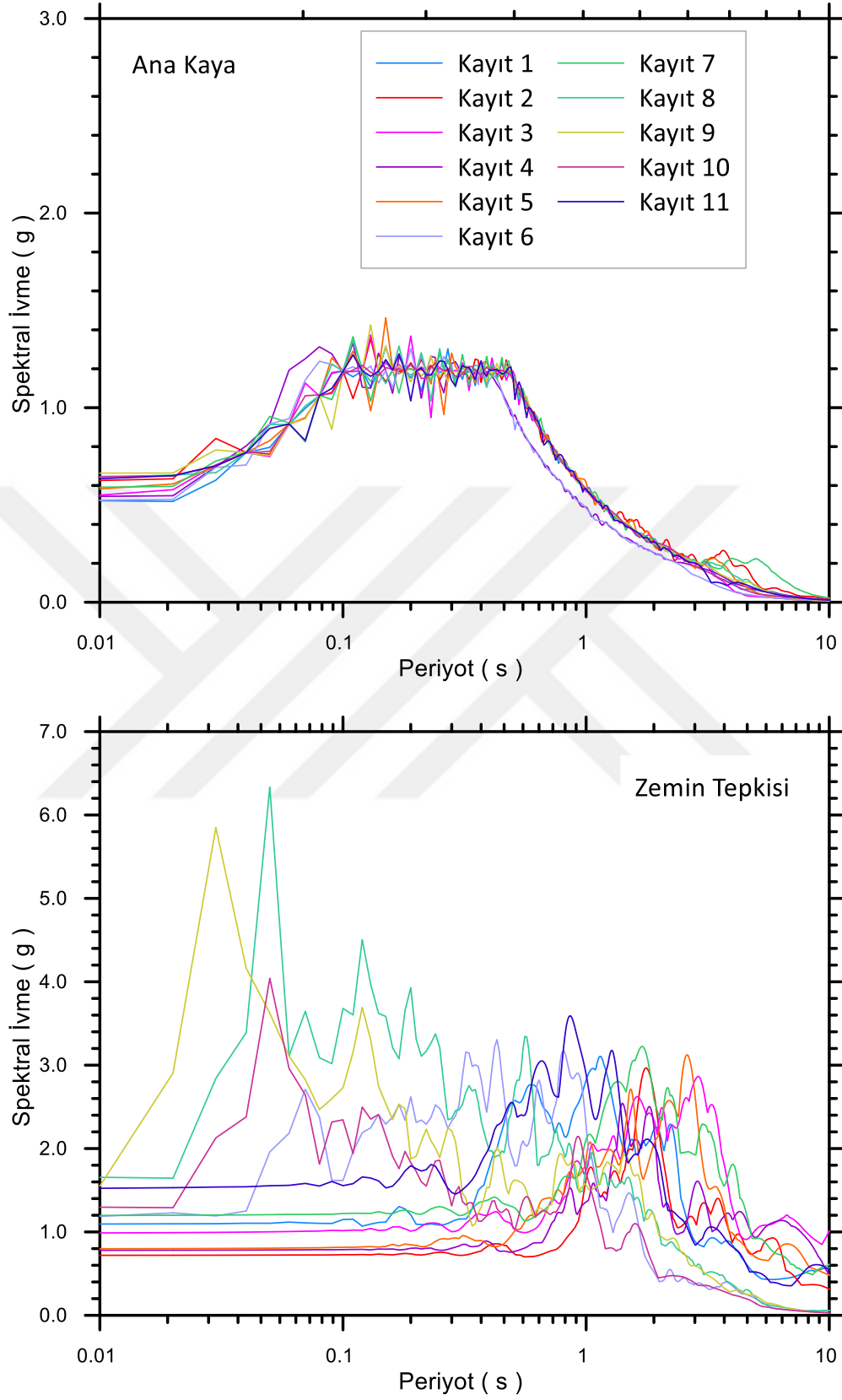
Ana kayada orta şiddette görünen bazı deprem hareketleri (ör. Kayıt 8, 9 ve 10), yüzeyde çok daha yüksek PSA zirveleri göstermektedir. Bu davranış, rezonans fenomenini ve saha özgü büyütmeyi işaret eder. Belirli giriş frekanslarının zemin profilinin doğal frekansıyla örtüşmesi, yüzeydeki sismik tepkiyi şiddetlendirir.

Zemin tepkisi grafiği, ana kaya hareketlerinin sıkı desenine kıyasla çok daha geniş bir PSA eğrileri dağılımı sergiler. Bu sapma, zemin katmanlarının sismik yükleme altındaki doğrusal olmayan ve heterojen tepkisini yansıtır. Zemin sertliğindeki değişimler, boşluk suyu basıncı oluşumu ve sıvılaşma potansiyeli, bu düzensiz büyütme katkıda bulunarak zemin-yapı etkileşiminin sismik tepki analizindeki kritik rolünü vurgular.

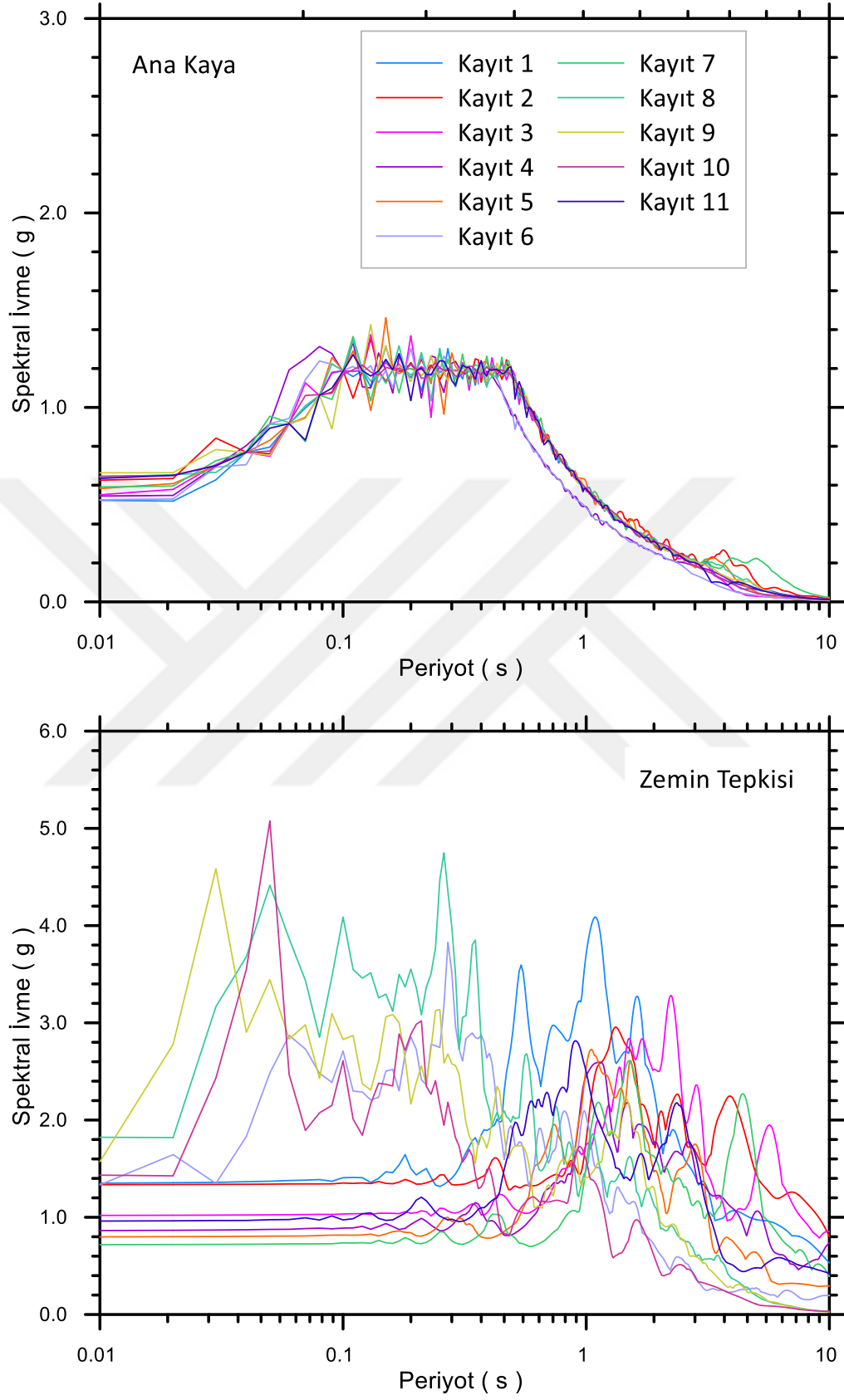
Bu çalışma kapsamında kullanılan tüm deprem kayıtlarına ilişkin ve 12 farklı senaryo için elde edilen zemin yüzeyine ait spektral ivme (PSA) zaman diyagramları aşağıda sunulmuştur(Şekil 4.2 - Şekil 4.13). Bu diyagramlar, deprem dalgalarının zemin profili boyunca yayılırken uğradığı değişimleri ve zemin tepkilerindeki amplifikasyon etkilerini ortaya koymaktadır.



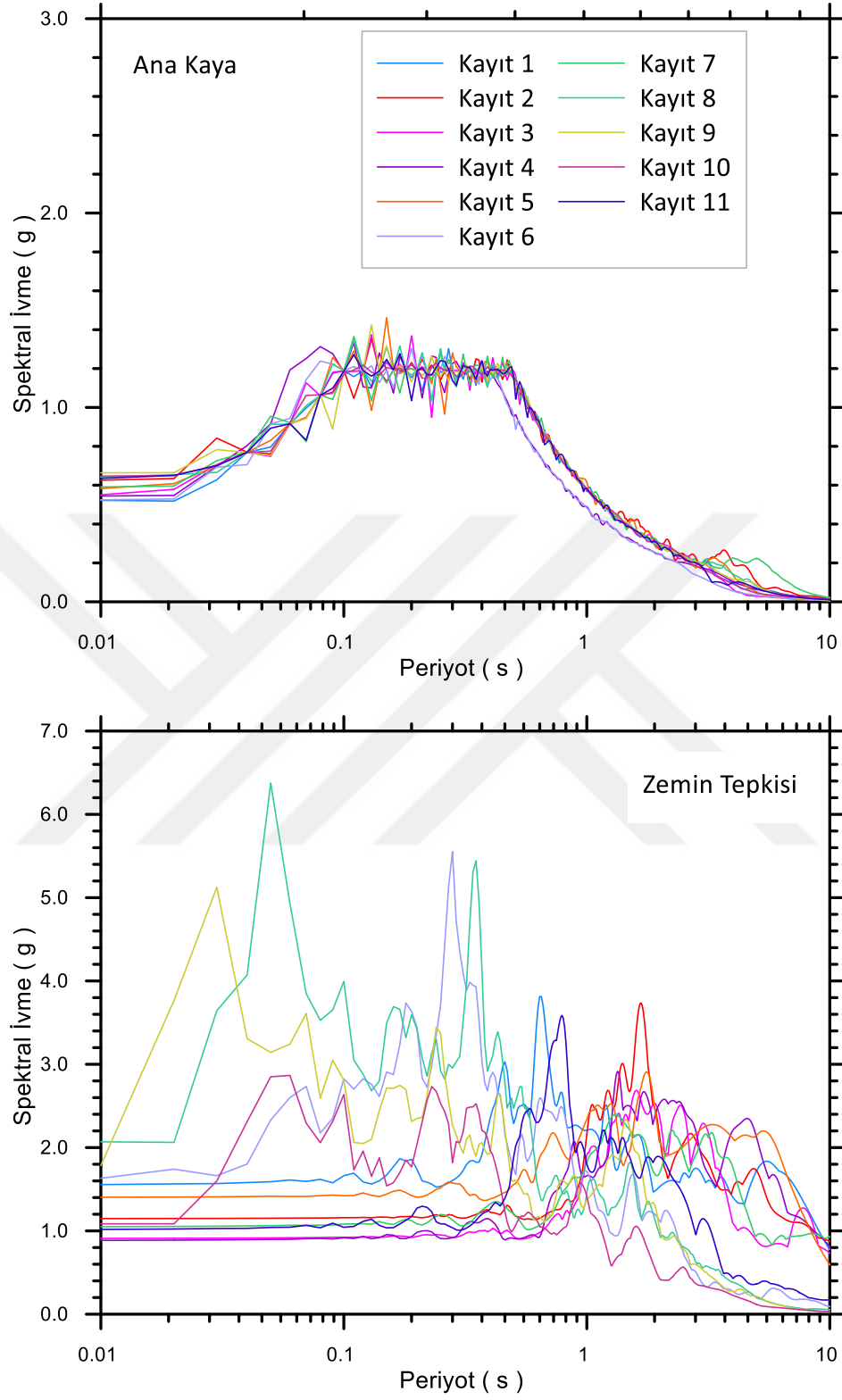
Şekil 4.2. Senaryo 1- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



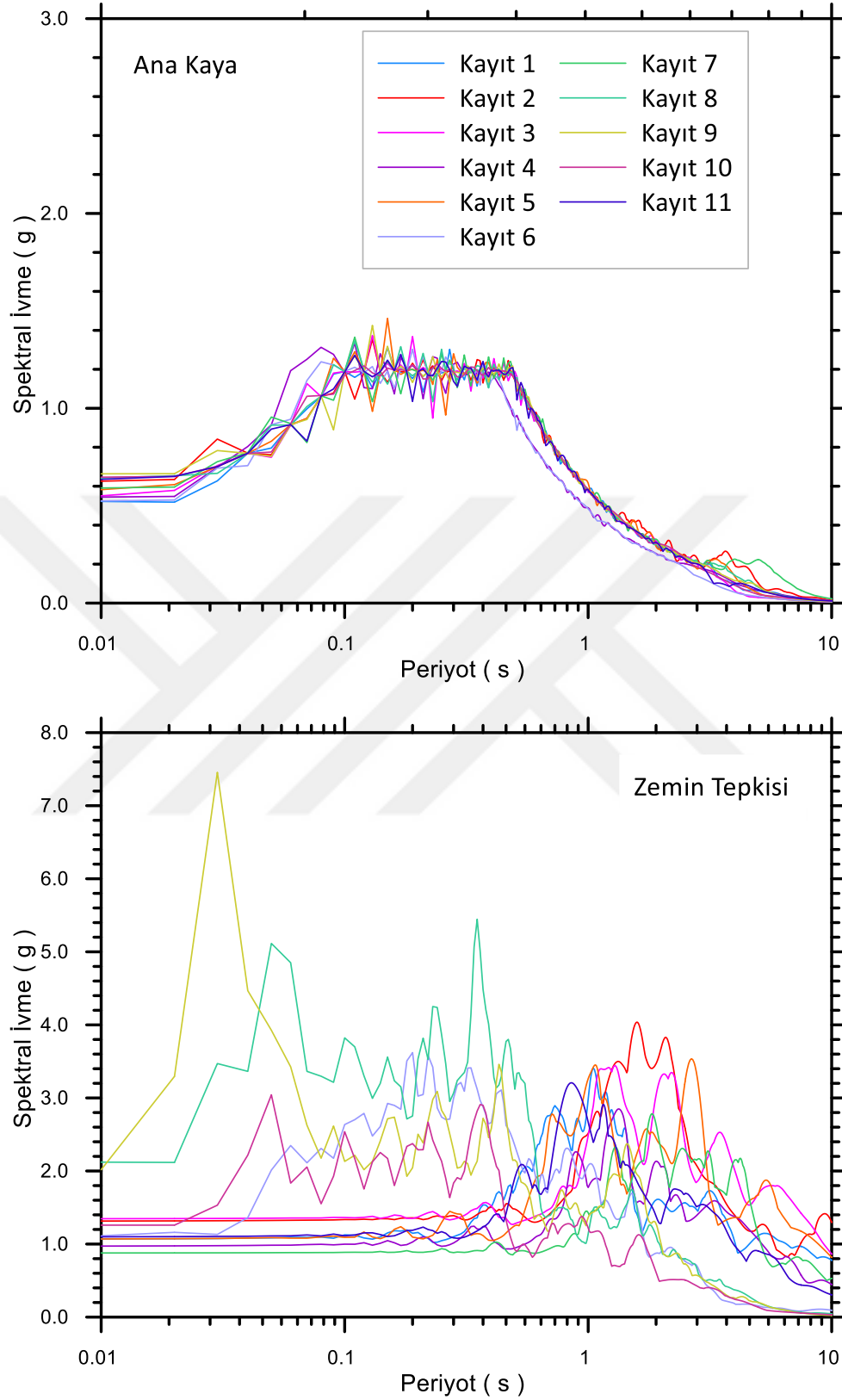
Şekil 4.3. Senaryo 2- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



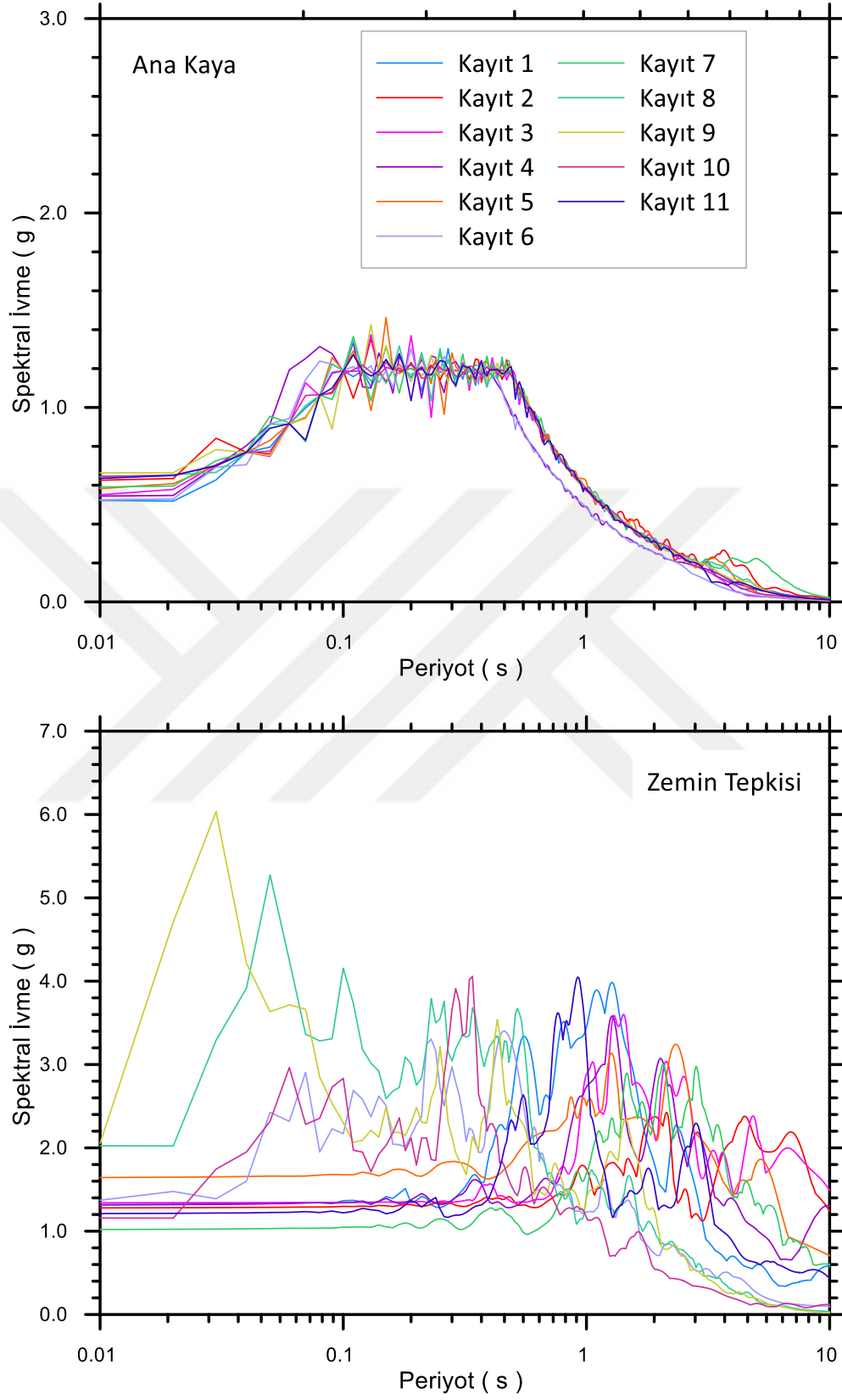
Şekil 4.4. Senaryo 3- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



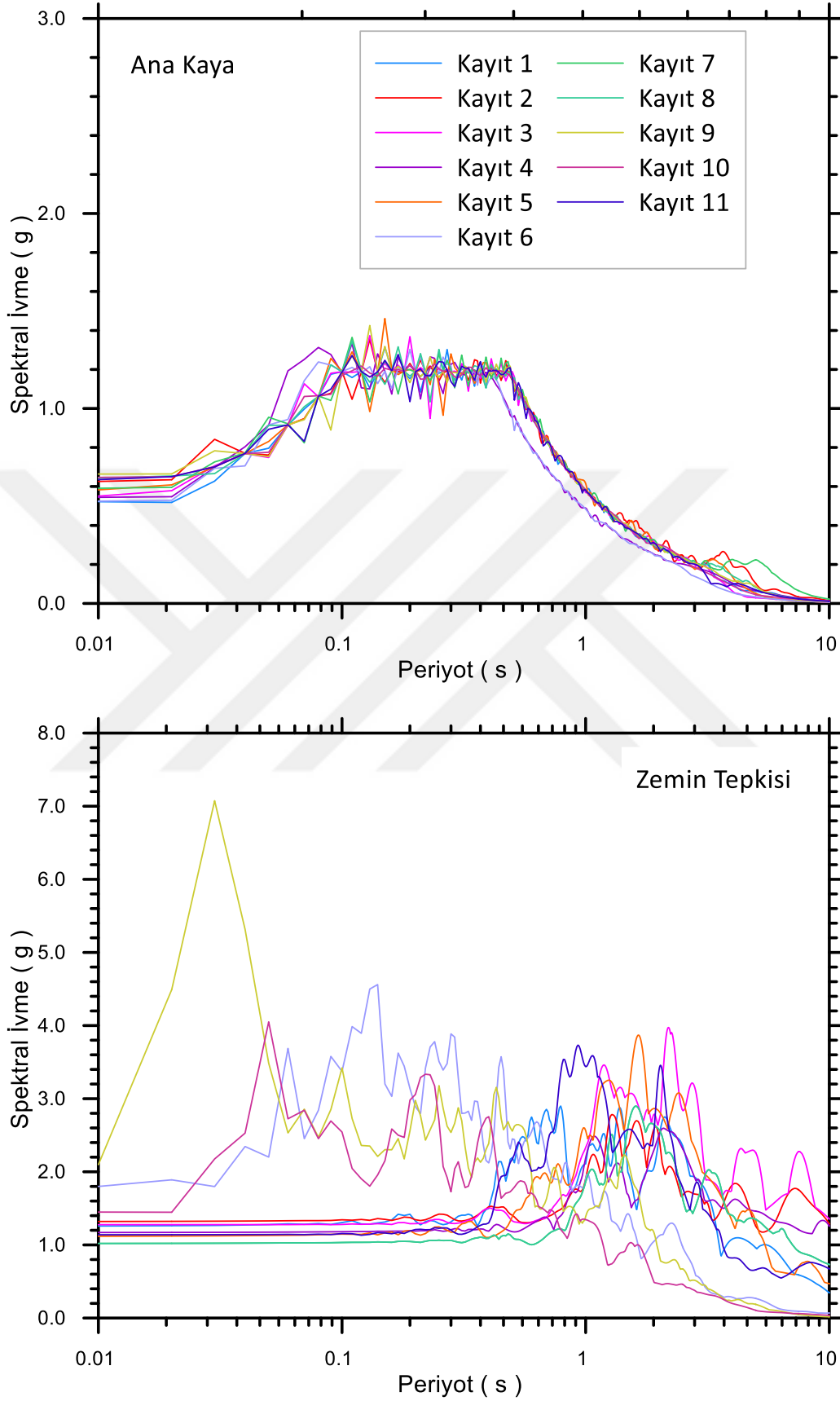
Şekil 4.5. Senaryo 4- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



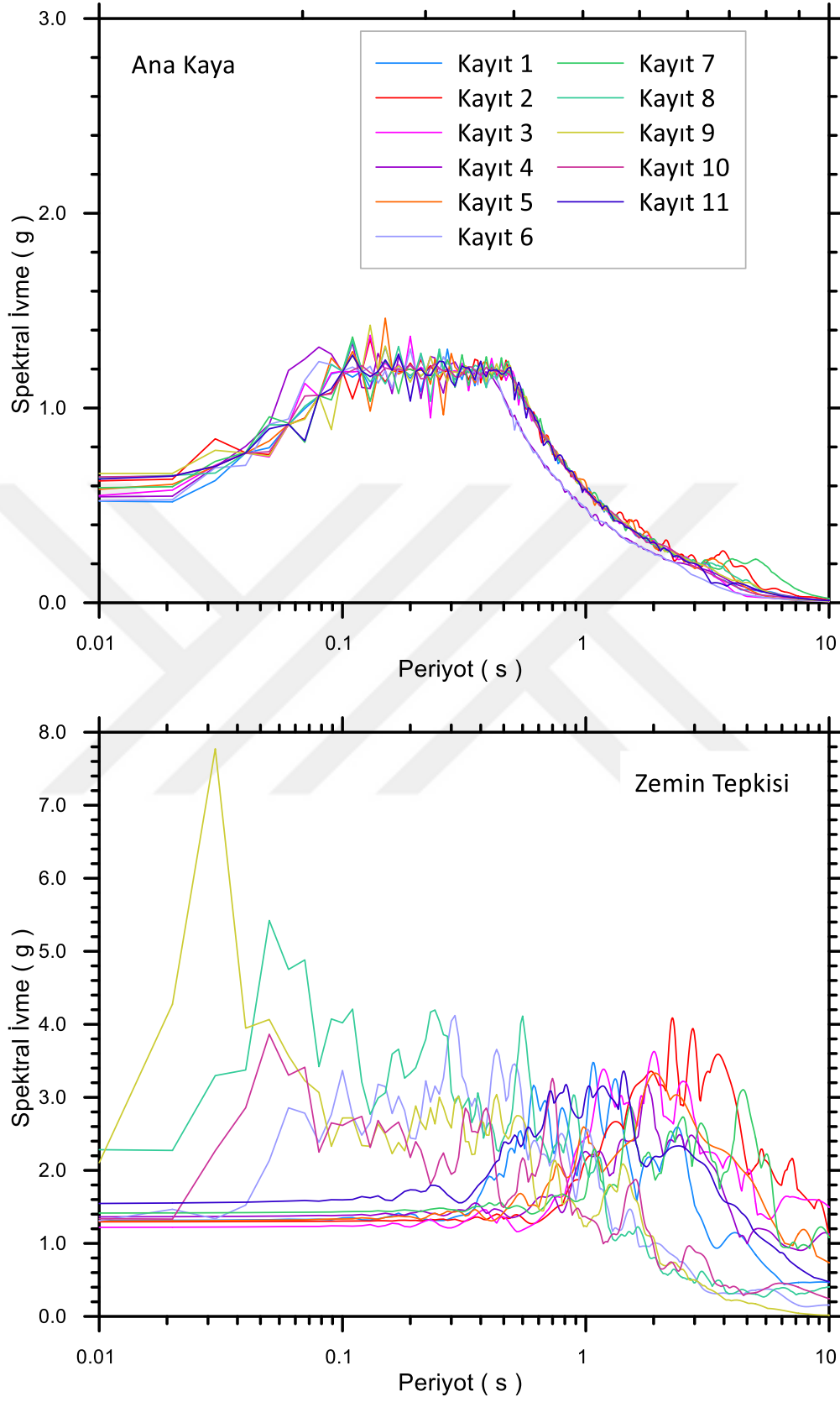
Şekil 4.6. Senaryo 5- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



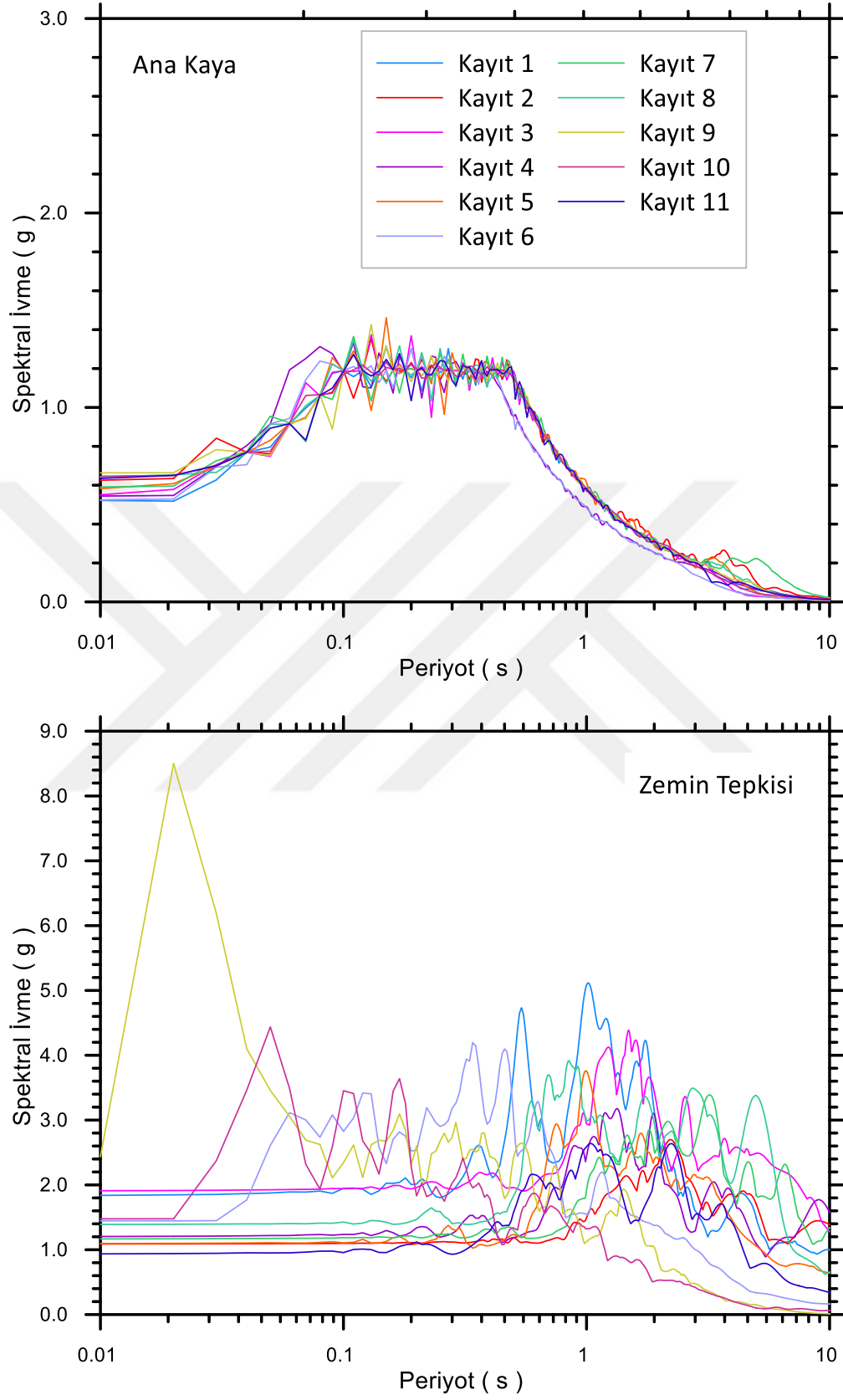
Şekil 4.7. Senaryo 6- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



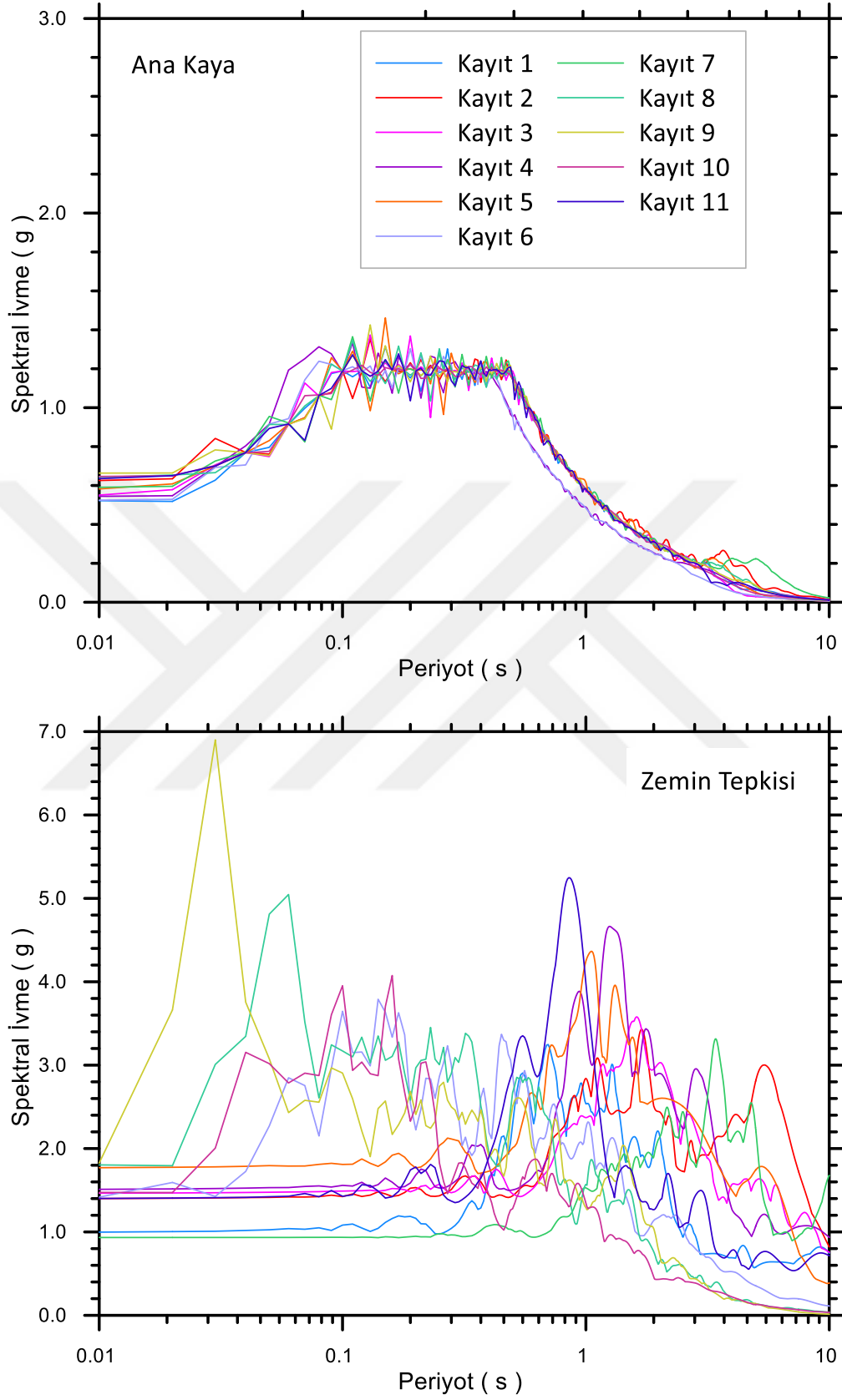
Şekil 4.8. Senaryo 7- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



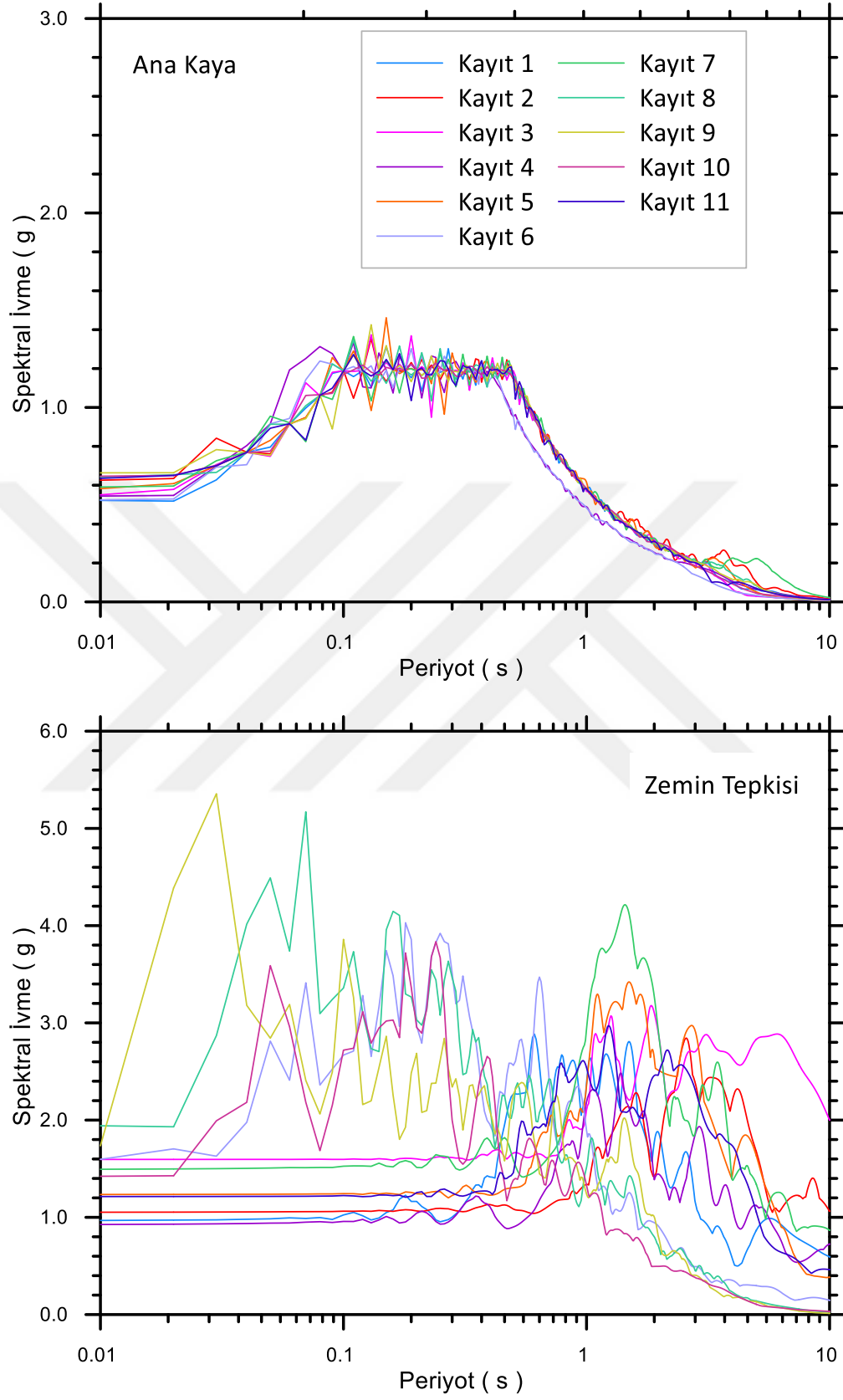
Şekil 4.9. Senaryo 8- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



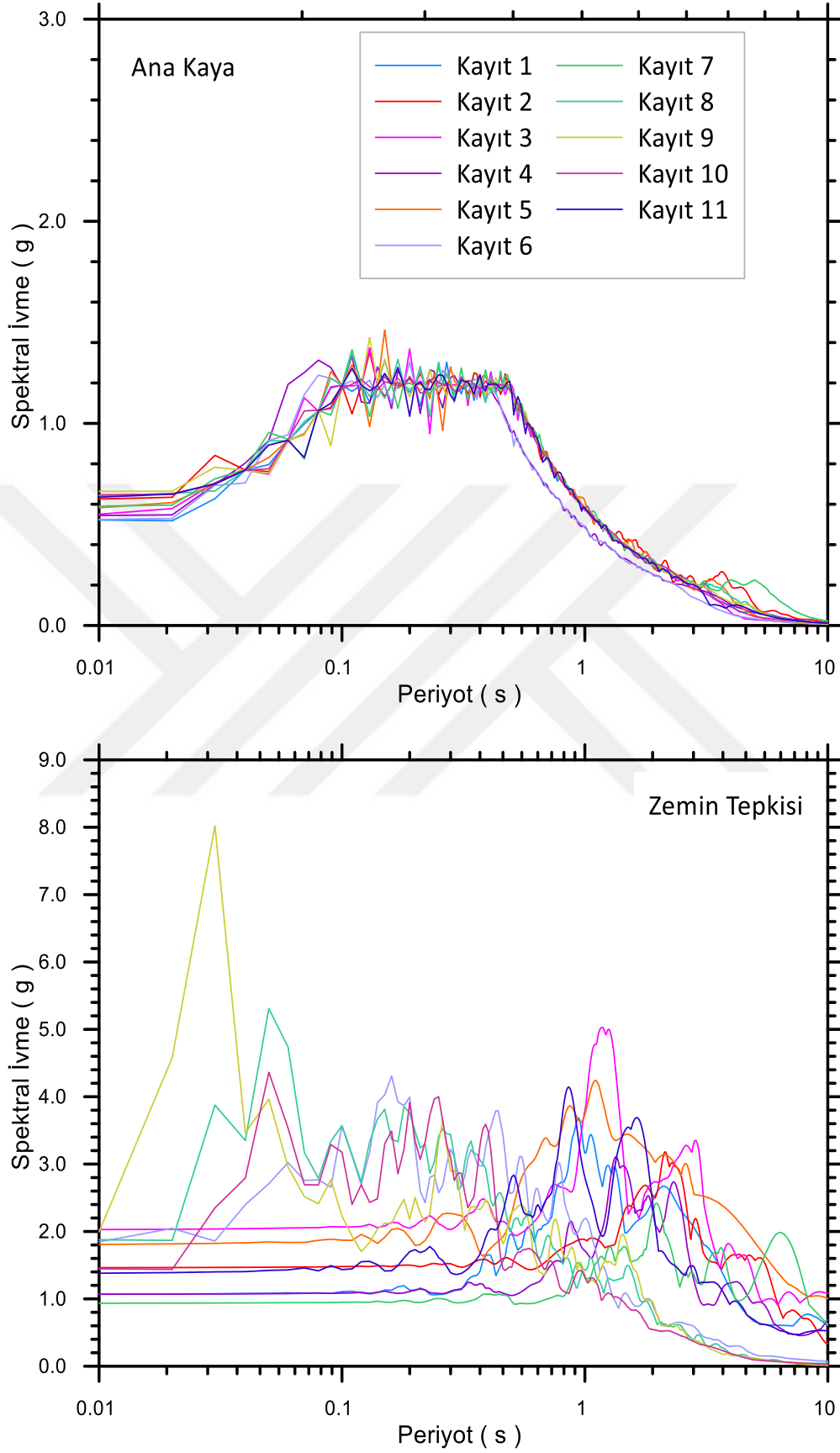
Şekil 4.10. Senaryo 9- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



Şekil 4.11. Senaryo 10- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği

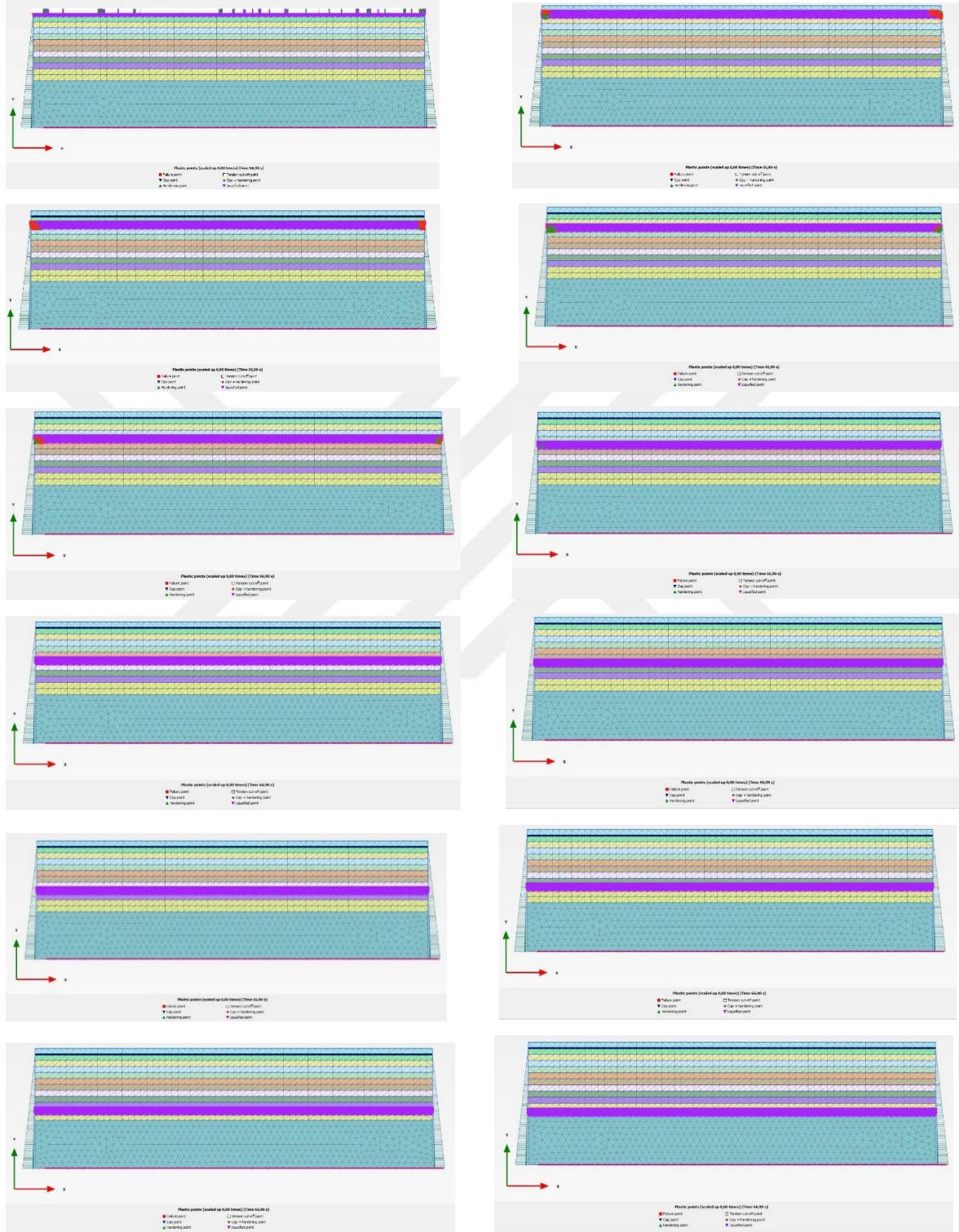


Şekil 4.12. Senaryo 11- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği



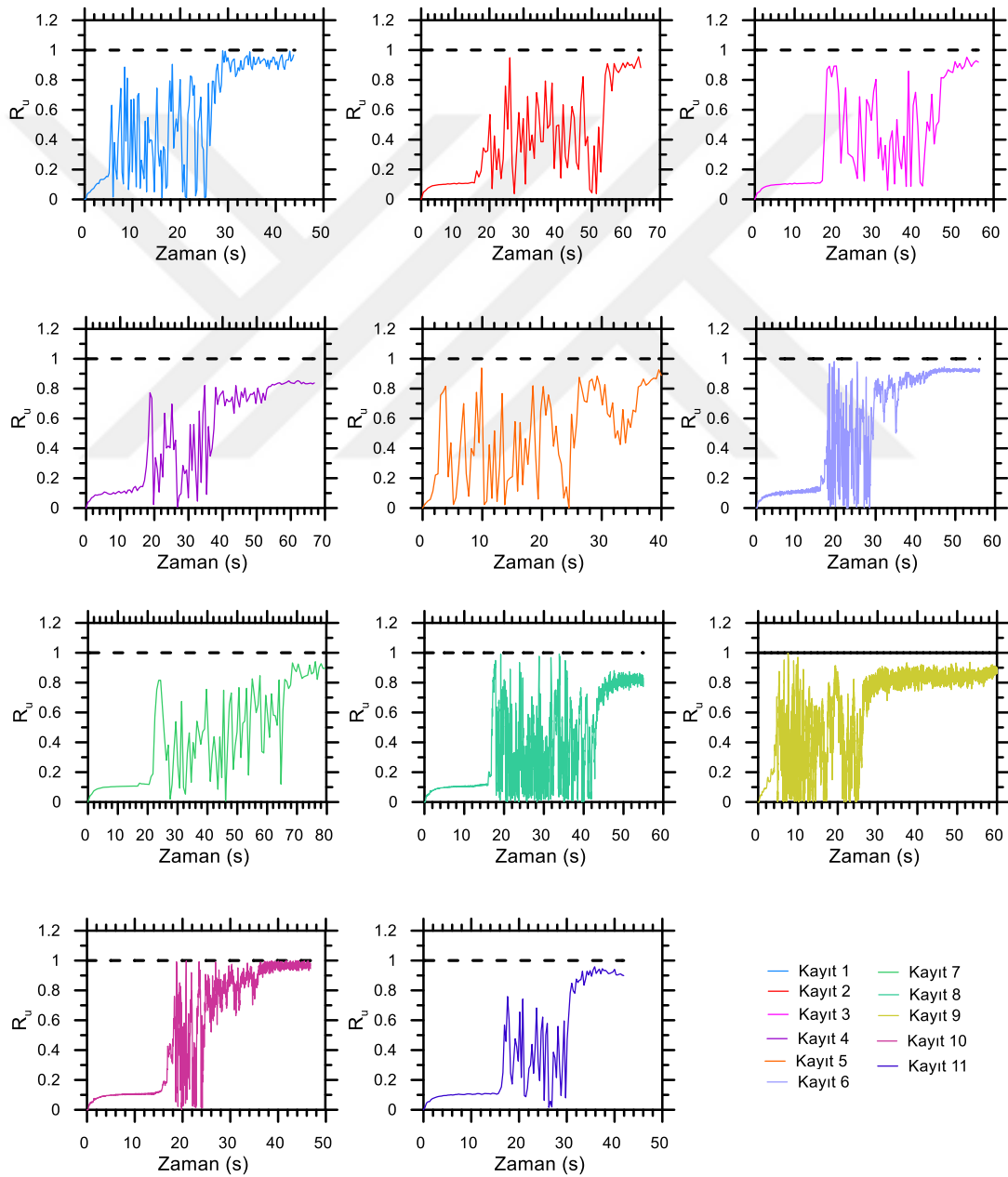
Şekil 4.13. Senaryo 12- anakaya hareket ile zemin tepkinin spektral ivme-periyot grafiği

4.3. Sıvılaşma ve Aşırı Boşluk Su Basıncı Oluşumu

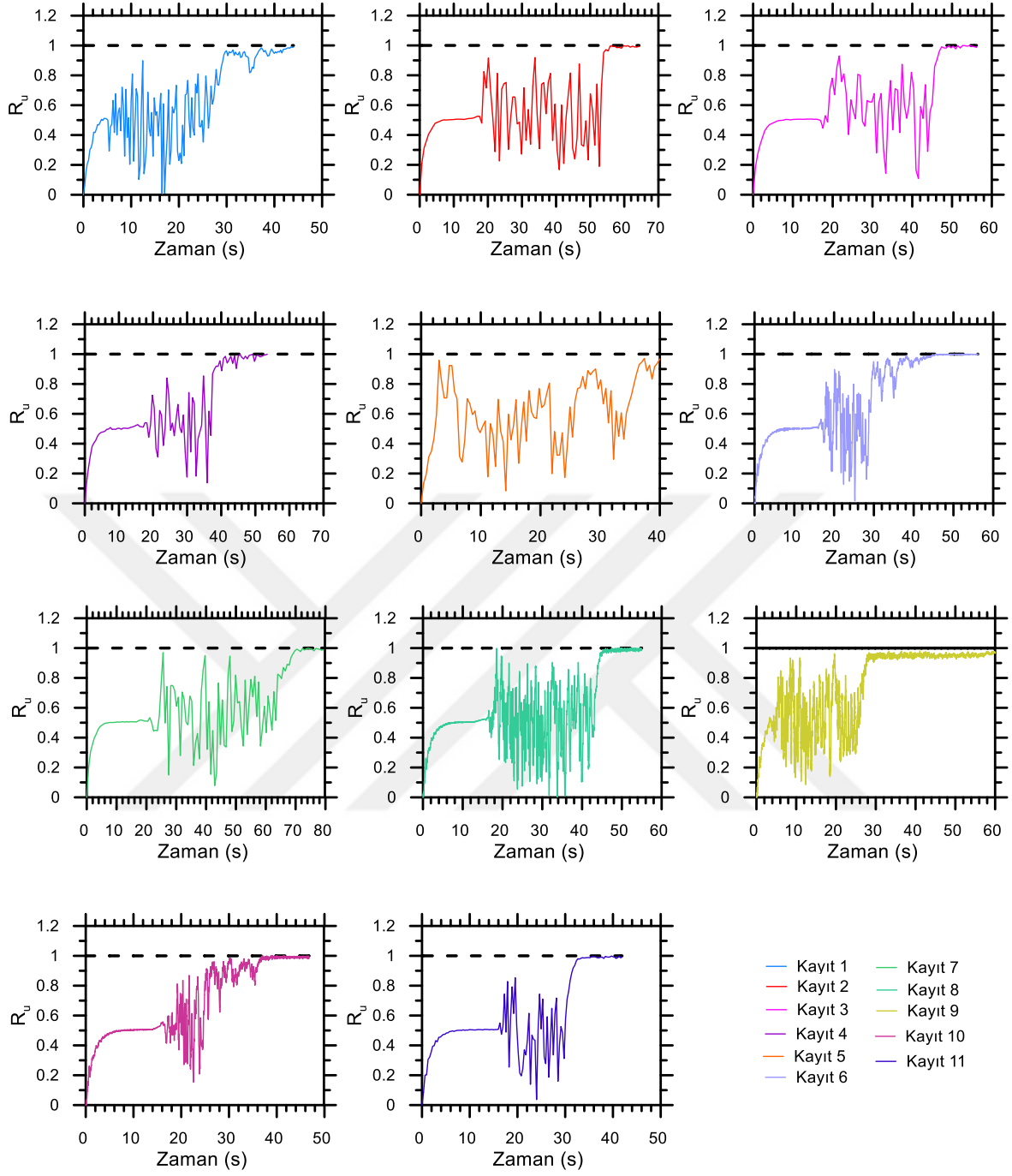


Şekil 4.14. Mor renk, PLAXIS 2D 'de Katman 1'den Katman 12'ye kadar her katmanda meydana gelen sıvılaşmayı göstermektedir (Senaryo 1- Senaryo 12)

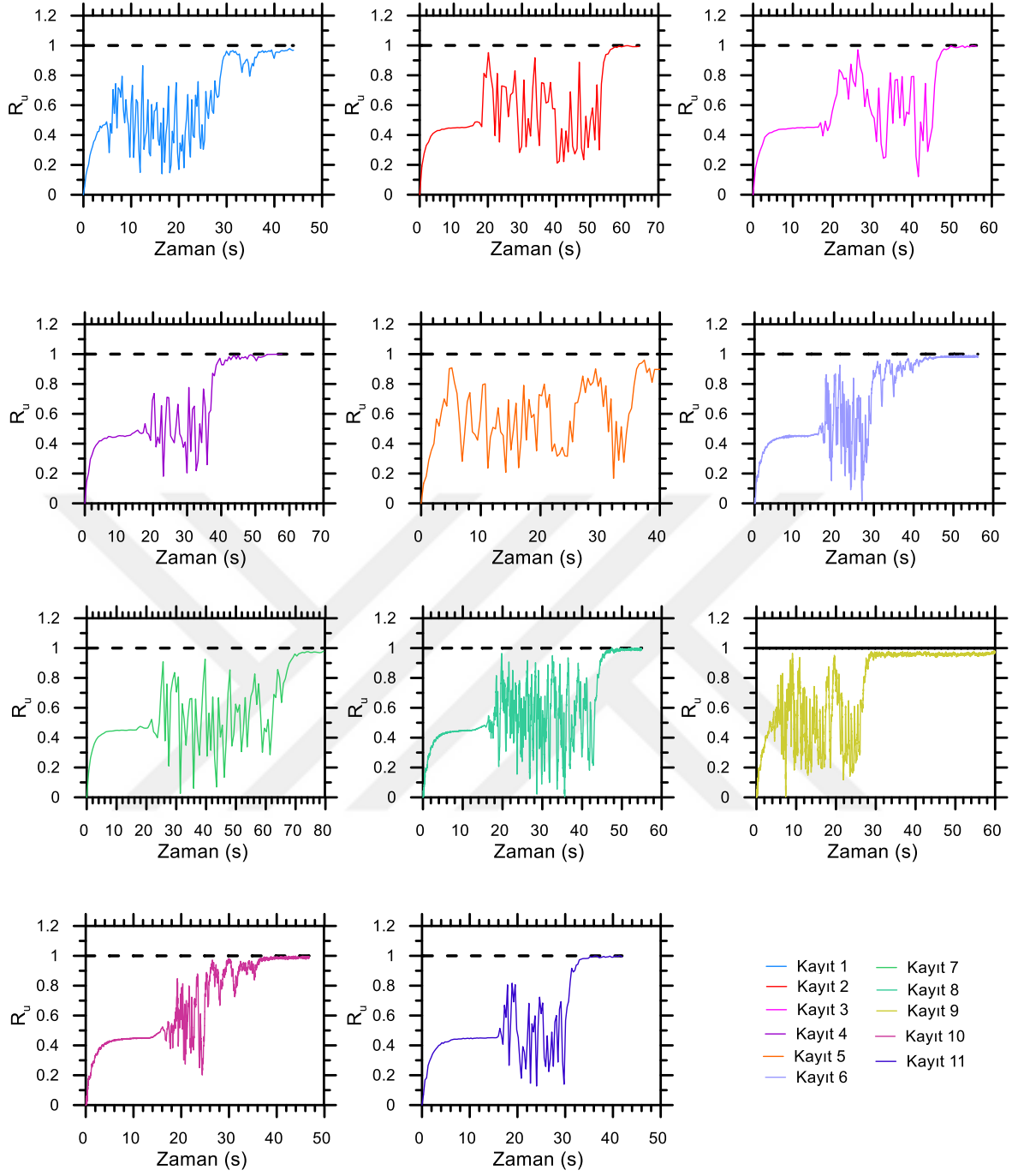
Şekil 4.14, PLAXIS 2D ‘den elde edilen sıvılaşma simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Mor renkle vurgulanan katman, sıvılaşmaya uğrayan iyi derecelenmiş kum (SW) tabakasını temsil etmektedir. Tüm on iki senaryoda, bu sıvılaşabilir kum tabakasının dikey konumu sistematik olarak değiştirilmiştir—Senaryo 1’de en üst katmandan başlayarak, kademeli şekilde Senaryo 12’de on ikinci konuma kaydırılmıştır. Her senaryoda, kum tabakasının tüm kalınlığı boyunca sıvılaşma gözlemlenmiştir; bu durum, aşırı boşluk suyu basıncı birikimi nedeniyle tam bir mukavemet kaybı olduğunu işaret etmektedir.



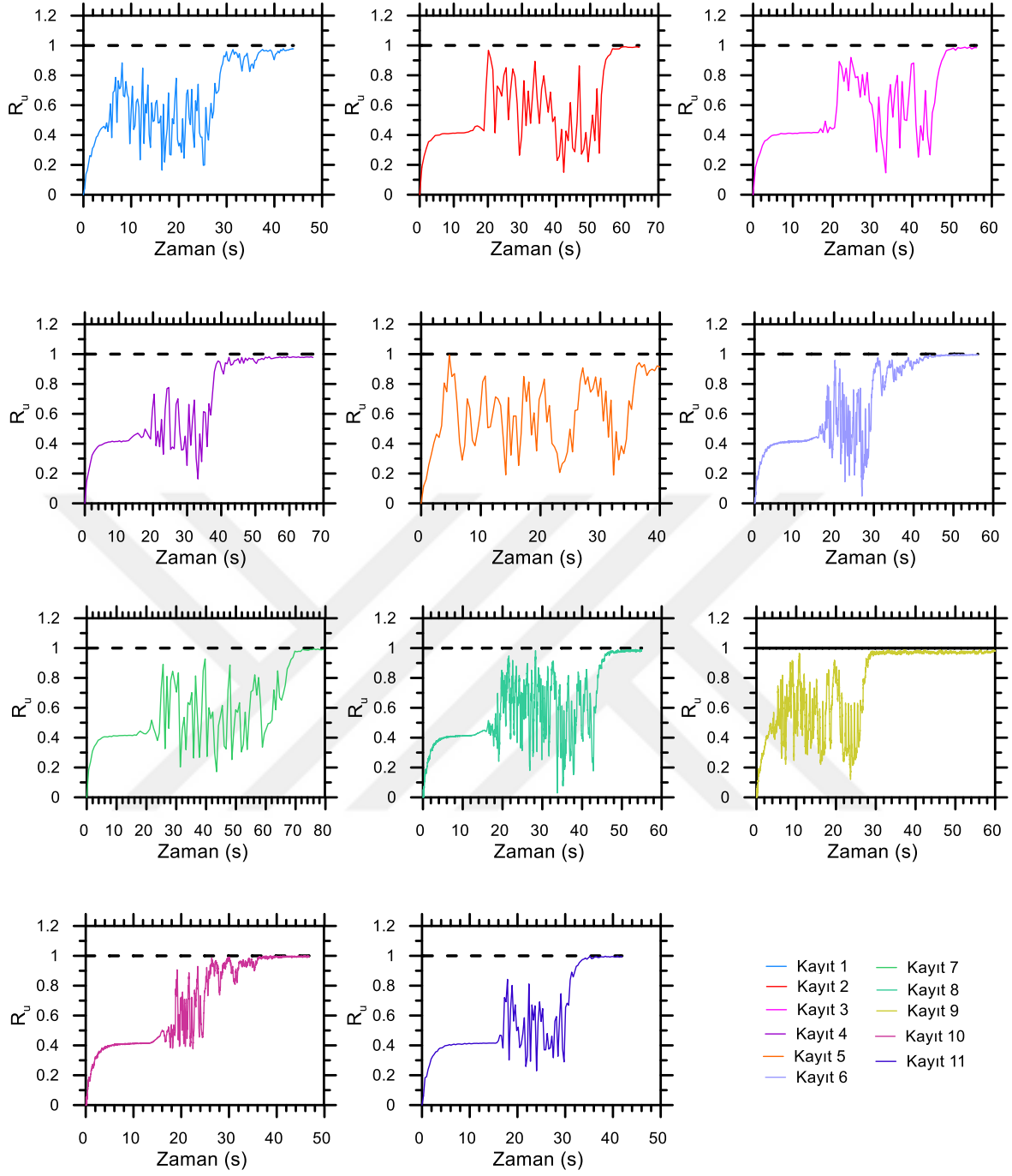
Şekil 4.15. Senaryo 1- R_u zaman grafiği



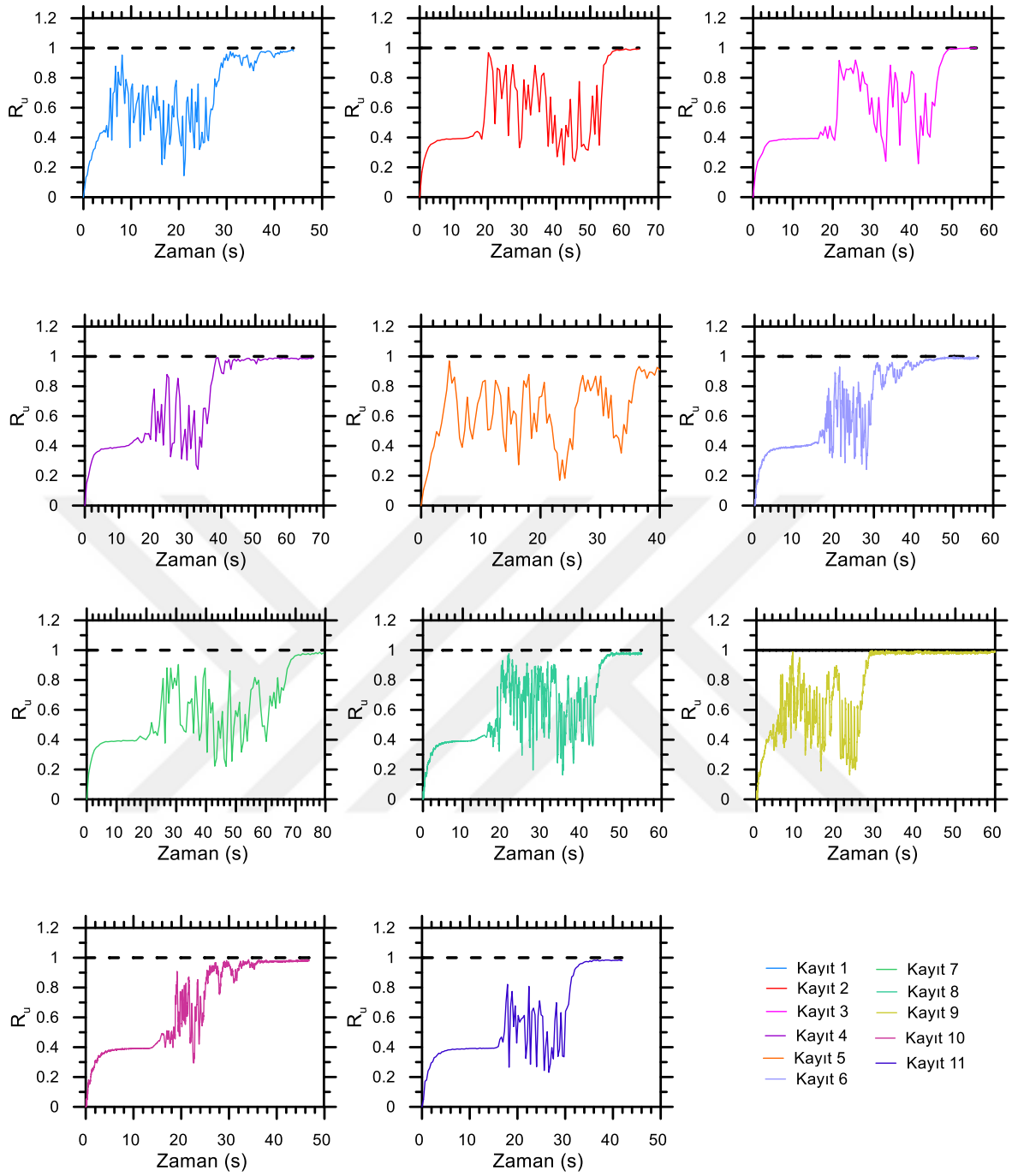
Şekil 4.16. Senaryo 2- R_u zaman grafiği



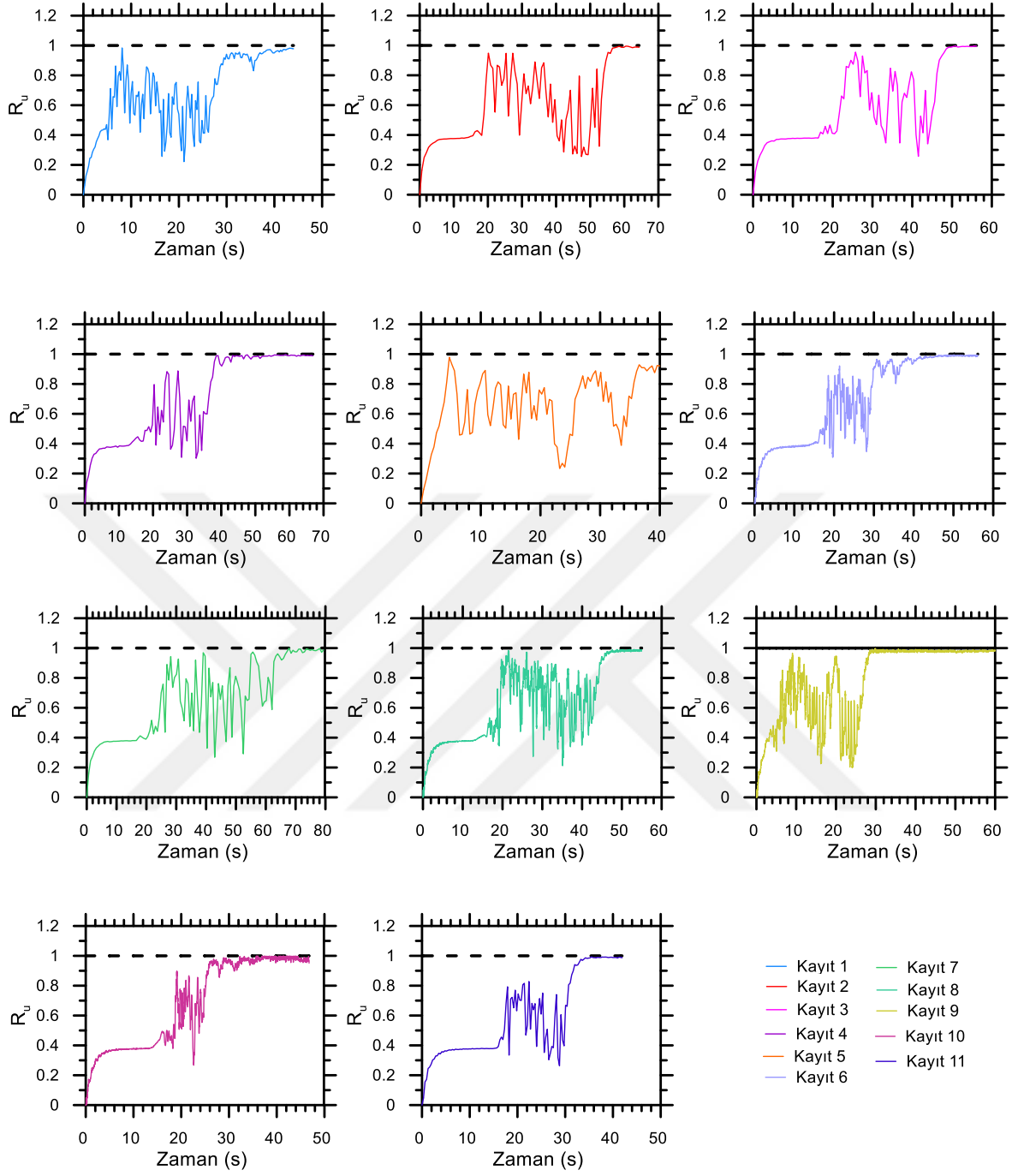
Şekil 4.17. Senaryo 3- R_u zaman grafiği



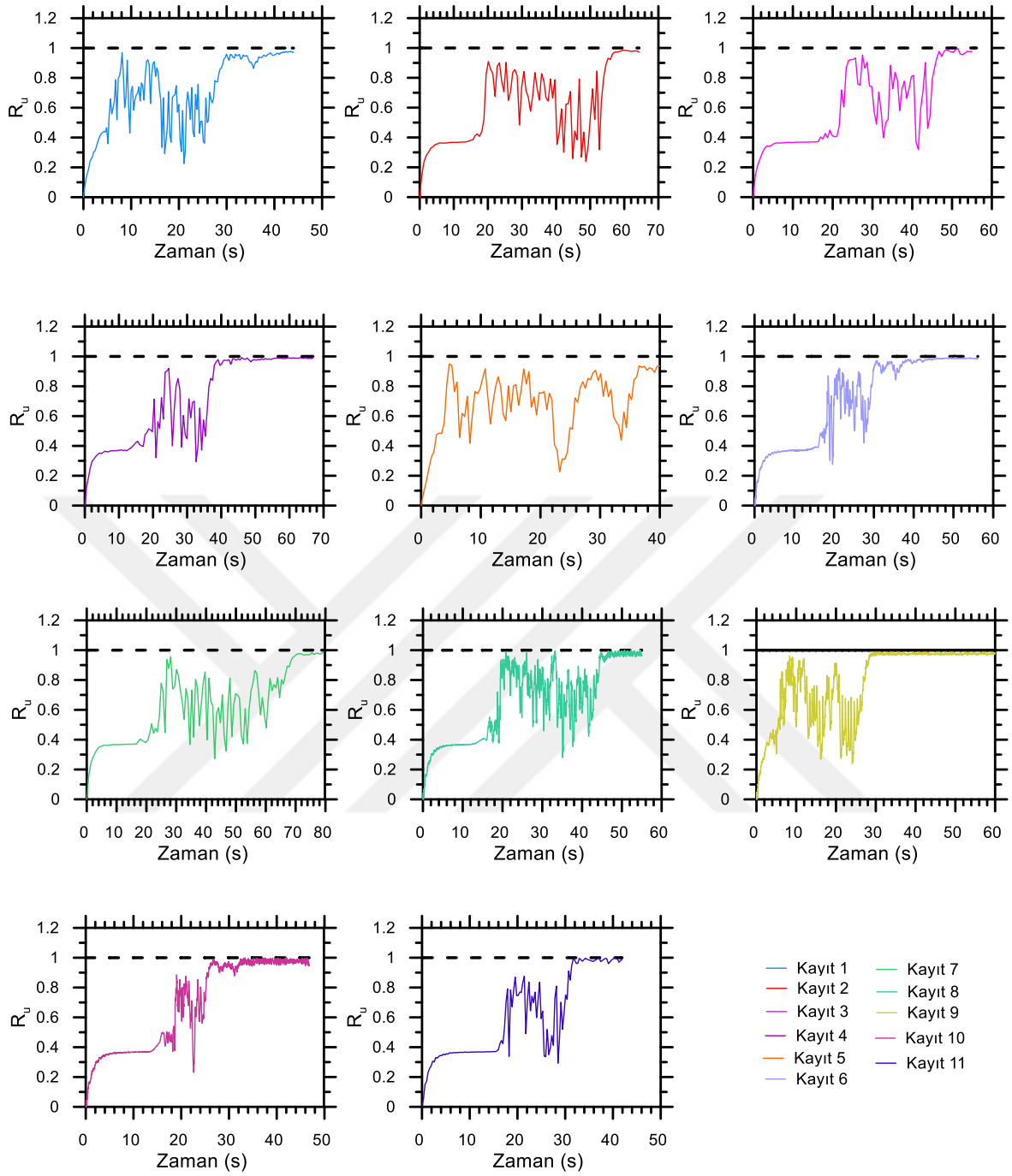
Şekil 4.18. Senaryo 4- R_u zaman grafiği



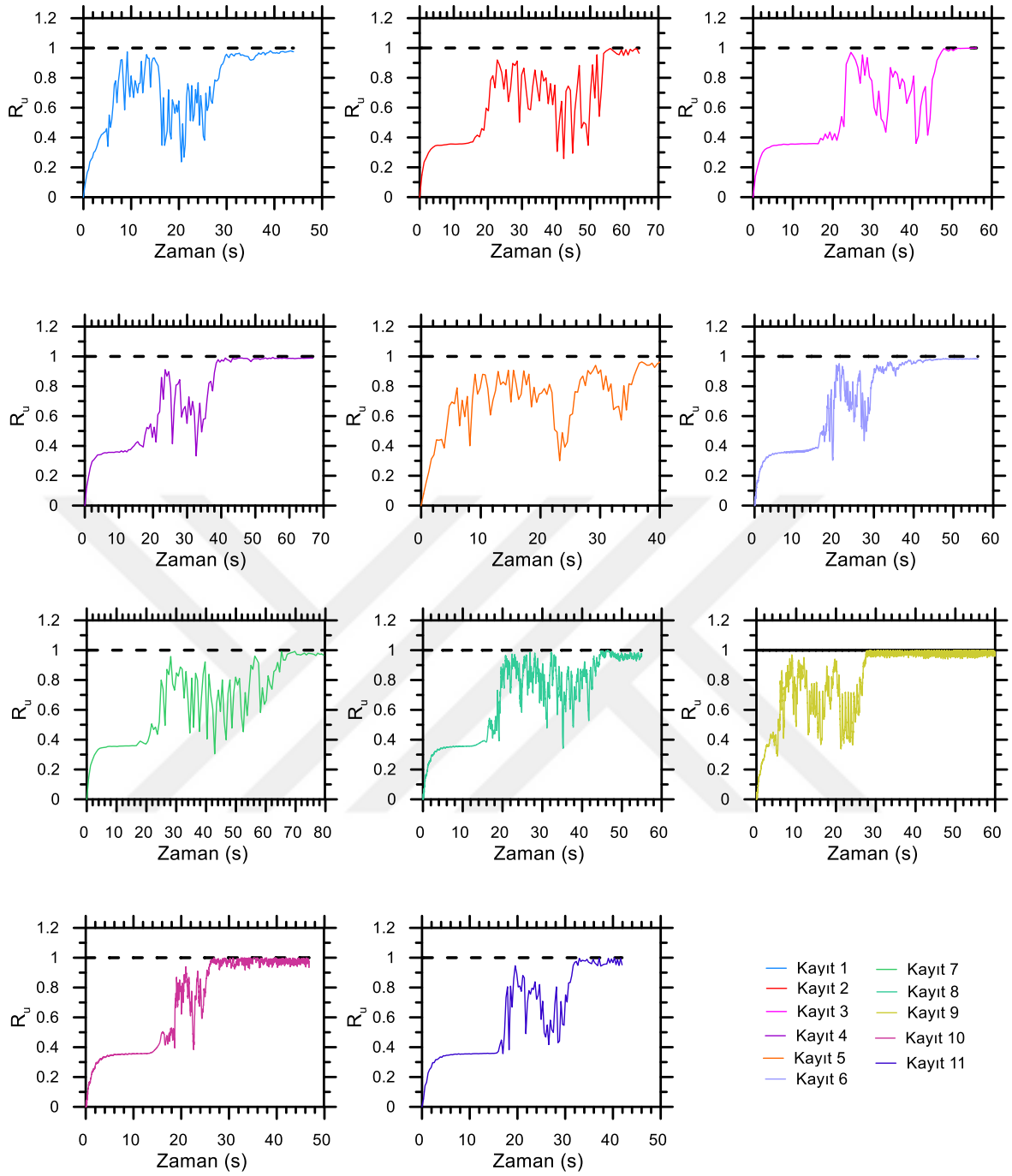
Şekil 4.19. Senaryo 5- R_u zaman grafiği



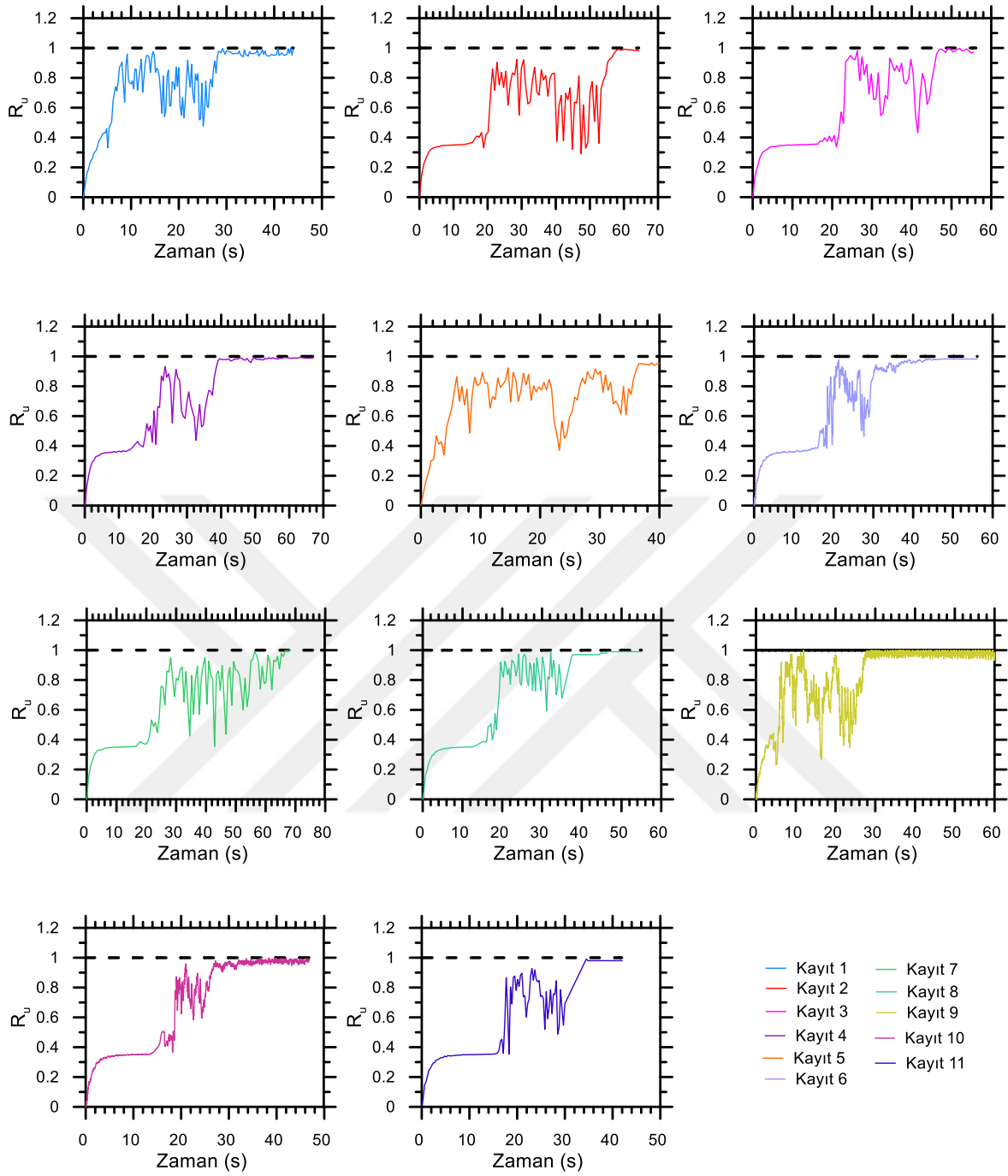
Şekil 4.20. Senaryo 6- R_u zaman grafiği



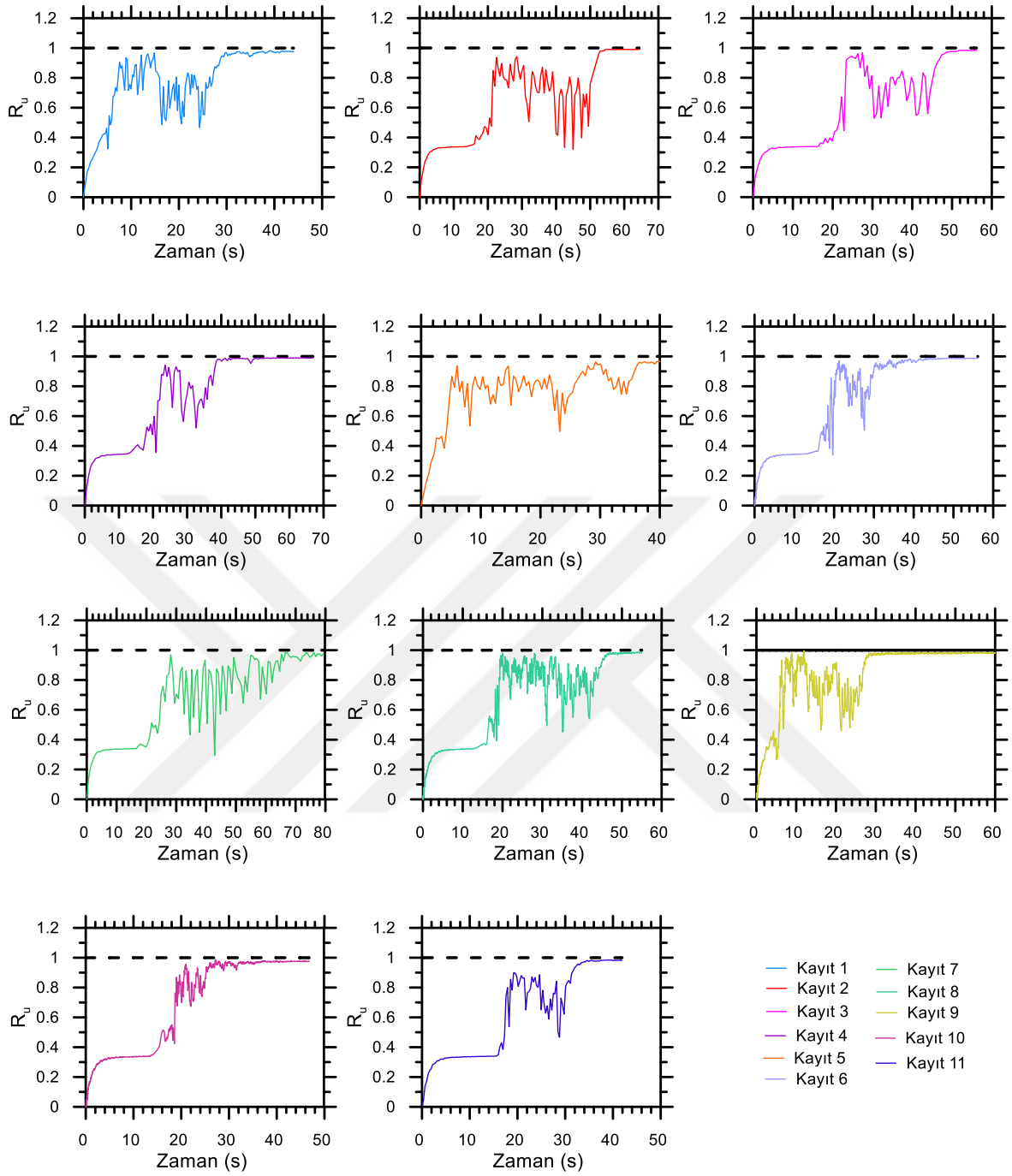
Şekil 4.21. Senaryo 7- R_u zaman grafiği



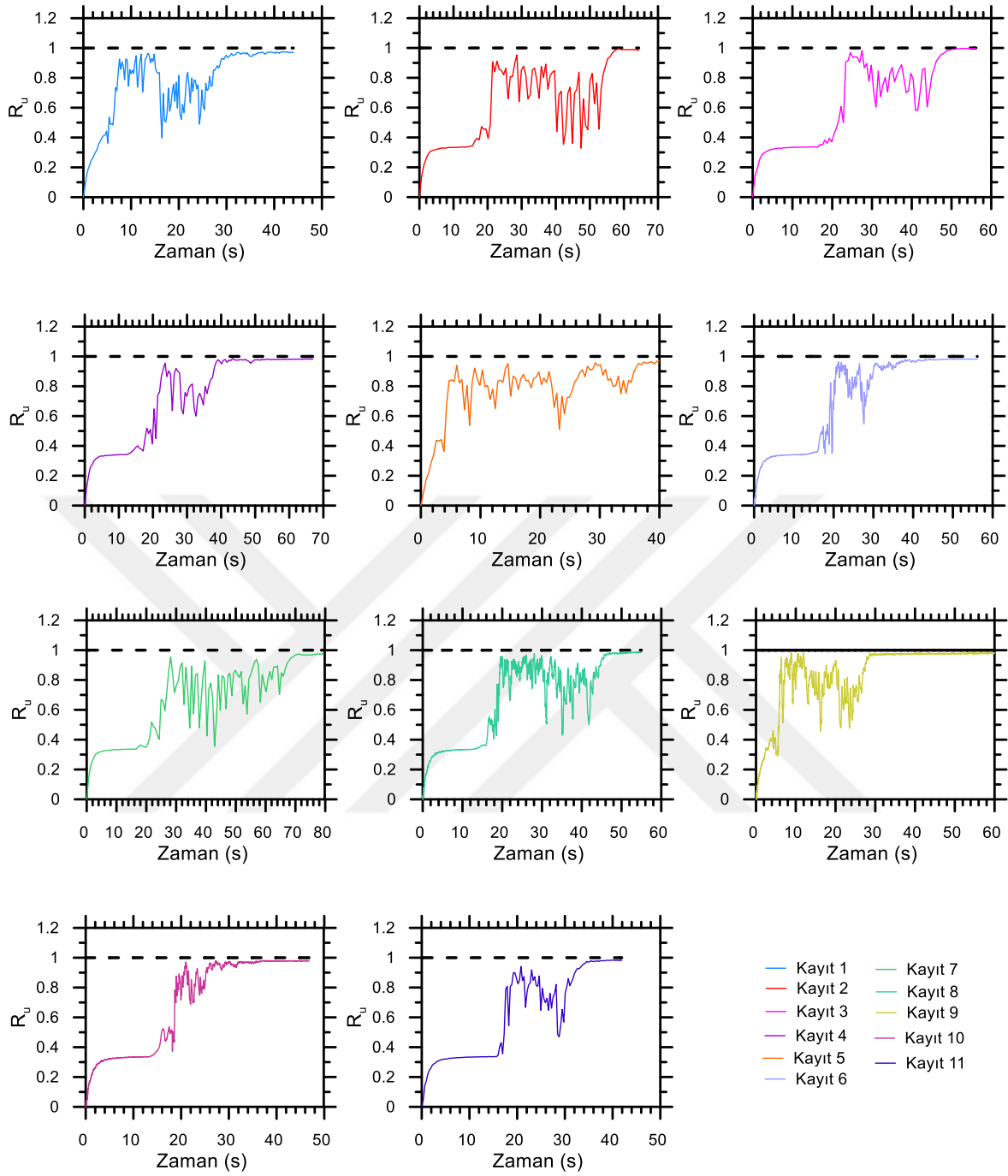
Şekil 4.22. Senaryo 8- R_u zaman grafiği



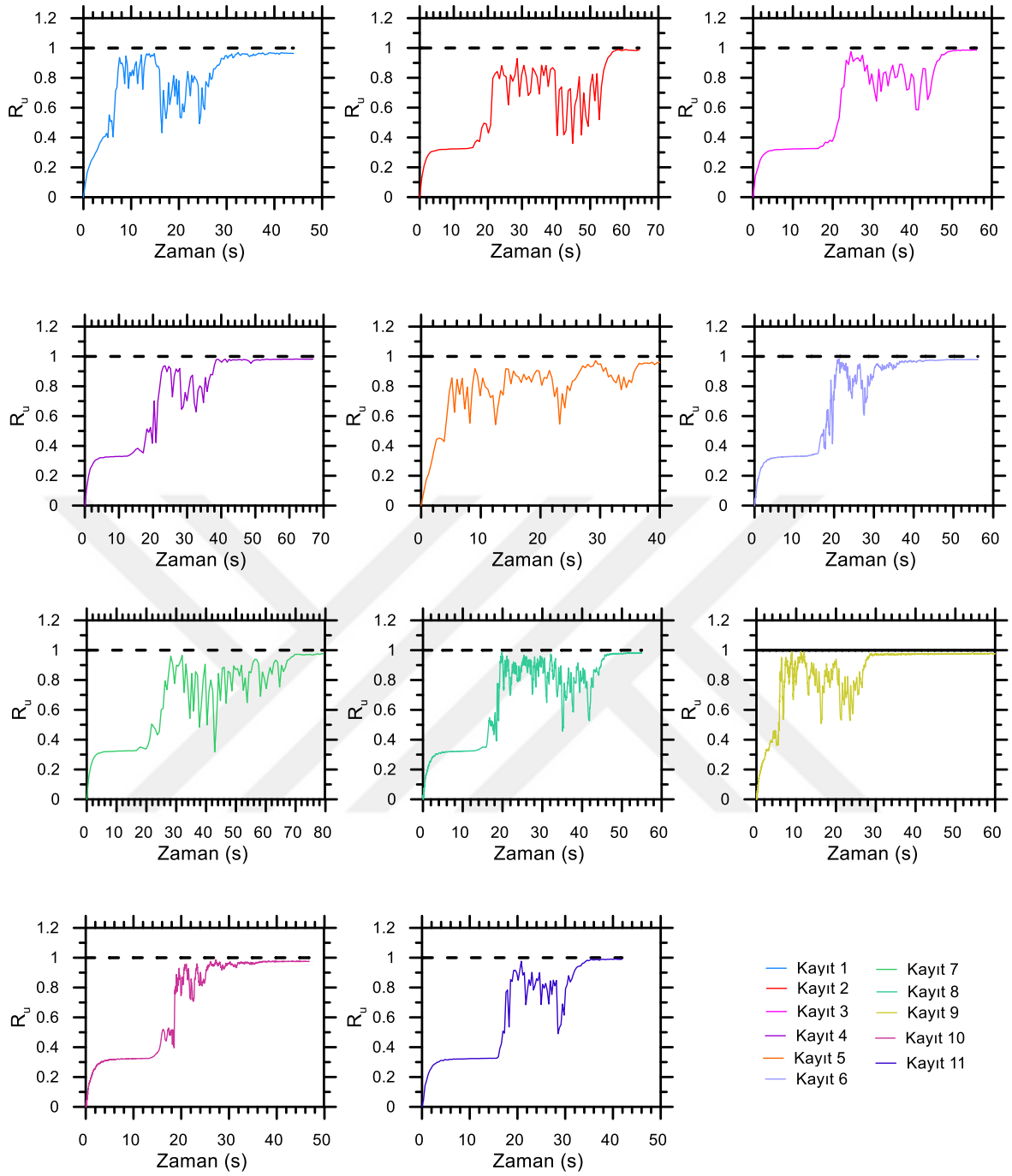
Şekil 4.23. Senaryo 9- R_u zaman grafiği



Şekil 4.24. Senaryo 10- R_u zaman grafiği



Şekil 4.25. Senaryo 11- R_u zaman grafiği



Şekil 4.26. Senaryo 12- R_u zaman grafiği

Şekil 4.15'ten Şekil 4.26'ye kadar olan şekiller, sismik yükleme süresi boyunca aşırı boşluk suyu basıncı (R_u) evrimini göstermektedir. Bu şekiller, çoğu durumda tam sıvılaşma gerçekleştiğini, yalnızca birkaç istisnada kısmi sıvılaşma meydana geldiğini işaret etmektedir. Ancak, senaryolar arasında R_u -zaman geçmişlerinin karşılaştırmalı analizi, davranışta belirgin bir çeşitlilik olduğunu ortaya koymaktadır.

En dikkat çekici gözlemlerden biri, özellikle erken senaryolarda dinamik yükleme fazı boyunca R_u değerlerinde önemli dalgalanmaların görülmesidir. Senaryo 1'de, örneğin, R_u tepkisi sismik uyarılma sırasında oldukça düzensiz bir davranış sergilemektedir. Senaryo 1'den Senaryo 12'ye doğru sıvılaşabilir kum tabakasının derinliği kademeli olarak arttıkça, bu dalgalanmalar azalmakta ve R_u izleri giderek daha düzgün ve tutarlı hale gelmektedir. Bu kademeli stabilizasyon, birbiriyle ilişkili şu faktörlere bağlanabilir:

1. Sığ derinliklerde, başlangıçtaki düşey etkin gerilme nispeten düşüktür. Bu koşullar altında, aşırı boşluk suyu basıncındaki küçük artışlar bile, R_u oranında orantısız büyük değişimlere yol açarak ani ve doğrusal olmayan tepkilere neden olur.
2. Sıvılaşabilir tabaka zemin profili içinde daha derine yerleştirildiğinde, toplam ve etkin üst örtü gerilmeleri artar. Bu yüksek çevre gerilmesi, tam sıvılaşmaya ulaşmak için daha fazla boşluk suyu basıncı birikimi gerektiren bir dengeleyici faktör görevi görür. Sonuç olarak, R_u eğrileri döngüsel yükleme altında daha kademeli ve düzgün bir şekilde yükselir.
3. Sığ katmanlar, yüksek frekanslı sismik enerjinin tam spektrumuna maruz kalır ve bu da döngüsel kayma gerilmelerinde hızlı dalgalanmalara yol açar. Bu düzensiz girdiler, boşluk suyu basıncında aralıklı ani yükselmeleri tetikleyebilir. Buna karşılık, derin katmanlar dalga zayıflaması nedeniyle filtrelenmiş sismik enerjiye maruz kalır ve bu da daha kararlı ve kademeli bir boşluk suyu basıncı oluşumuna yol açar.
4. Yüzeye yakın bölgelerde, kısa drenaj yolları sarsıntı sırasında aşırı boşluk suyu basıncının kısmen dağılmasına izin vererek R_u tepkisinde ek değişkenlik yaratır. Buna karşın, derin katmanlarda drenaj yolları çok daha uzundur, bu da dağılma hızını sınırlar ve aşırı boşluk suyu basıncının daha homojen birikimini sağlar.

Özetle, yüzeyle yakın sıvılaştırılabilir tabakalar, düşük çevre basıncı ve filtrelenmemiş yüksek frekanslı sismik girdilere maruz kalır. Bu kombinasyon, R_u 'da keskin ve düzensiz dalgalanmalara neden olur. Derin sıvılaştırılabilir tabakalar ise artan üst örtü basıncı ve dalga filtrelenmesi ile karşılaşır. Bu faktörler, aşırı boşluk suyu basıncının kademeli birikimini destekleyerek daha düzgün ve öngörülebilir R_u -zaman geçmişleri üretir.

Senaryo 1'den Senaryo 12'ye kadar gözlemlenen bir diğer önemli eğilim, sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği arttıkça, dinamik zamanın aynı noktasında R_u değerinin daha yüksek hale gelmesidir. Başka bir deyişle, aşırı boşluk suyu basıncı derin tabakalarda sıkı olanlara kıyasla daha hızlı birikir ve daha yüksek bir büyüklüğe ulaşır. Bu model, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunun daha derinlerde daha etkili olduğunu gösterir. Bu fenomeni açıklamaya yardımcı olan çeşitli nedenler şunlardır:

1. Sıvılaştırılabilir kum tabakası zemin profilinde daha derine yerleştirildiğinde, üzerindeki tüm zemin katmanlarının ağırlığı nedeniyle daha yüksek başlangıç etkin gerilmesine maruz kalır. İlk bakışta, bu durumun boşluk suyu basıncı birikimini engelleyeceği düşünülebilir, çünkü yüksek çevre gerilmesi genellikle daha fazla mukavemet anlamına gelir. Ancak derin katmanlarda, depremin oluşturduğu döngüsel kayma gerilmeleri daha düzgün ve sürekli bir şekilde uygulanır. Bunun nedeni, zemin içinde ilerleyen sismik dalgaların filtrelenmesidir—yüksek frekanslı bileşenler emilir veya azalır, düşük frekanslı dalgalar baskın hale gelir. Bu düşük frekanslı dalgalar, derin zemin katmanlarının doğal titreşim özellikleriyle daha uyumludur ve bu da daha verimli ve sürekli boşluk suyu basıncı oluşumuna yol açar. Sonuç olarak, çevre gerilmesi daha yüksek olsa bile, derin zemin aşırı boşluk suyu basıncını daha kararlı bir şekilde biriktirir ve zaman geçmişi grafiklerinde R_u 'da daha erken ve yüksek bir artış görülür.

2. Derin zemin katmanları aynı zamanda daha sıkışık olduğundan, zemin gözeneklerinde hapsolan suyun sarsıntı sırasında kaçması çok daha zordur. Bu drenaj kısıtlaması, aşırı boşluk suyu basıncının oluşum sonrası dağılma hızını yavaşlatır. Dolayısıyla, yüzeyde ve derinde aynı miktarda sarsıntı olsa bile, derin tabaka üretilen basıncın daha büyük bir kısmını tutar. Buna karşılık, yüzeyle yakın katmanlar kısmi drenaja izin vererek R_u değerlerini azaltabilir. Bu nedenle, derin katmanlar aynı sismik yükleme süresinde aşırı boşluk suyu basıncını daha hızlı ve tamamen biriktirir.

3. Tanım gereği, R_u , Δu ile doğru orantılıdır. R_u 'nun derinlikle artması için, Δu 'nun artış hızının σ'_{vo} 'dan daha yüksek olması gerekir. Bu durum, derin zeminlerin daha iyi hizalanmış sismik enerji, düşük frekanslı yükleme ve kısıtlı drenaj gibi faktörler nedeniyle daha verimli basınç üretmesiyle gerçekleşebilir. σ'_{vo} derinlikte daha yüksek olsa bile, Δu daha hızlı artarsa R_u yükselmeye devam eder.

4. Boşluk suyu basıncı oluşumunu tetikleyen döngüsel gerilme oranı (CSR), kısmen derinlikle azalan gerilme azaltma faktörü (r_d) tarafından kontrol edilir. Bu, derin katmanlara uygulanan döngüsel gerilmenin daha düşük olduğu anlamına gelir. Ancak, derindeki sıvılaşabilir kum gevşek yapıda veya kesme altında büzülme eğiliminde (kontraktif) ise, döngüsel direnç oranı (CRR) daha düşük olabilir. Bu durumda, küçük döngüsel yükler bile önemli boşluk suyu basıncı birikimine yol açabilir. Gerilme talebi ile zemin direnci arasındaki bu dengesizlik, derinlerde daha fazla Δu üretimine ve daha yüksek R_u değerlerine katkıda bulunur.

5. Son olarak, derinlikteki yüksek R_u değerinin anlık olarak daha fazla basınç üretildiği anlamına gelmediğini anlamak önemlidir—bu genellikle basıncın daha iyi korunduğunu yansıtır. Derin zeminin sıkışık koşulları, sınırlı drenaj yolları ve döngüsel yükleme altında büzülme eğilimi, boşluk suyu basıncının korunmasına ve birikmesine yardımcı olur. Bu, yüksek çevre gerilmesine rağmen Δu 'nun σ'_{vo} 'dan daha hızlı arttığı anlamına gelir. Sonuç olarak, derin sıvılaşabilir katmanlar, kritik R_u seviyelerine daha güvenilir şekilde ulaşabilir—bu, sıvılaşma tehlikesi değerlendirmelerinde hayati bir husustur. Bu katmanlar daha yüksek gerilme altında gömülü olsa bile, verimli basınç tepkisi ve zayıf dağılım nedeniyle kırılma mekanizmalarını kontrol edebilir.

Özetle, sıvılaşabilir tabakanın derinleşmesiyle R_u değerlerinin daha erken ve daha yüksek çıkması, birkaç birleşik etkinin sonucudur: artan sıkışıklık, azalan drenaj, daha kararlı sismik yükleme ve zeminin kendi mekanik davranışı. Derin katmanlar daha yüksek etkin gerilmeye maruz kalsa da sınırlı dağılım ve daha uygun yükleme koşulları nedeniyle daha fazla boşluk suyu basıncını tutar. Bu nedenle, yüzeyin altında gömülü olsalar bile, kritik R_u değerlerine daha hızlı ulaşabilir ve potansiyel olarak daha büyük bir sıvılaşma riski oluşturabilirler.

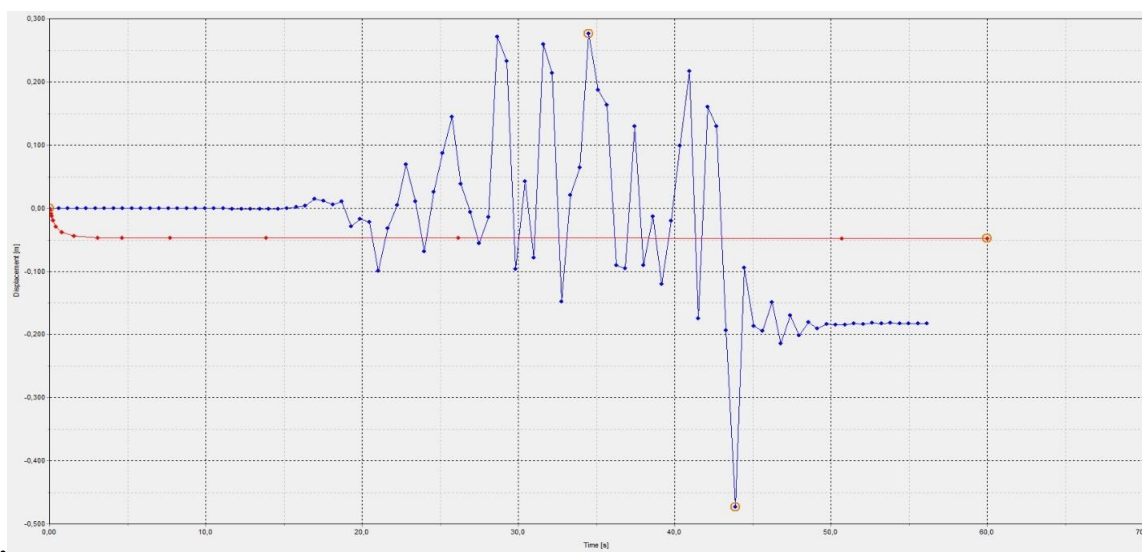
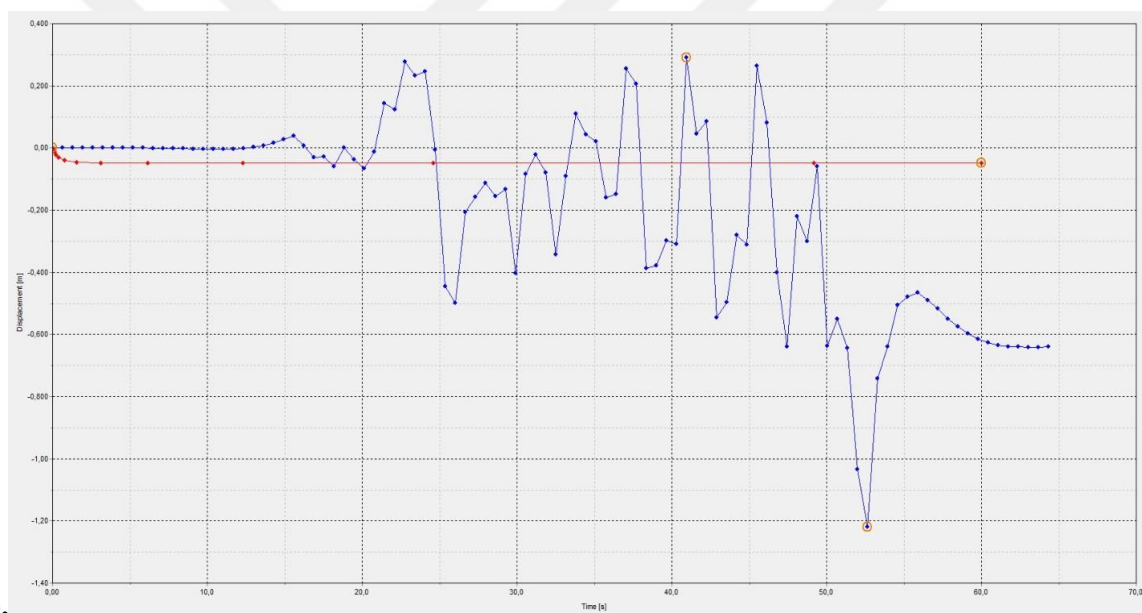
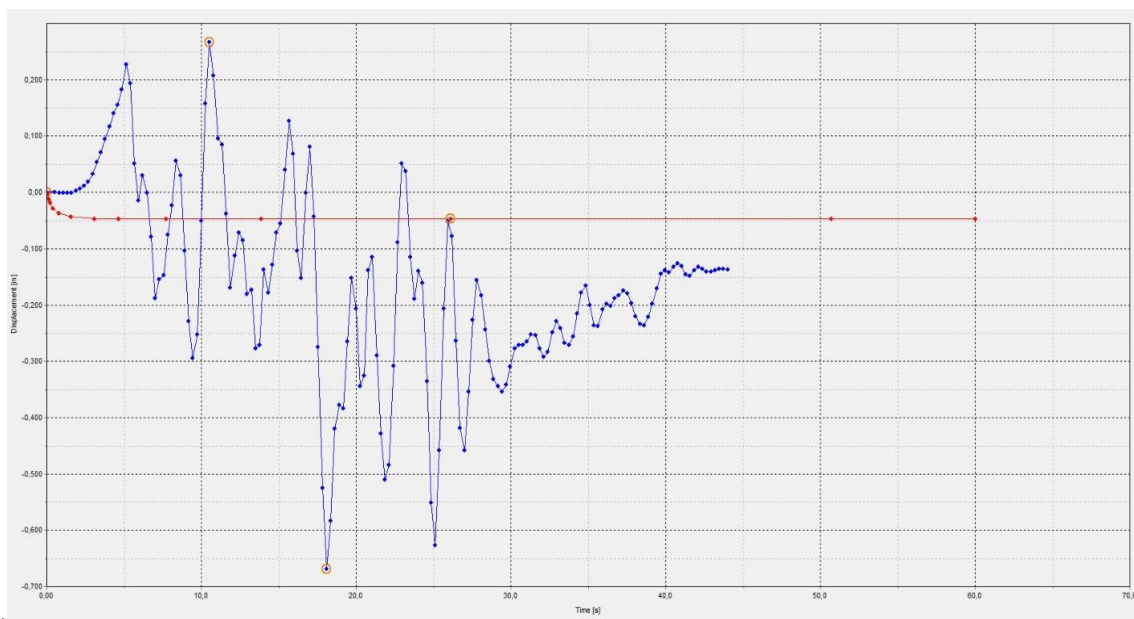
Son olarak, sıvılaşma tetiklendikten sonra R_u değerinin (sıvılaşma bölgesinde) Senaryo 1'den Senaryo 12'ye kadar 0.9'dan 1'e yaklaştığı da gözlemlenmiştir. Bu durum, derinlik arttıkça daha iyi bir sıvılaşma derecesi olduğunu gösterir. Bu şu şekilde yorumlanabilir:

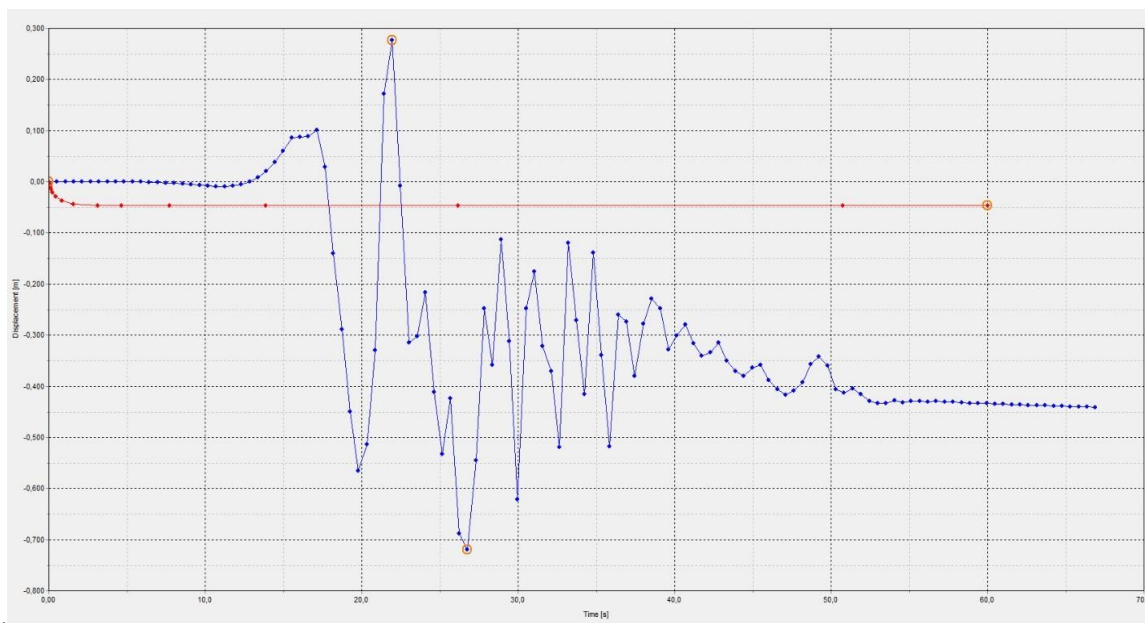
1. Sıvılaşma başladığında, daha yüksek üst örtü ve hidrostatik basınca sahip derin katmanların sıfır etkin gerilmeye ulaşması için daha büyük mutlak aşırı boşluk suyu basıncı gerekir. Ancak, bunları tetikleyen aynı döngüsel yükleme, normalleştirilmiş R_u oranını neredeyse tamamen 1'e yaklaştırır, bu da başlangıç etkin gerilmesinin büyük ölçüde boşluk suyu basıncı tarafından yenildiğini gösterir.

2. Daha derin seviyelerde bulunan kum tabakaları, sıvılaşma sonrasında sertlik ve kesme mukavemetinde daha belirgin bir azalma göstermektedir. Bu durum, sıvılaşma tetiklendiğinde söz konusu katmanın hızla akışkan benzeri bir davranış sergilemesine neden olur. Bu davranışın en açık göstergesi, R_u değerinin 0.9 seviyelerinden 1.0'a yaklaşmasıdır. R_u 'nun bu seviyelere ulaşması, kesme mukavemetinin neredeyse tamamen kaybedildiğini ve zeminin geçici olarak taşıma kapasitesini yitirdiğini ifade etmektedir. Bu tür bir davranış, özellikle derin konumlu sıvılaşabilir katmanların, üzerindeki yapılar için tehlikeli hale gelmesine neden olabilir.

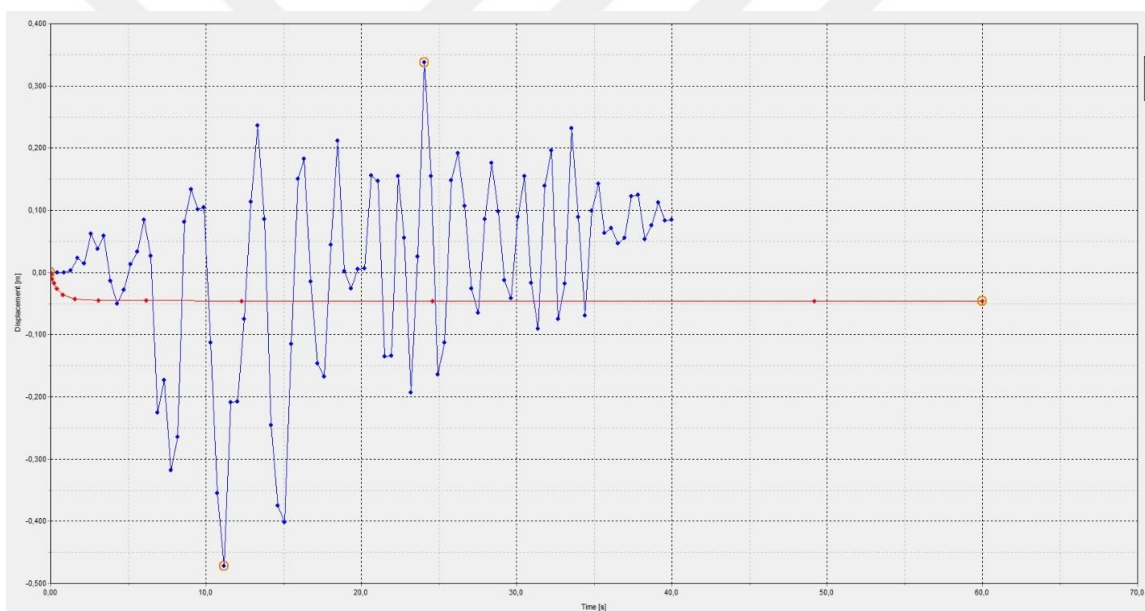
4.4. Sıvılaşma Kaynaklı Zemin Yer Değiştirmesi

Çalışmanın en kritik amaç, hem düşey (oturma) hem de yatay (yanal yayılma) zemin yer değiştirme modellerinin gözlemlenmesi olmuştur. Yer değiştirme büyüklüklerinin, sıvılaşabilir tabakanın konumuna güçlü şekilde bağlı olduğu bulunmuştur: sığ sıvılaşma daha büyük ve düzensiz yer değiştirmeler üretirken, derin sıvılaşma daha küçük ve homojen oturmalarla yol açmıştır. Ayrıca, yatay ve düşey yer değiştirmeler arasındaki korelasyon analiz edilmiş ve gelecekteki tasarım uygulamaları için pratik tahmin değeri sunan güçlü bir doğrusal ilişki ortaya konulmuştur. Şekil 4.27 farklı deprem zemin hareketi altında analiz edilen Senaryo 4 için zemin yer değiştirme sonuçlarını sunmaktadır. Grafikte, mavi eğri yatay (yanal) yer değiştirmeyi, kırmızı eğri ise düşey yer değiştirmeyi (oturma) temsil etmektedir.

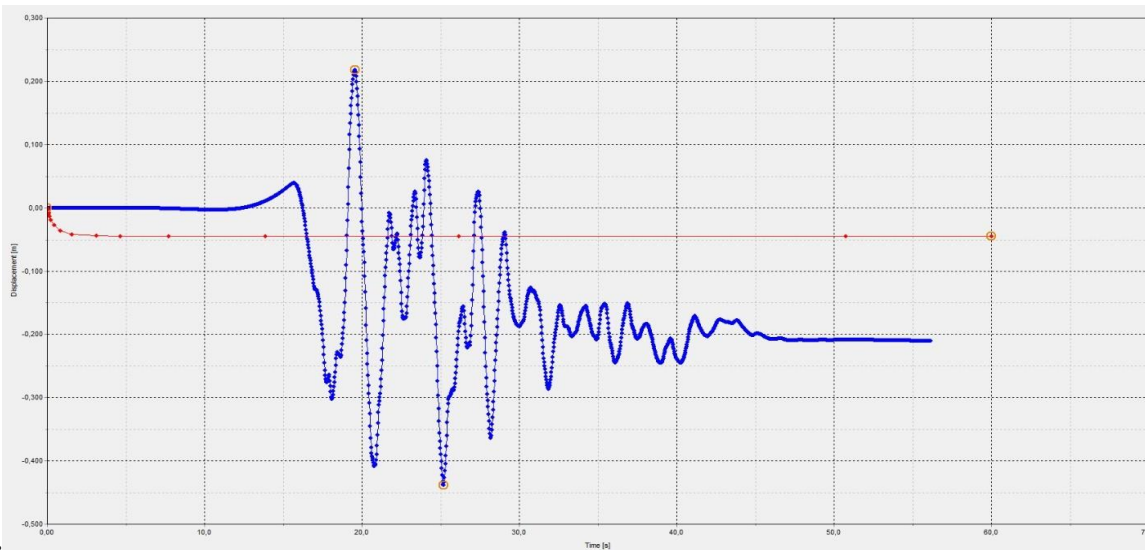




d.

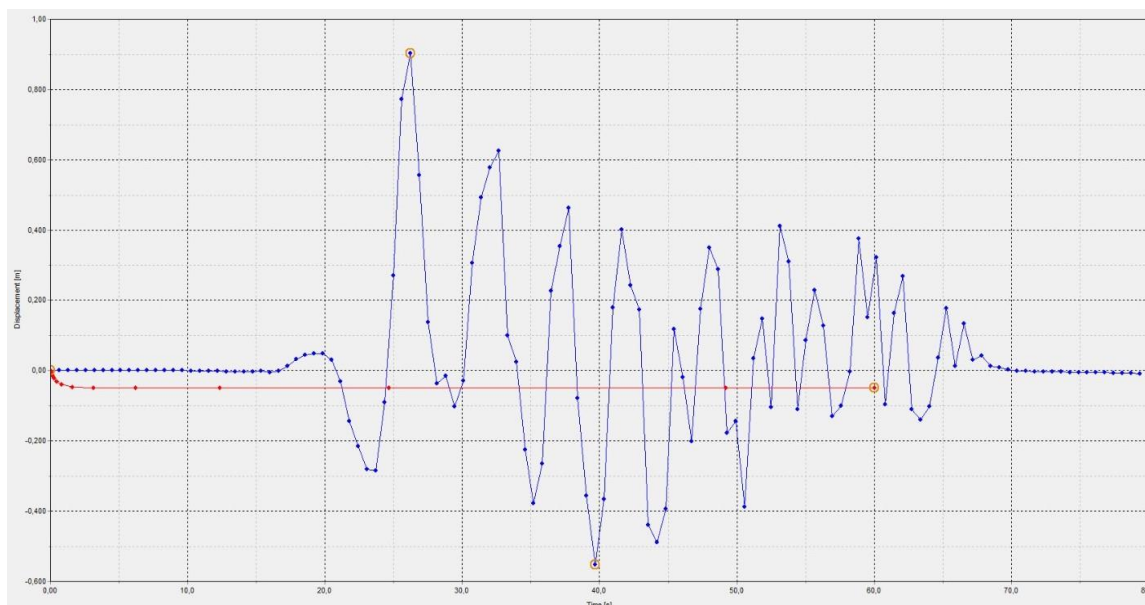


e.

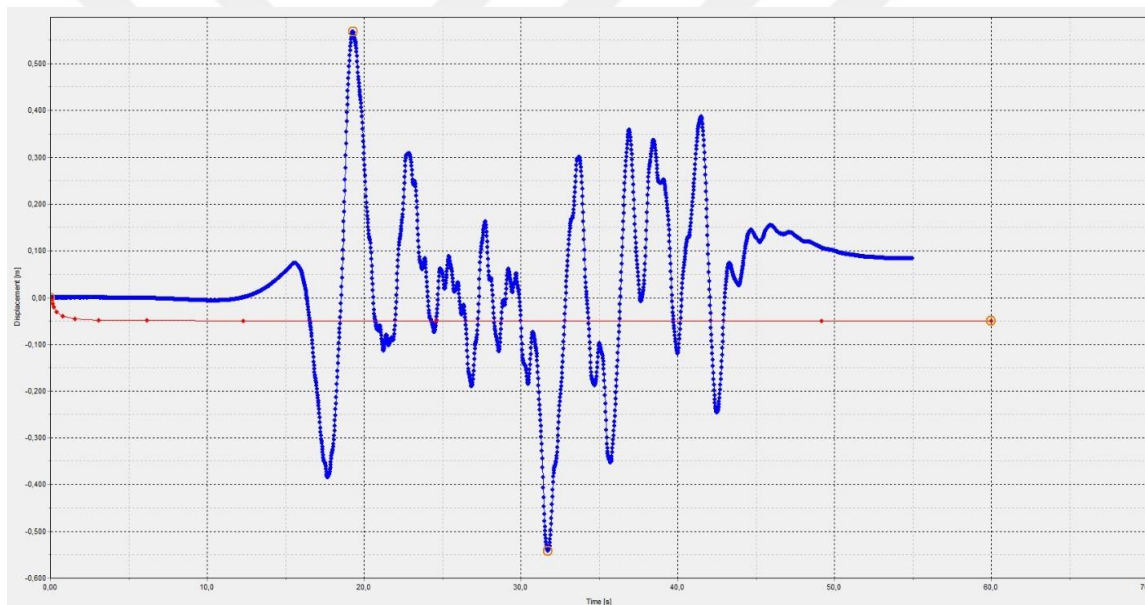


f.

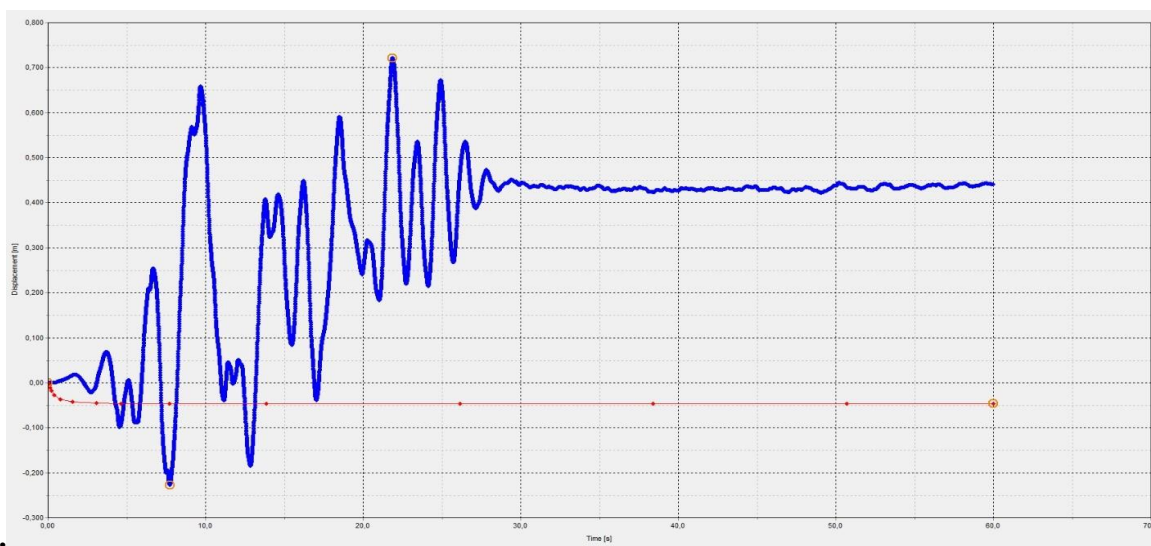
g.

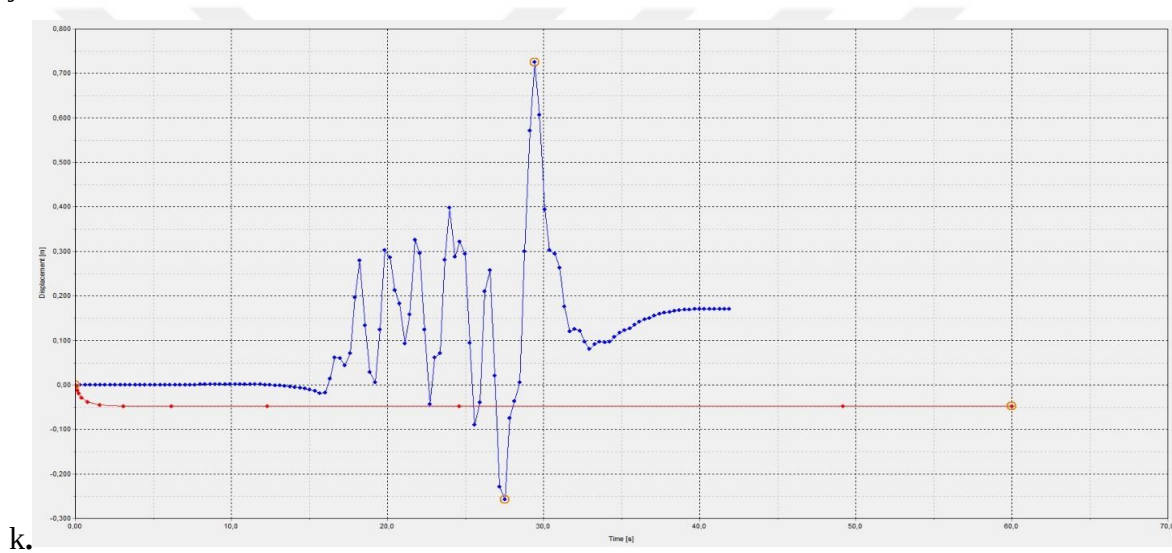
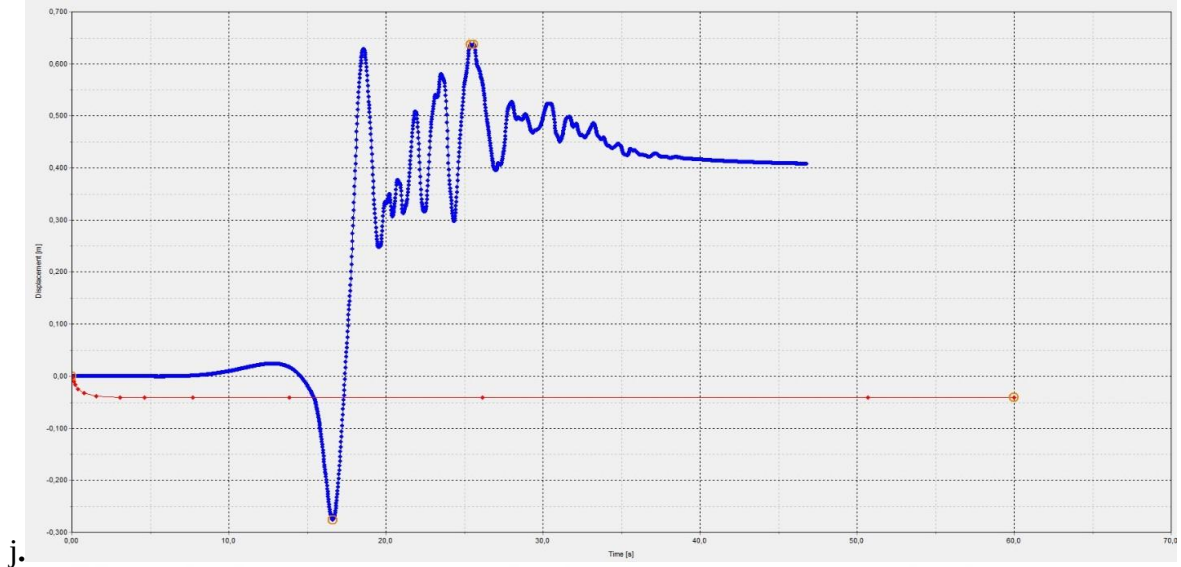


h.



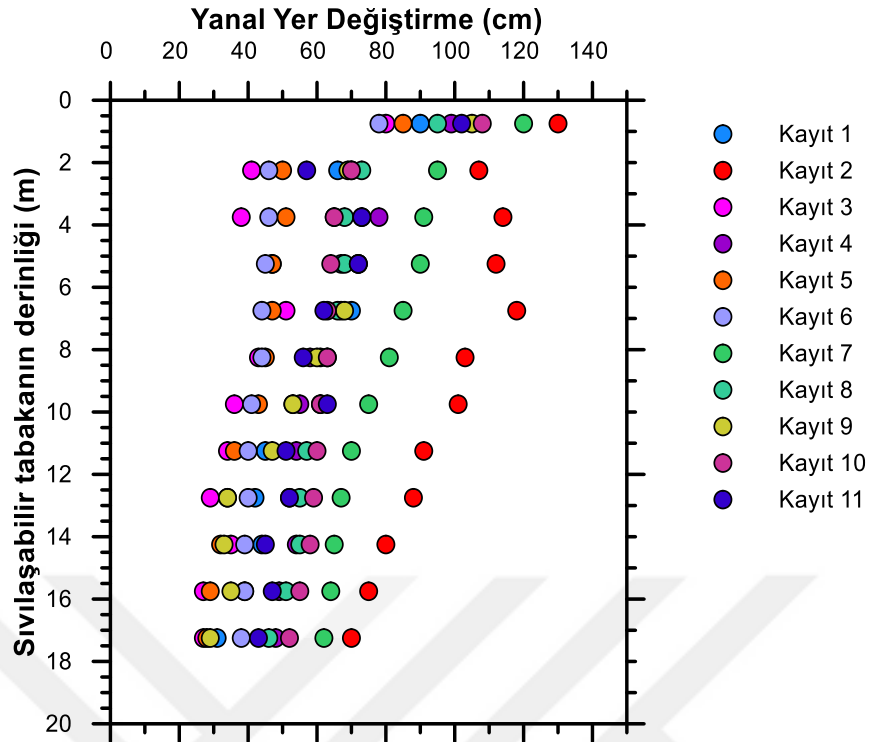
i.



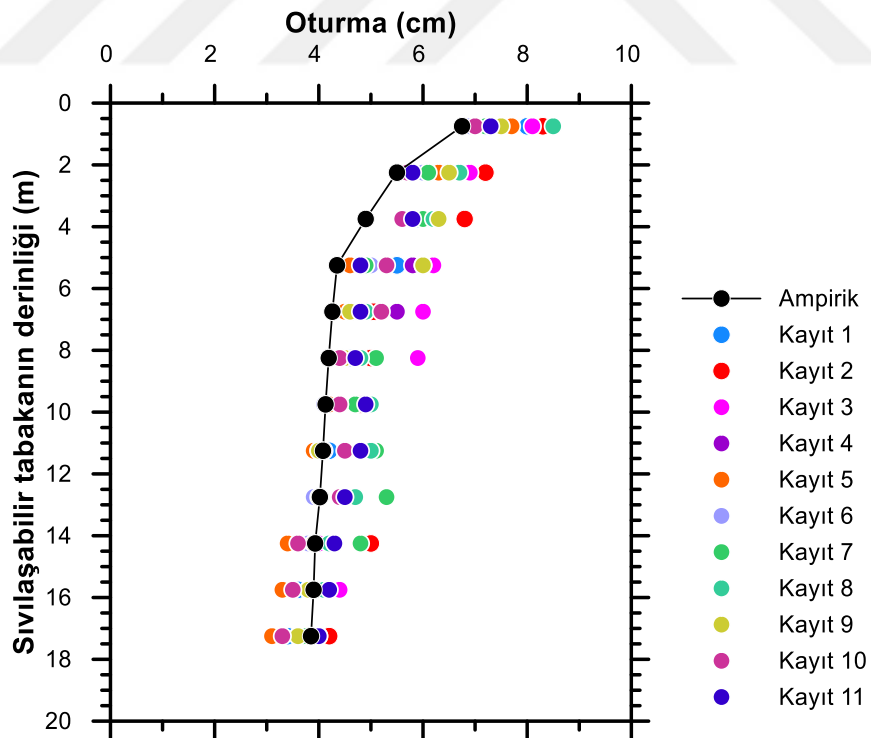


Şekil 4.27. PLAXIS'te Senaryo 4 için oluşturulan yanal yer değiştirme ve oturma- zaman grafiği- a.) kayıt 1, b.) kayıt 2 k.) kayıt 11

Şekil 4.28, 11 farklı deprem zemin hareketinden elde edilen sonuçlara dayanarak, sıvılaşabilir tabakanın derinliği arttıkça yanal yer değiştirmedeki değişimi göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 4.29, aynı sismik yükleme koşulları altında düşey yer değiştirme (oturma) için karşılık gelen eğilimi sunar. Her iki şekilde de dikkat çeken bir gözlem, sıvılaşabilir tabakanın derinleşmesiyle hem yanal hem de düşey yer değiştirmelerin kademeli olarak azalmasıdır. Bu eğilim, yüzey deformasyonu üzerinde sıvılaşabilir tabaka derinliğinin önemli etkisini vurgular. Bu gözlem, tüm deprem senaryolarında tutarlıdır ve deprem riski yüksek bölgelerde jeoteknik tasarım için sıvılaşabilir tabaka derinliğinin kritik önemini ortaya koyar. Bu durumun nedenleri şu şekilde açıklanabilir:



Şekil 4.28. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla yanal yer değiştirme

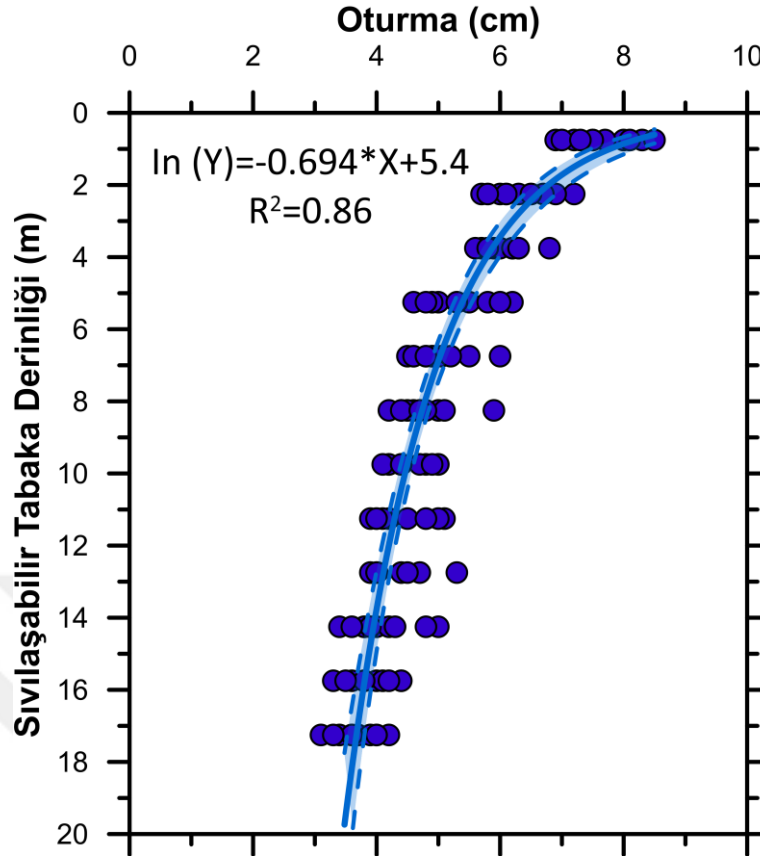


Şekil 4.29. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla zemin oturması

1. Derin zemin katmanları, üstteki malzemenin ağırlığı nedeniyle daha yüksek çevre gerilmesi yaşar. Bu basınç, boşluk suyu basıncı yüksek olsa bile sıvılaşmış zeminin deformasyonunu kısıtlar. Artan sıkışıklık, kesme deformasyonlarını ve yanal yayılmayı sınırlayarak yüzey yer değiştirmesini azaltır. Buna karşılık, sıkı sıvılaşmada düşük çevre gerilmesi daha belirgin deformasyona izin verir.
2. Kalın bir sıvılaşmamış örtü tabakası, sıvılaşmış bölge üzerinde rijit bir kiriş veya köprü gibi davranır. Sıvılaşma yüzeye yakın gerçekleştiğinde, kumdaki hacimsel deformasyonlar ve kesme akışı üstteki zemini doğrudan etkileyerek büyük oturma ve yanal yayılma yaratır. Ancak aynı sertlik ve mukavemet kaybı derinlerde meydana gelirse, üstteki zemin yükü elastik olarak ileterek derin deformasyonu yüzeyden ayırır.
3. Derin sıvılaşma, geniş bir alanda sıvılaşmış tabakanın sıkışması nedeniyle daha homojen oturmaya yol açar. Sıkı sıvılaşma ise yüzey tabakasının düzensiz şekilde mukavemet kaybetmesiyle farklı oturmalara ve belirgin düzensizliklere neden olur.
4. Zemin profili derinleştikçe, Döngüsel Gerilme Oranı (CSR) değeri, Döngüsel Direnç Oranı (CRR) ile kıyaslandığında azalma eğilimi gösterir ve bu durum, sıvılaşma potansiyelinin önemli ölçüde düşmesine, hatta sıvılaşmanın meydana gelmemesine neden olur.

Senaryo 1'de yanal yer değiştirme nispeten daha yüksektir çünkü sıvılaşma en üst katmanda meydana gelmiştir. Bu durumda, en üst katman neredeyse yüzer hale gelerek aşırı yanal yer değiştirme oluşturur. Bazı durumlarda, sıvılaşma derinliği arttıkça yer değiştirmenin önce arttığı, ardından derinlik artışıyla azalmaya başladığı gözlemlenebilir. Bunun nedeni, yüzeye yakın alt katmanlarda üst katmanlara kıyasla daha yüksek sıvılaşma derecesi olması ve kumun daha iyi sıkışarak daha fazla yer değiştirme üretmesidir.

Yer değiştirme büyüklüğü, sismik yüklemenin özelliklerine de bağlıdır. Senaryo 1'de, farklı sismik yüklemeler için yanal yer değiştirme değerleri 75 cm- 130 cm arasında değişmektedir. Sıkı derinlikte sıvılaşma gerçekleştiğinde varyasyon aralığı geniş olsa da sıvılaşma derinliği arttıkça yer değiştirme değerleri birbirine yakınsar. Bu durum, derinlik arttıkça depremin özelliklerinin yer değiştirme üzerindeki etkisinin azaldığını gösterir.

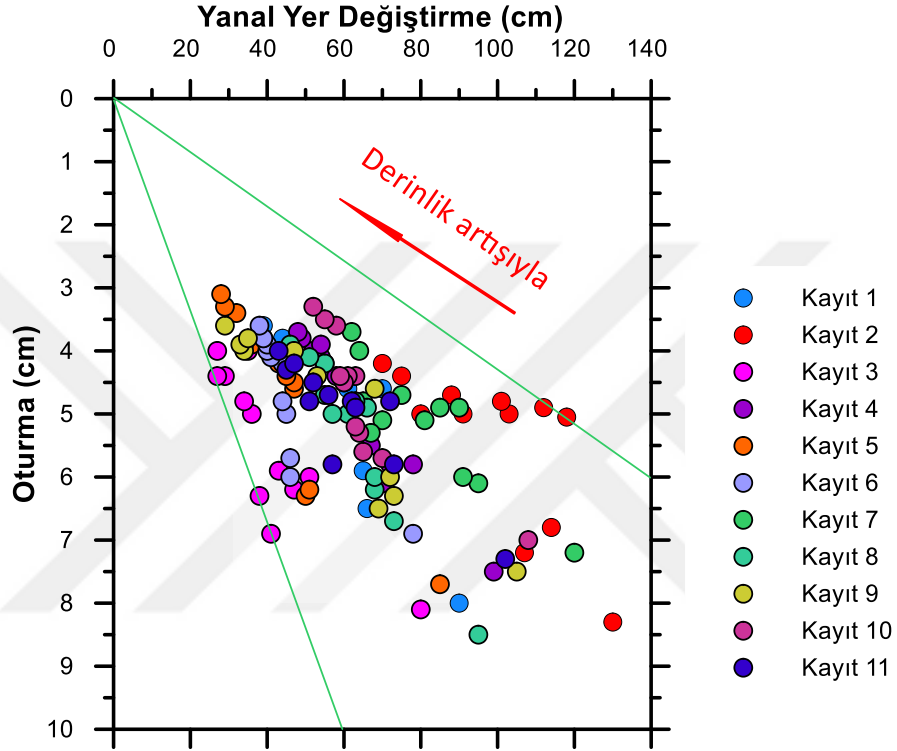


Şekil 4.30. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla zemin oturmasının logaritmik regresyon

Şekil 4.30, zemin oturması ile sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde açıklayan bir logaritmik regresyon denklemi sunmaktadır. Belirleme katsayısı ($R^2 = 0.86$), bu iki değişken arasında çok güçlü bir korelasyon olduğunu gösterir; bu da zemin oturmasındaki değişimin %86'sının sıvılaştırılabilir tabakanın derinliğindeki değişimle açıklanabileceği anlamına gelir. Bu yüksek R^2 değeri, denklemin veri seti boyunca gözlemlenen davranışı güvenilir bir şekilde temsil ettiğini doğrular.

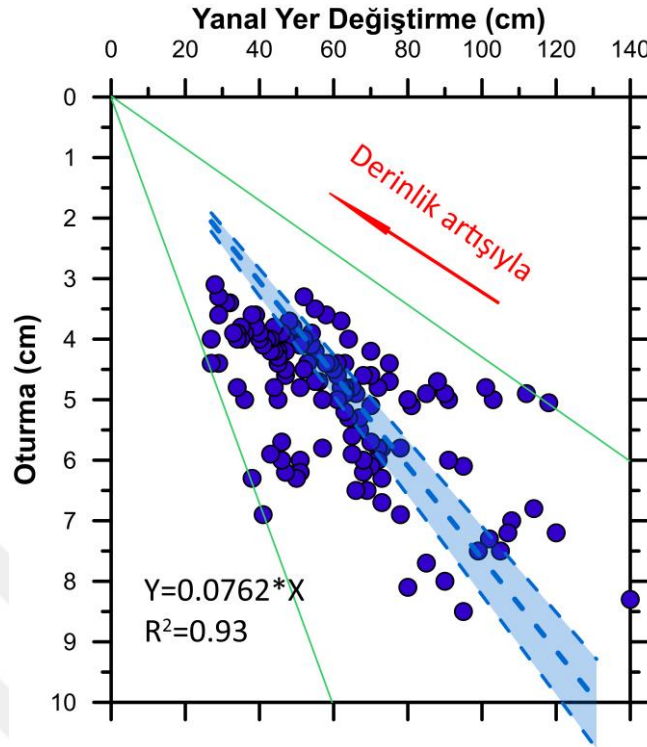
Önemli olarak, bu denklemi geliştirmek için kullanılan veriler, 11 farklı deprem zemin hareketinden (büyüklük, süre ve frekans içeriği çeşitlilik gösteren) elde edilen oturma değerlerinden oluşmaktadır. Bu çeşitlilik, denklemin sağlamlığını artırarak geniş bir sismik koşul yelpazesine uygulanabilir olmasını sağlar. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinleşmesiyle birlikte, logaritmik eğilim, oturma azalma hızının giderek küçüldüğünü gösterir. Bu durum, fiziksel anlayışla uyumludur: Derin sıvılaşma, üstteki zemin katmanlarının deformasyonu emmesi ve yayması nedeniyle genellikle yüzeyde daha az etki ile sonuçlanır.

Bu nedenle, bu denklem yalnızca istatistiksel bir uyum sağlamakla kalmaz, aynı zamanda pratik bir tahmin aracı olarak da hizmet eder. Deprem senaryolarında farklı sıvılaşabilir tabaka derinlikleri için beklenen oturmayı tahmin etmek için kullanılabilir. Bu, sismik bölgelerde ön jeoteknik değerlendirme ve zemin iyileştirme stratejileri tasarlamak için son derece değerlidir.



Şekil 4.31. Sıvılaşabilir tabakanın derinliği artışıyla yanal yer değiştirme ile zemin oturması arasındaki ilişki

Şekil 4.31, sıvılaşabilir tabakanın derinliğinin artmasıyla yatay ve dikey yer değiştirmeler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yüzeye yakın sıvılaşma meydana geldiğinde, yer değiştirme değerleri oldukça dağınıktır; bu durum, değişken deprem özelliklerinin ve sıkı zemin katmanlarının karmaşık tepkisinin etkisini yansıtır. Ancak, sıvılaşabilir tabakanın derinliği arttıkça, verilerde daha tutarlı ve birleşen bir eğilim ortaya çıkar. Bu birleşme hem yatay hem de dikey yer değiştirmelerin daha derinlerde daha öngörülebilir hale geldiğini gösterir. Şekil ayrıca, bu iki tür yer değiştirmenin birbiriyle ilişkili olduğunu ve sıvılaşabilir tabakanın derinleşmesiyle her ikisinin de kademeli olarak azaldığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, yer değiştirmeler sifıra yaklaşma eğiliminde, bu da derin sıvılaşmanın yüzey hareketi üzerindeki etkisinin azaldığını vurgular.



Şekil 4.32. Sıvılaştırılabilir tabakanın derinliği artışıyla yanal yer değiştirme ile zemin oturması arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon

Şekil 4.32, yatay ve dikey yer değiştirmeler arasındaki ilişkiyi, verileri bir doğrusal regresyon modeline uydurarak daha detaylı incelemektedir. Elde edilen denklem, belirleme katsayısı ($R^2 = 0.93$) ile desteklenen güçlü bir korelasyon ortaya koyar; bu, dikey yer değiştirmedeki değişimin %93'ünün yatay yer değiştirmedeki değişimle açıklanabileceği anlamına gelir. Bu güçlü doğrusal ilişki, modelin farklı koşullar altında gözlemlenen verileri güvenilir ve doğru bir şekilde temsil ettiğini gösterir.

Regresyon denklemi ayrıca, iki yer değiştirme türü arasında tutarlı bir oran olduğunu ortaya çıkarır: dikey yer değiştirme, sıvılaşma derinliğinden bağımsız olarak, yatay yer değiştirmenin yaklaşık %7-8'i kadardır. Bu tutarlılık, 11 farklı deprem hareketinden (her biri kendine özgü özelliklere sahip) elde edilen sonuçları içeren veri seti boyunca geçerlidir. Sonuç olarak, bu denklem, geniş bir sismik yükleme yelpazesinde bile yalnızca bilinen yatay yer değiştirme değerlerine dayanarak dikey oturmayı tahmin etmeye olanak tanıyan önemli bir tahmin değerine sahiptir.

Dahası, bu ilişki özellikle pratikte değerli olabilir. Örneğin, yatay yer değiştirme DEEPSOIL gibi (PLAXIS gibi gelişmiş 2-D yöntemlere kıyasla hesaplama açısından daha verimli ve hızlı olan) 1-D sıvılaşma analiz araçlarıyla tahmin edilirse, dikey oturma doğrusal denklem kullanılarak hızla hesaplanabilir. Bu yaklaşım, geniş ölçekli saha değerlendirmelerinde veya hızlı karar almanın gerekli olduğu kaynak kısıtlı ortamlarda ön değerlendirmeler için zaman ve kaynak tasarrufu sağlayan bir çözüm sunar.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sıvılaşma kaynaklı zemin yer değiştirmesini etkileyen çok sayıda faktör bulunmakta olup, bunlar arasında sıvılaşabilir tabakanın derinliği kritik bir parametre olarak kabul edilir. Bu bağlamda, sıvılaşabilir tabaka derinliğinin değişiminin hem yanıl yayılma hem de düşey oturma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yalnızca ampirik ilişkilere dayanmak yerine, PLAXIS 2D kullanılarak ileri sayısal simülasyonlar uygulanmış ve güncel araştırma bulguları entegre edilerek sonuçlar klasik yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Sismik davranışın kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi için, Türk Deprem Yönetmeliği ile uyumlu olarak seçilen on bir farklı deprem zemin hareketi kaydı, sıvılaşabilir tabakanın konumunun sistematik olarak değiştirildiği on iki senaryoda uygulanmıştır.

Bu çalışma, çeşitli sismik olaylar sırasında sıvılaşabilir tabaka derinliğinin, zemin yer değiştirmesinin büyüklüğü ve dağılımı üzerindeki önemli rolünü ortaya koymaktadır. Sıvılaşmanın zeminde yer değiştirme şeklinde tezahürü, sıvılaşma tabakasının derinliği arttıkça kademeli olarak azalma eğilimi gösterir. Bu, sıvılaşma gerçekleşse bile belirli bir derinlikten sonra etkinin önemsiz hale geldiği ve ihmal edilebileceği anlamına gelir. Derinlik arttıkça, üst tabakanın ağırlığından kaynaklanan yüksek çevre gerilmesi, sıvılaşmış zeminin kesme deformasyonlarını ve yanıl yayılmasını kısıtlayarak yüzey yer değiştirmesini azaltır; ayrıca kalın sıvılaşmamış örtü tabakası derindeki yumuşak katmanı elastik bir kiriş gibi sararak deformasyonu yüzeyden izole eder. Derin sıvılaşma geniş alanda homojen oturmaya yol açarken, sıkı sıvılaşma yüzeyde düzensiz mukavemet kaybı ve farklı oturmalar oluşturur. Bunun yanı sıra, derinlik arttıkça döngüsel gerilme oranı (CSR), o katmanın döngüsel direnç oranı (CRR) karşısında azalır; bu da sıvılaşma potansiyelini ve dolayısıyla yer değiştirmeyi önemli ölçüde düşürür.

Ancak çalışma, sıvılaşabilir tabakanın sertliği ve kalınlığının, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu ve yer değiştirme üzerinde daha kritik bir role sahip olduğunu da vurgular. Daha kalın sıvılaşabilir tabakalar, kumun daha fazla sıkılaşmasına ve zeminde daha fazla oturmaya yol açar. Düşük SPT-N değerlerine sahip kum tabakaları, sıvılaşmaya daha yatkındır ve daha büyük zemin yer değiştirmelerine neden olabilir.

Ayrıca ampirik oturma sonuçları, sıvılaşma derinliğindeki artışa rağmen yaklaşık sabit bir değer gösterirken, PLAXIS sonuçları, sıvılaşma derinliği arttıkça oturmanın azaldığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, PLAXIS sonuçları ampirik hesaplamalara kıyasla daha güvenilirdir. Ayrıca, yanal yer değiştirme ile zemin oturması arasında iyi bir korelasyon bulunmuştur. Her ikisi de sıvılaşma derinliği arttıkça ihmal edilebilir seviyelere ulaşmaktadır.

Bu çalışmanın ikinci önemli bulgusu, sıvılaşmaya eğilimli zeminlerde yatay yer değiştirme ile düşey oturma arasında güçlü ve pratik bir korelasyonun tespit edilmesidir. Bu ilişki, özellikle sıvılaşabilir kum tabakasının derinliği ve konumu odaklanarak, çeşitli koşullar altında PLAXIS 2D simülasyonlarının sistematik analiziyle elde edilmiştir. Simülasyonlar boyunca, düşey oturmanın büyüklüğünün, gözlemlenen yatay yer değiştirmelere dayanarak güvenilir şekilde tahmin edilebileceği tutarlı bir örüntü ortaya çıkmıştır.

Bu korelasyon, sıvılaşma kaynaklı zemin deformasyonunun tahminini basitleştirmede önemli bir ilerleme sunar. Geleneksel olarak hem yatay hem de düşey yer değiştirmelerin doğru hesaplanması için PLAXIS 2D gibi ileri araçlarla detaylı sonlu eleman simülasyonları gereklidir. Ancak bu tür simülasyonlar, özellikle karmaşık stratigrafik profiller ve dinamik deprem yükleme koşulları modellemesinde, analiz başına üç ila dört saat süren hesaplama yoğunluğuna sahiptir.

Buna karşılık, bu çalışma, DEEPSOIL gibi daha basit dinamik analiz araçlarıyla hızlı ve kolayca elde edilebilen yatay yer değiştirmelerin, oturma tahmini için bir temel olarak kullanılabileceğini göstermektedir. DEEPSOIL ve benzeri 1-D analiz programları, simülasyonları birkaç dakika içinde tamamlayarak hesaplama süresinde önemli bir azalma sağlar. Yatay yer değiştirmeler bu hızlı yöntemlerle belirlendikten sonra, elde edilen ampirik korelasyon kullanılarak beklenen oturma makul bir doğrulukla tahmin edilebilir.

Bu bulgunun pratik anlamı, tam ölçekli PLAXIS 2D simülasyonlarına kıyasla yaklaşık 80 ila 90 kat verimlilik artışıdır. Bu artış, yalnızca mühendislik uygulamalarında analiz hızını artırmakla kalmaz, aynı zamanda hızlı ön değerlendirmeler ve geniş ölçekli parametrik çalışmalar yapılmasını kolaylaştırır. Mühendisler ve araştırmacılar, artık sismik

yükleme altında zemin davranışını kapsamlı şekilde değerlendirebilirken, zemin deformasyon modellerini tahmin etmede kabul edilebilir güvenilirlik ve hassasiyet seviyelerini koruyarak hesaplama çabasını önemli ölçüde azaltabilir.

Özetle, basitleştirilmiş bir yaklaşımla yatay yer değiştirmeden oturmayı tahmin etme yeteneği, bu araştırmanın temel katkısıdır. Bu bulgu, yüksek hassasiyetli sayısal modelleme ile pratik mühendislik uygulamaları arasındaki boşluğu kapatır ve sismik risk değerlendirmesi ile zemin iyileştirme planlaması üzerinde çalışan jeoteknik mühendisler için değerli bir araç sunar.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- AbuSerriya, A. S., & Osman, B. H. (2023). *Correlation of cohesion and friction angle based on SPT-N values: A comprehensive review*. Civil Engineering Beyond Limits, 2, 1821. <https://www.acapublishing.com/journals/1/cebel>
- Baziar, M. H., & Alibolandi, M. (2024). *Assessment of liquefaction potential based on shear wave velocity: Strain energy approach*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 16, 3733-3745. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.10.021>
- Bentley Systems. (2024). *PLAXIS 2D 2024.2: General information manual* [Computer software manual]. <https://www.bentley.com>
- Bentley Systems. (2024). *PLAXIS 2D 2024.2 Scientific manual* [Computer software documentation]. Bentley Systems, Inc. <https://www.bentley.com>
- Bentley Systems, Incorporated. (2024). *PLAXIS 2D 2024.2 Material models manual* [Computer software manual]. Bentley Systems. <https://www.bentley.com>
- Bentley Systems, Incorporated. (2024). *PLAXIS 2D 2024.2 Reference manual* [Computer software manual]. Bentley Systems. <https://www.bentley.com>
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2019). *A constitutive model for clays and plastic silts in plane-strain earthquake engineering applications*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 127, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105832>.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., Ilgac, M., & Chowdhury, K. (2018). *Dataset on SPT-based seismic soil liquefaction*. Data in Brief, 20, 544-548. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.043>
- Daftari, A., & Kudla, W. (2014). *Prediction of soil liquefaction by using UBC3D-PLM model in PLAXIS*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 8(2), 106. Retrieved from <https://scholar.waset.org/1307-6892/9997544>
- Dyka, I. (2012). *Use of the laboratory tests of soil modulus in modelling pile behaviour*. Studia Geotechnica et Mechanica, 34(3). <https://doi.org/10.5277/sgm031204>

KAYNAKLAR DİZİNİ

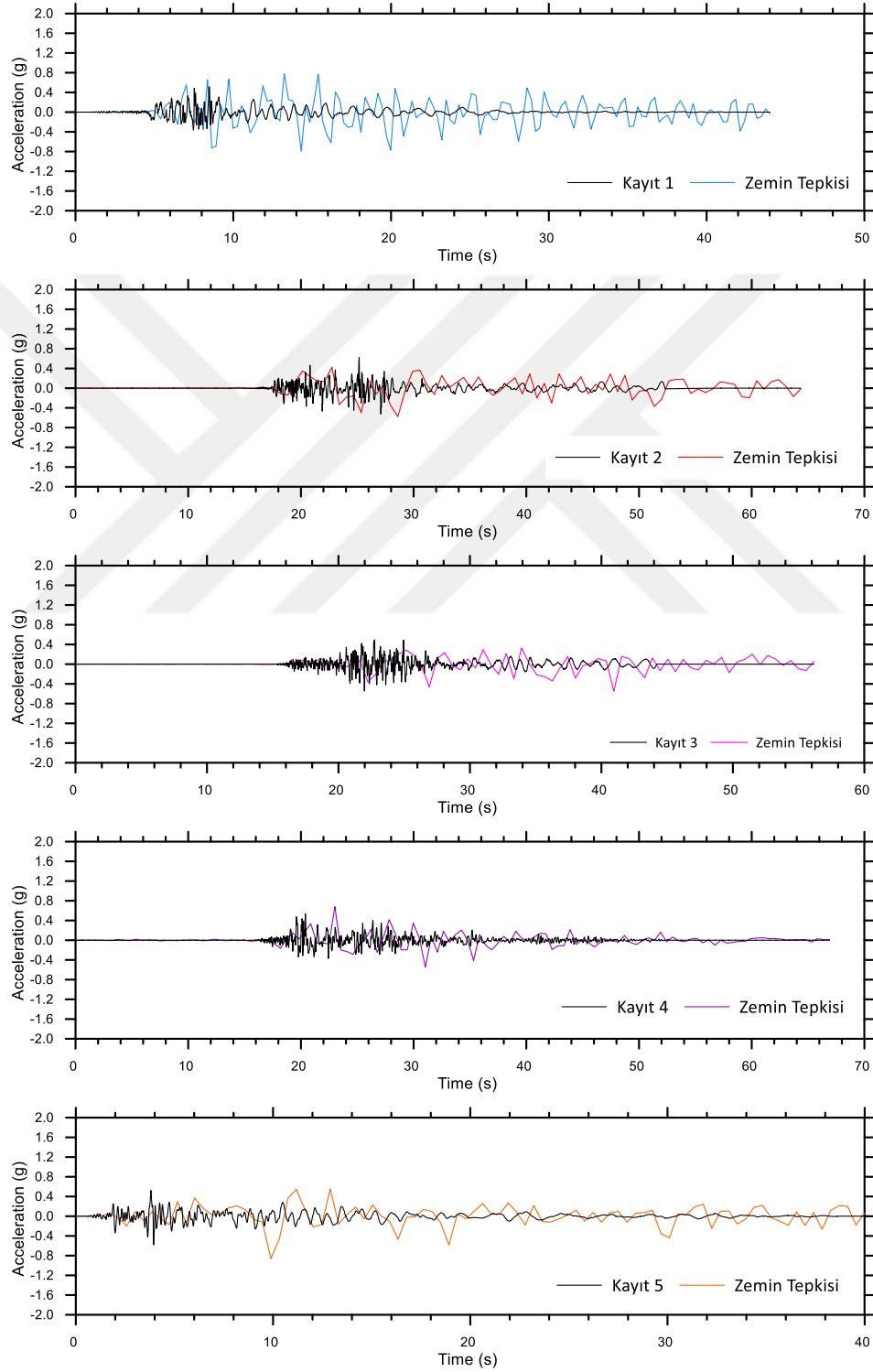
- Güler, E., Savas, H., & Afacan, K. B. (2021). *Effect of permeability on liquefaction potential of silty sands*. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1410. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07822-9>
- Gusman, M., Nazki, A., & Putra, R. R. (2018). *The modelling influence of water content to mechanical parameter of soil in analysis of slope stability*. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*, 1008, Article 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1008/1/012022>
- Hazen, A. (1911). *Discussion of "Dames on sand formation," by A.C. Koenig*. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 73, 199-203.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Kazemi Esfeh, P., & Kaynia, A. M. (2019). *Numerical modeling of liquefaction and its impact on anchor piles for floating offshore structures*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, 105839. <https://doi.org/10.1016/j.solidyn.2019.105839>
- Kramer, S.L.(1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering mechanics.
- Kutter, B. L., Manzari, M. T., & Zeghal, M. (Eds.). (2019). *Model tests and numerical simulations of liquefaction and lateral spreading: LEAP-UCD-2017*. Springer Open. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22818-7>
- Mulyadi, E. D., Lastiasih, Y., & Li, A. J. (2023). *Seismic analysis of liquefaction potential in coastal soils*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2568(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2568/1/012022>
- Nakao, K., Inazumi, S., Takahashi, T., & Nontananandh, S. (2022). *Numerical simulation of the liquefaction phenomenon by MPSM-DEM coupled CAES*. *Sustainability*, 14(12), 7517. <https://doi.org/10.3390/su14127517>
- Rahmani, A., Ghasemi Fare, O., & Pak, A. (2012). *Investigation of the influence of permeability coefficient on the numerical modeling of the liquefaction phenomenon*. *Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering*, 19(2), 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.02.010>

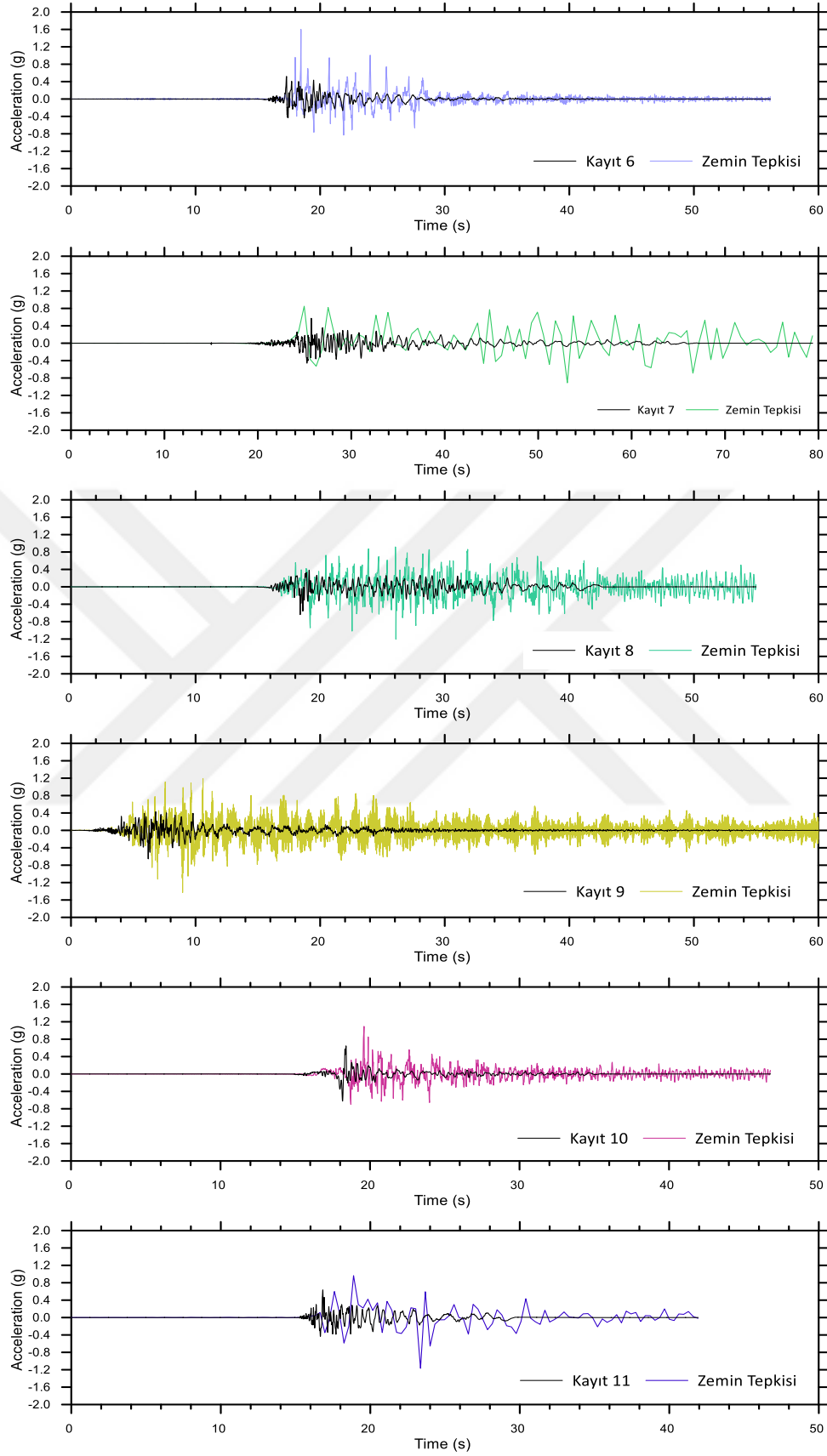
KAYNAKLAR DİZİNİ

- Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd Ed.). John Wiley & Sons
- Tokimatsu, K., & Uchida, A. (1990). *Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity*. Soils and Foundations, 30(2), 33-42.
- Tokimatsu, K., Yamazaki, T., & Yoshimi, Y. (1986). *Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli*. Soils and Foundations, 26(1), 25-35. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.25>
- Upreti, S., Puri, V., Tamang, R. L., & Kolay, P. (2019). *Effect of plasticity on liquefaction of a selected fine-grained soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 145(8), 04019035. <https://www.researchgate.net/publication/333703668>
- Waheed, M. Q., & Asmael, N. M. (2023). *Evaluation of elasticity modulus of clayey soil from undrained shear strength*. E3S Web of Conferences, 427, Article 01028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342701028>
- Zekkos, D., Bray, J., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E., Riemer, M., & Stokoe, K. (2006). *Unit Weight of Municipal Solid Waste*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(10), 1250-1261. doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:10(1250)

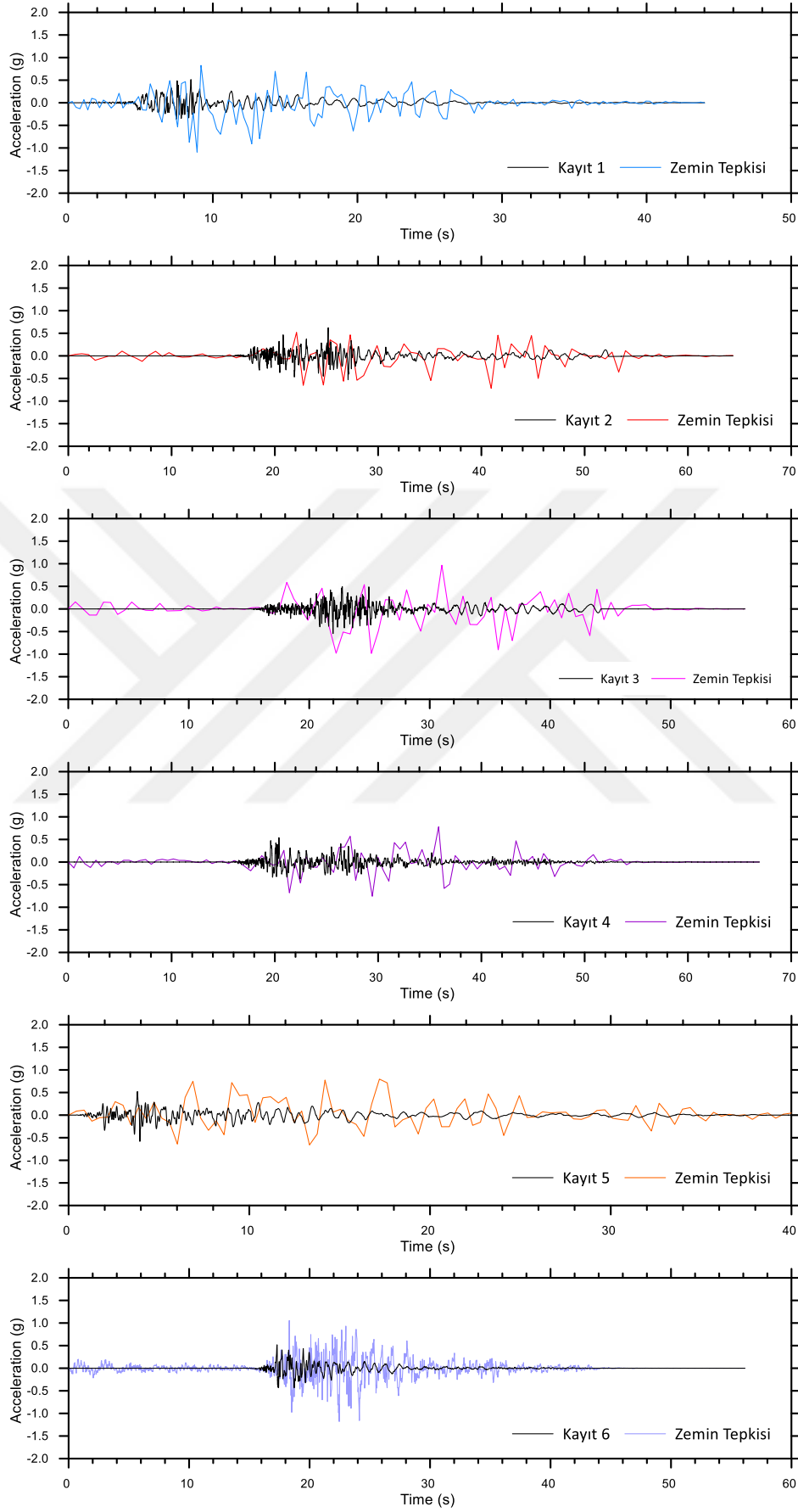
EK AÇIKLAMALAR

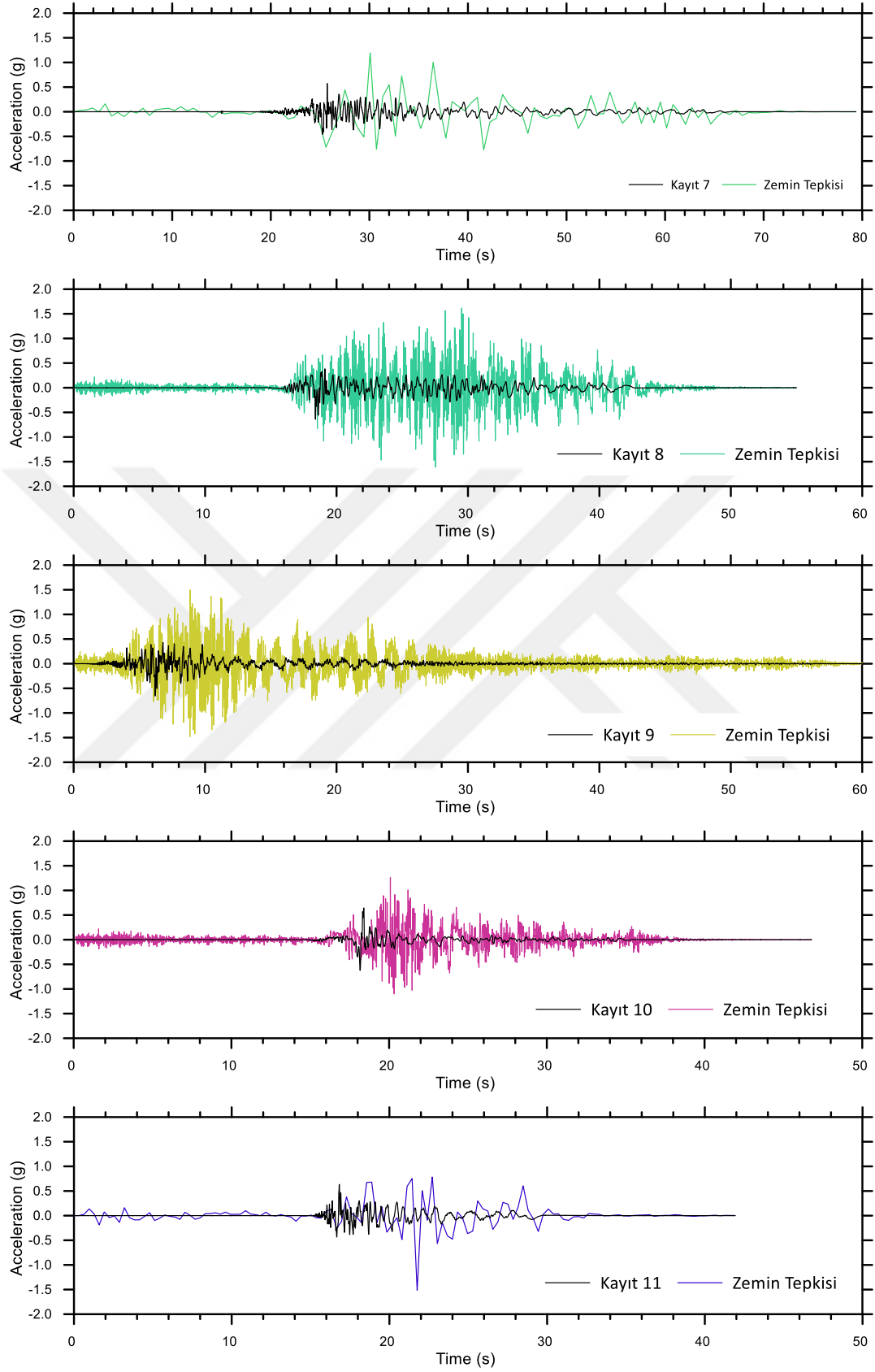
Ek Açıklama-A: Ana Kaya Hareketi ve Zemin Tepkisi



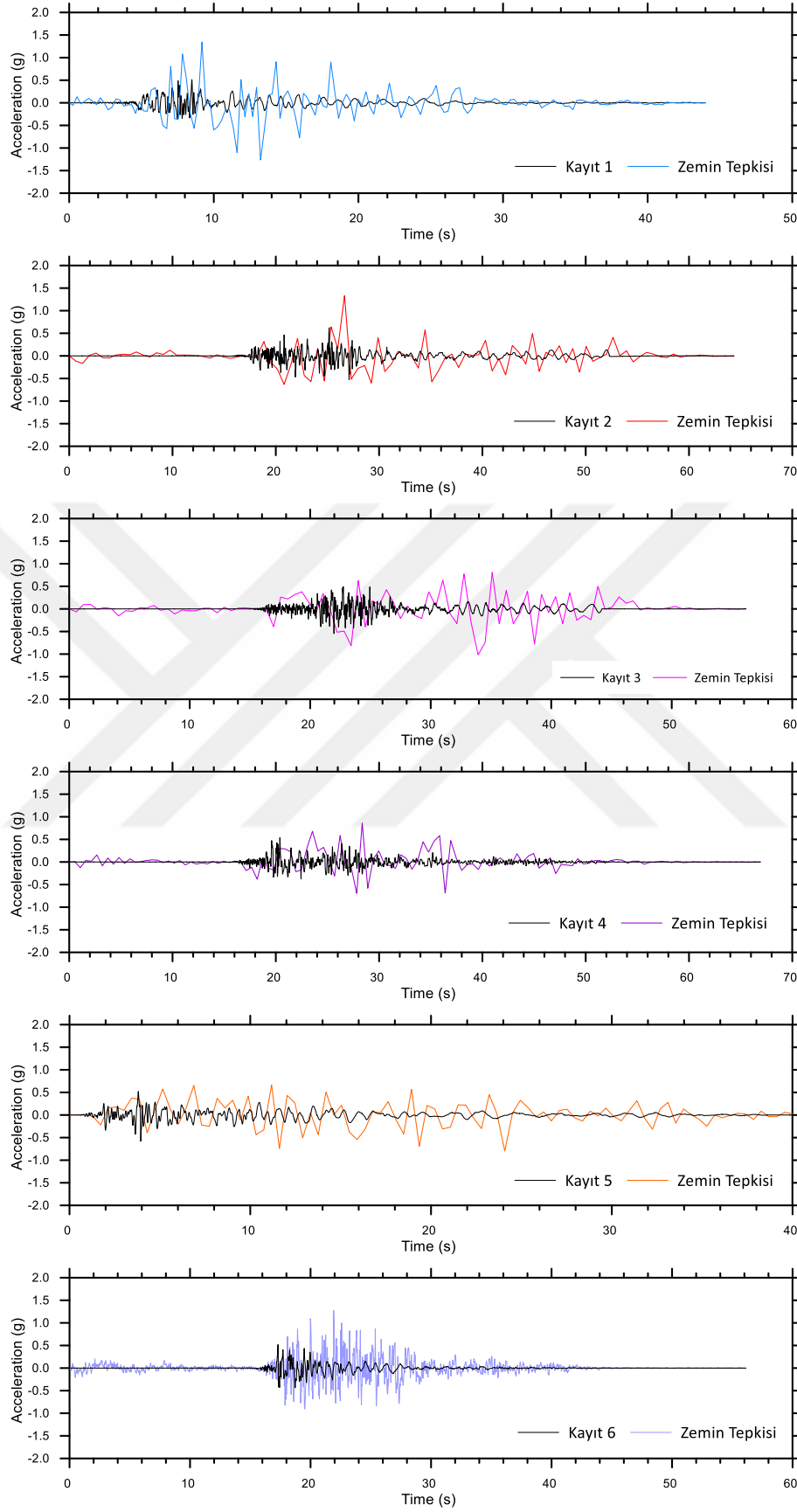


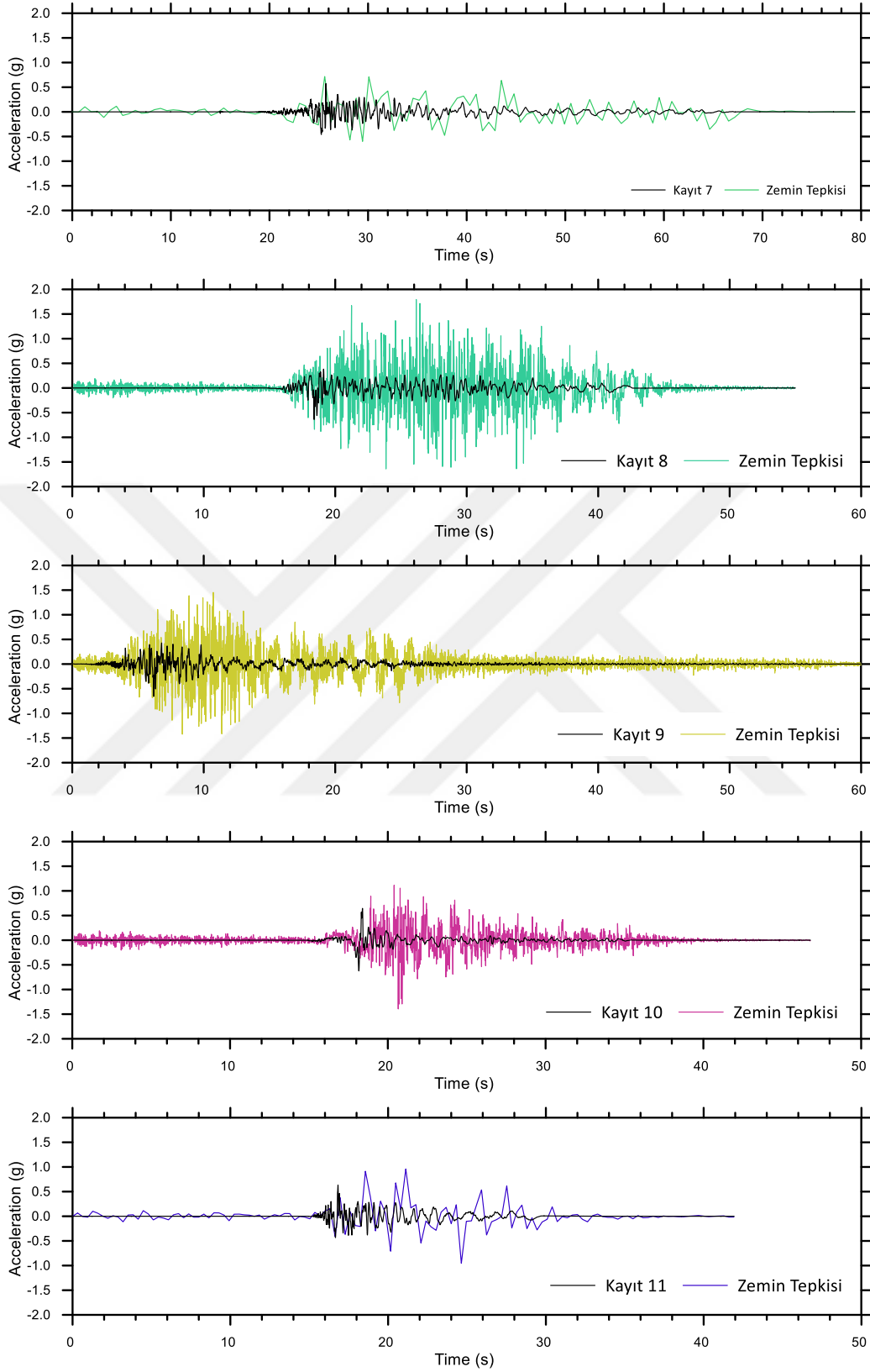
Şekil A.1. Senaryo 1 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



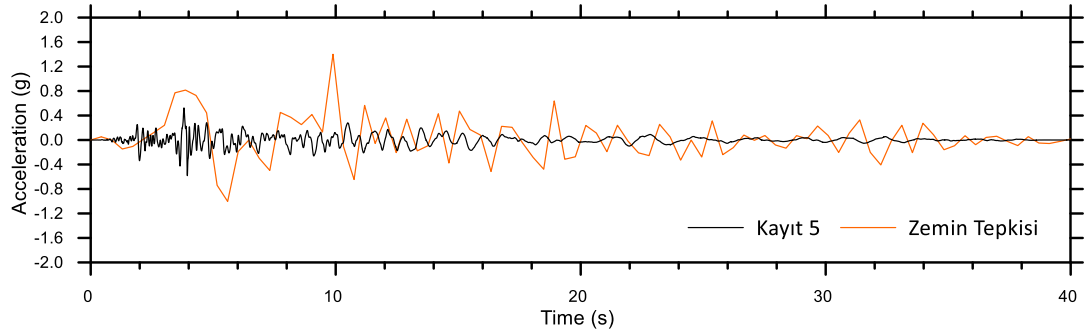
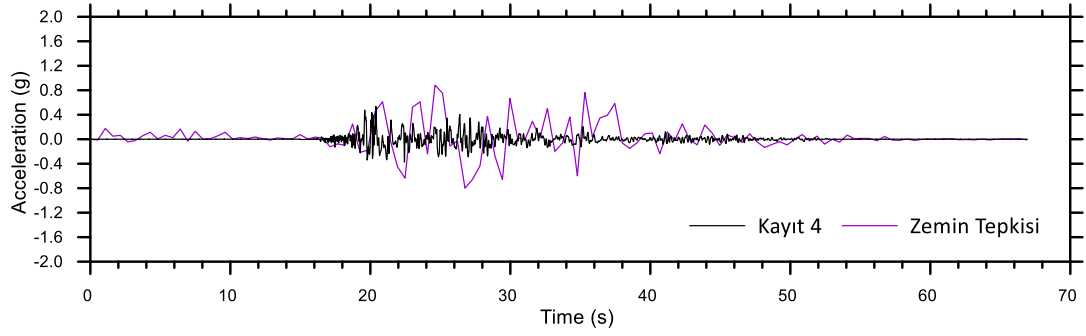
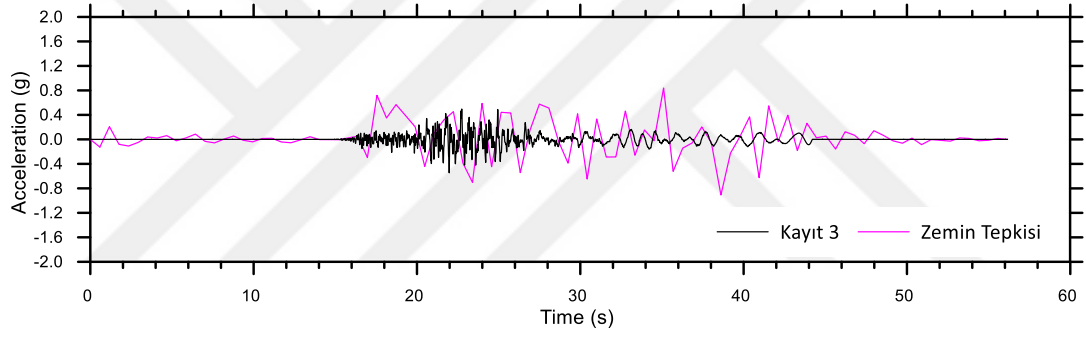
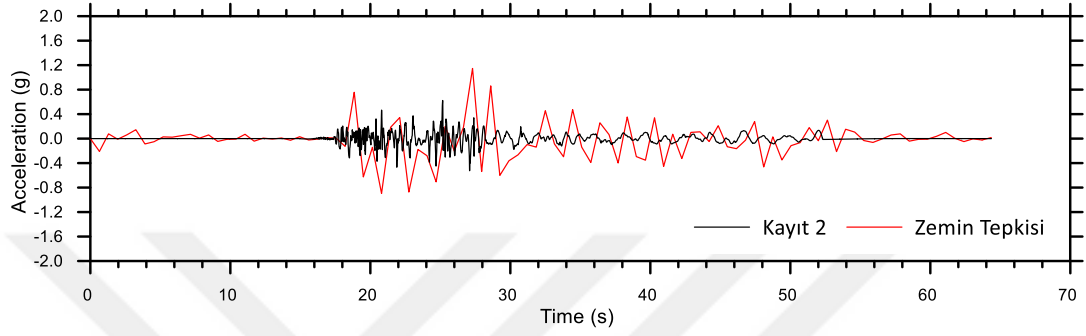
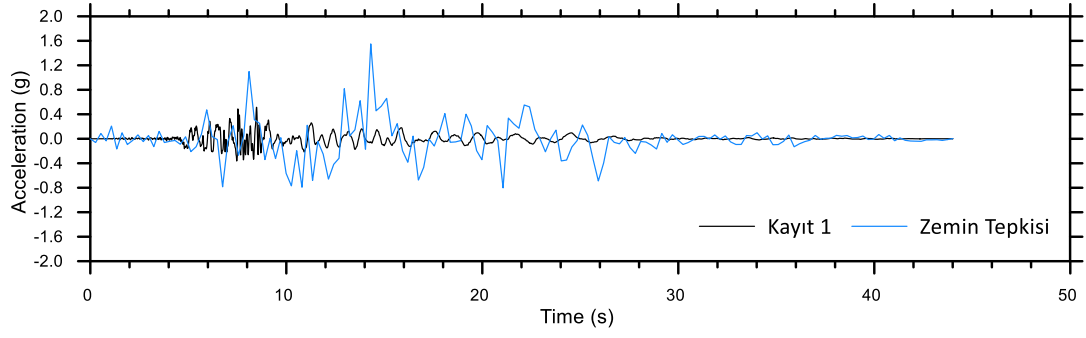


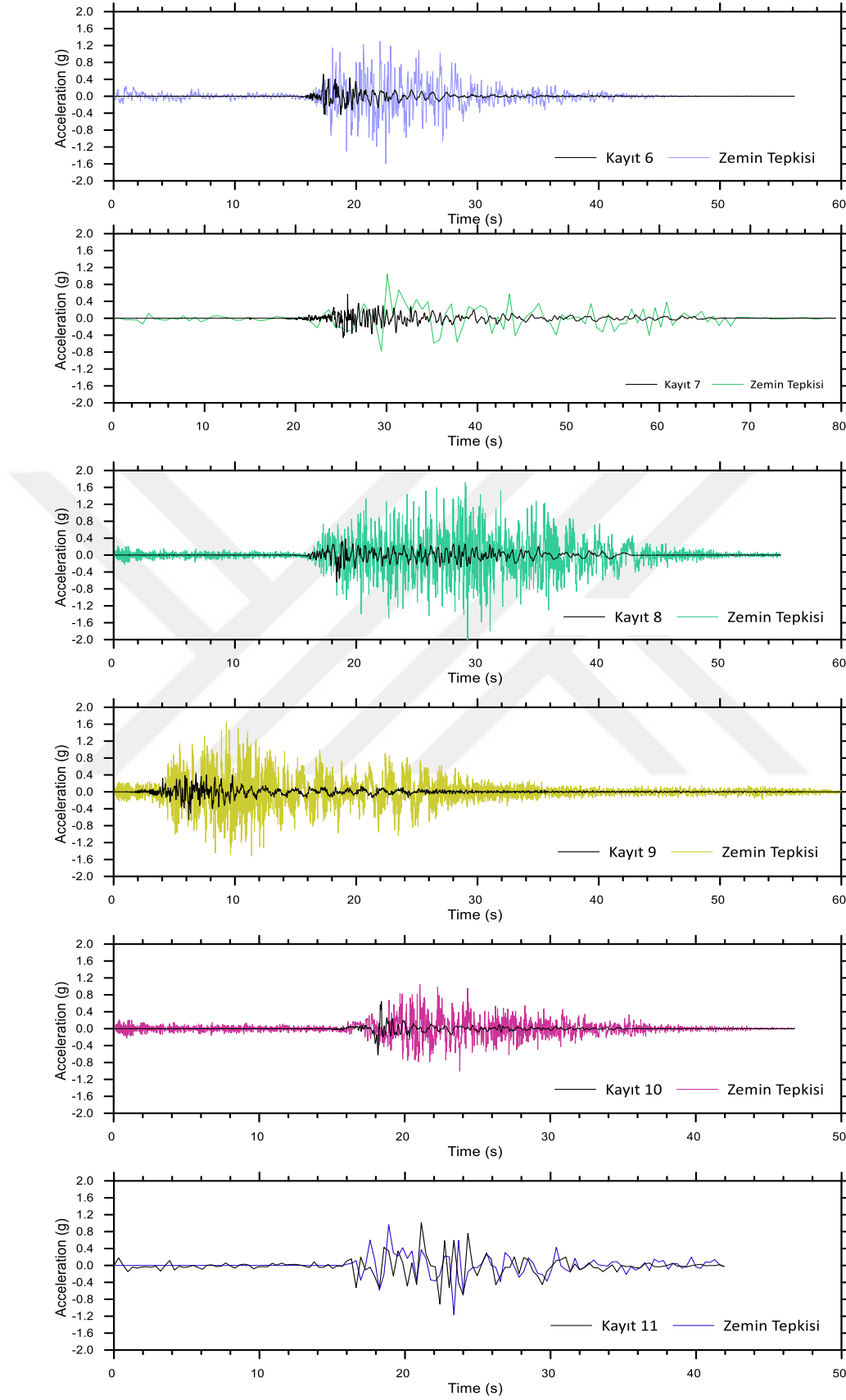
Şekil A.2. Senaryo 2 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



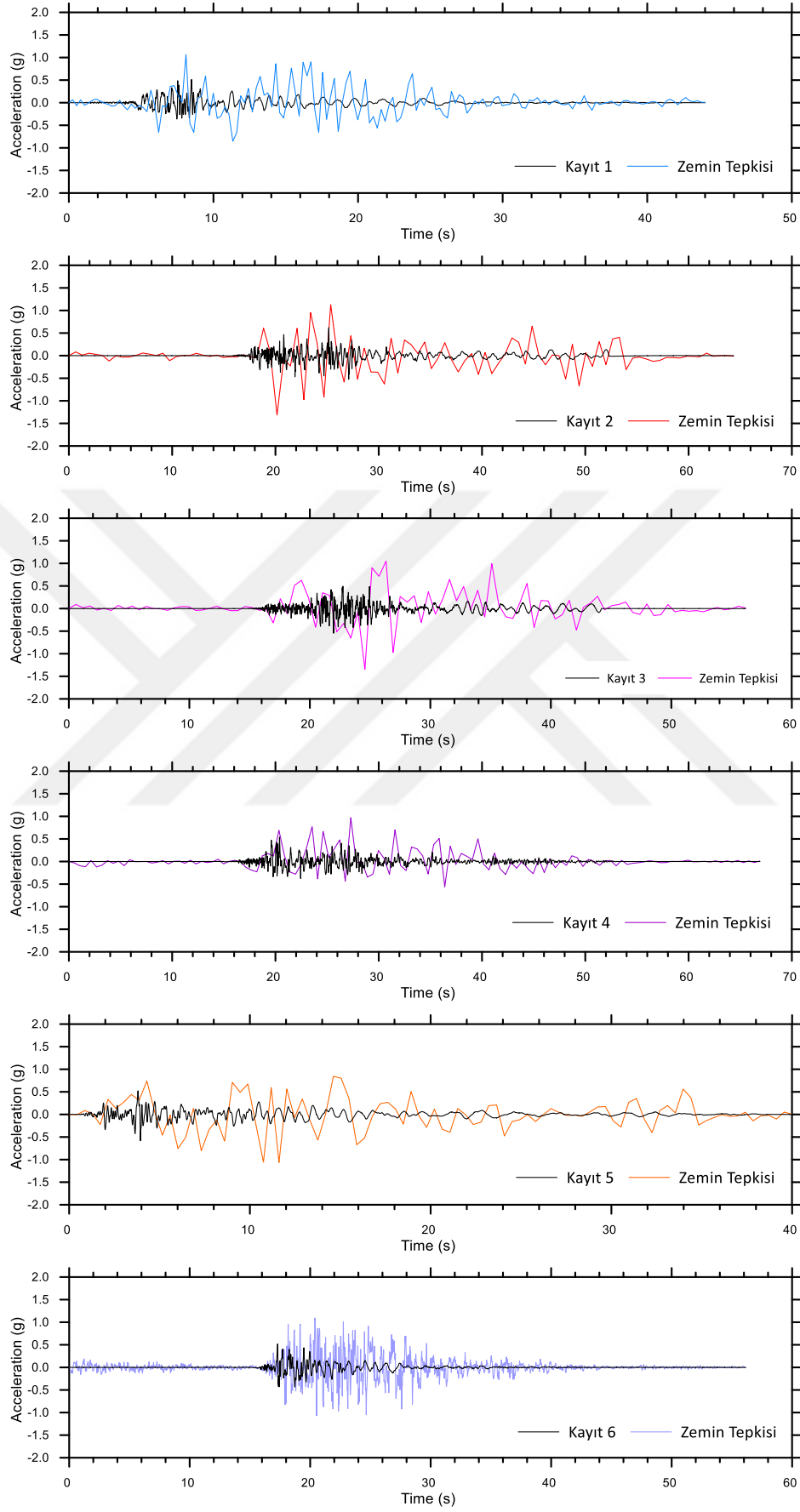


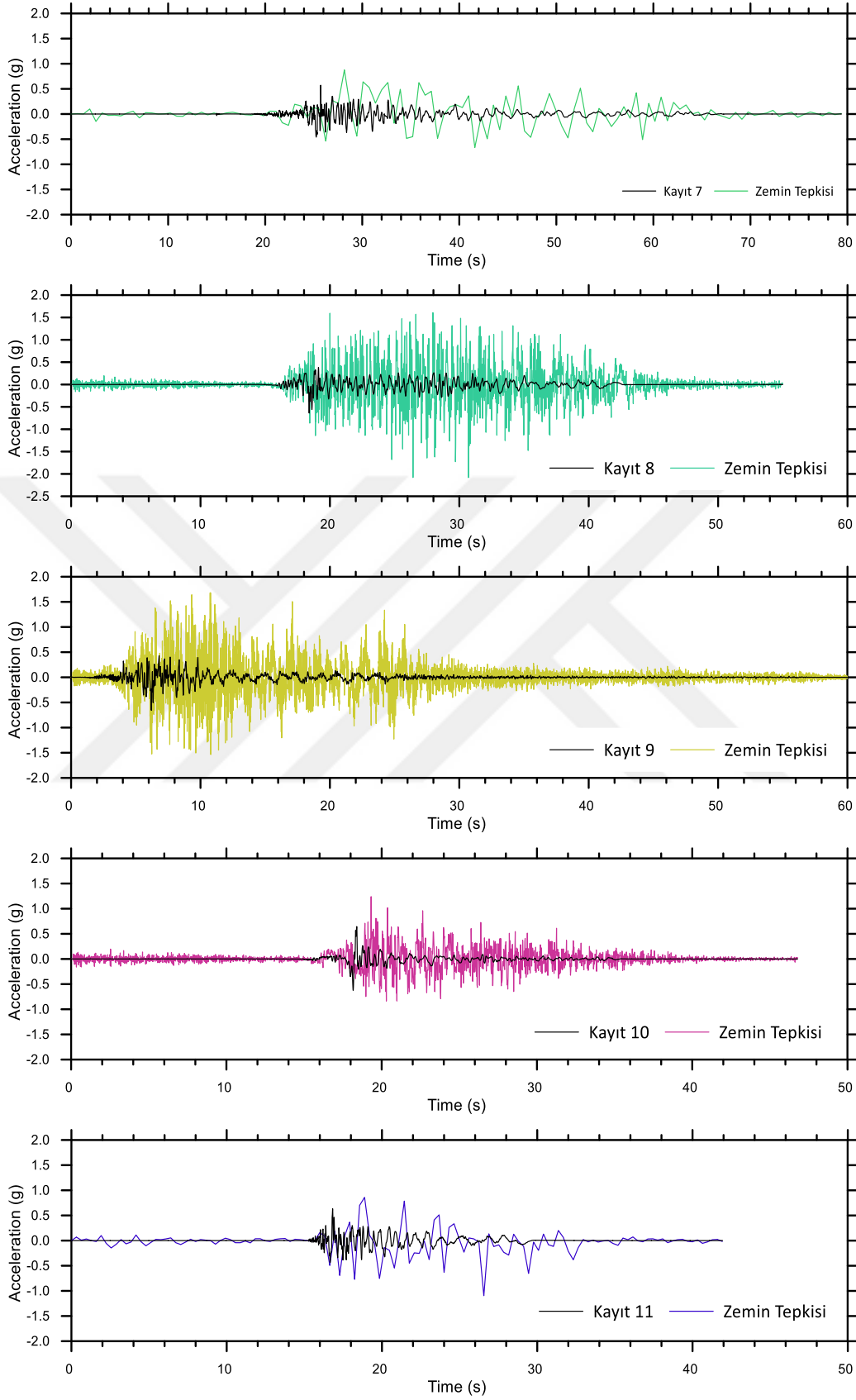
Şekil A.3. Senaryo 3 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



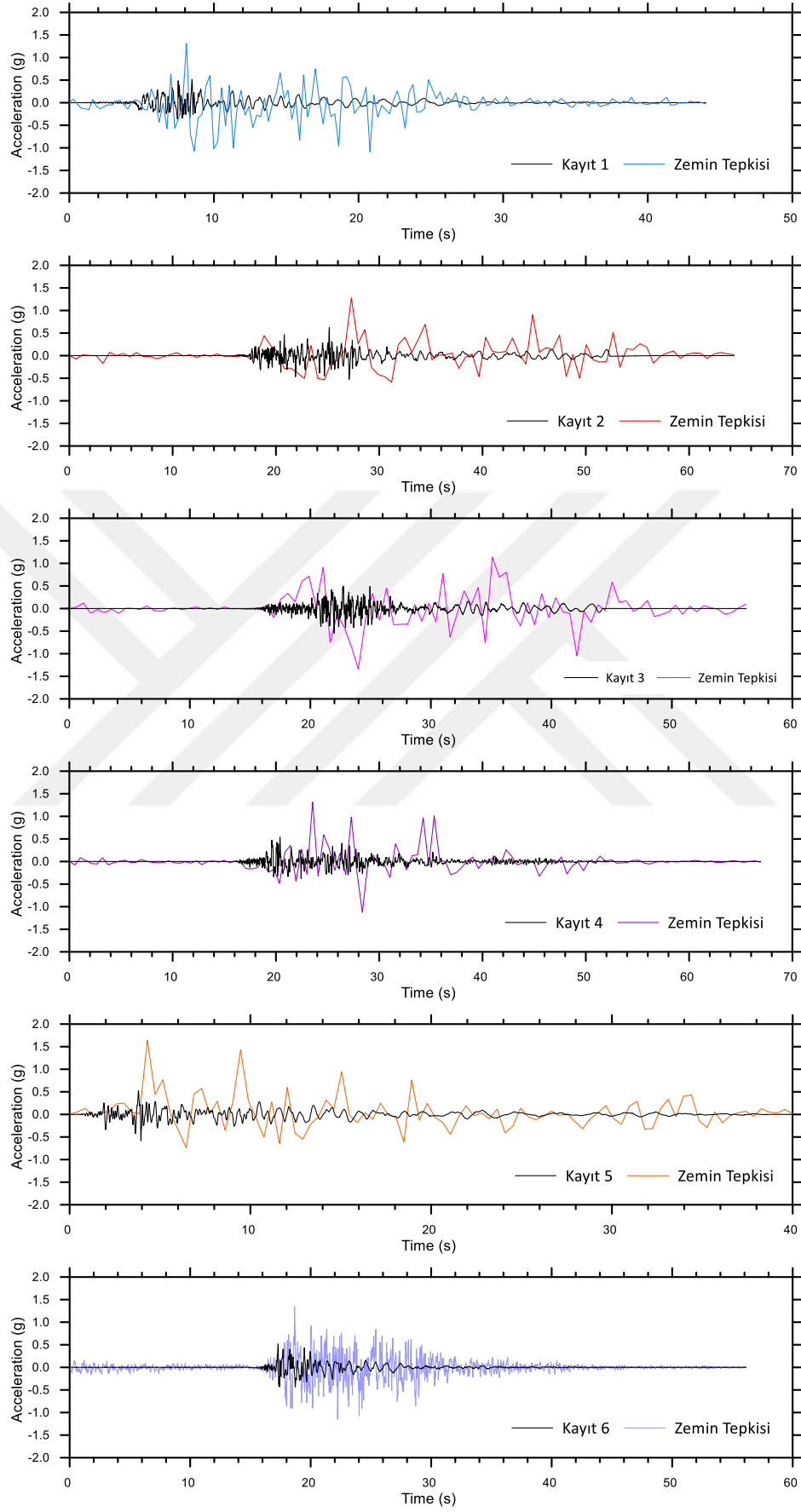


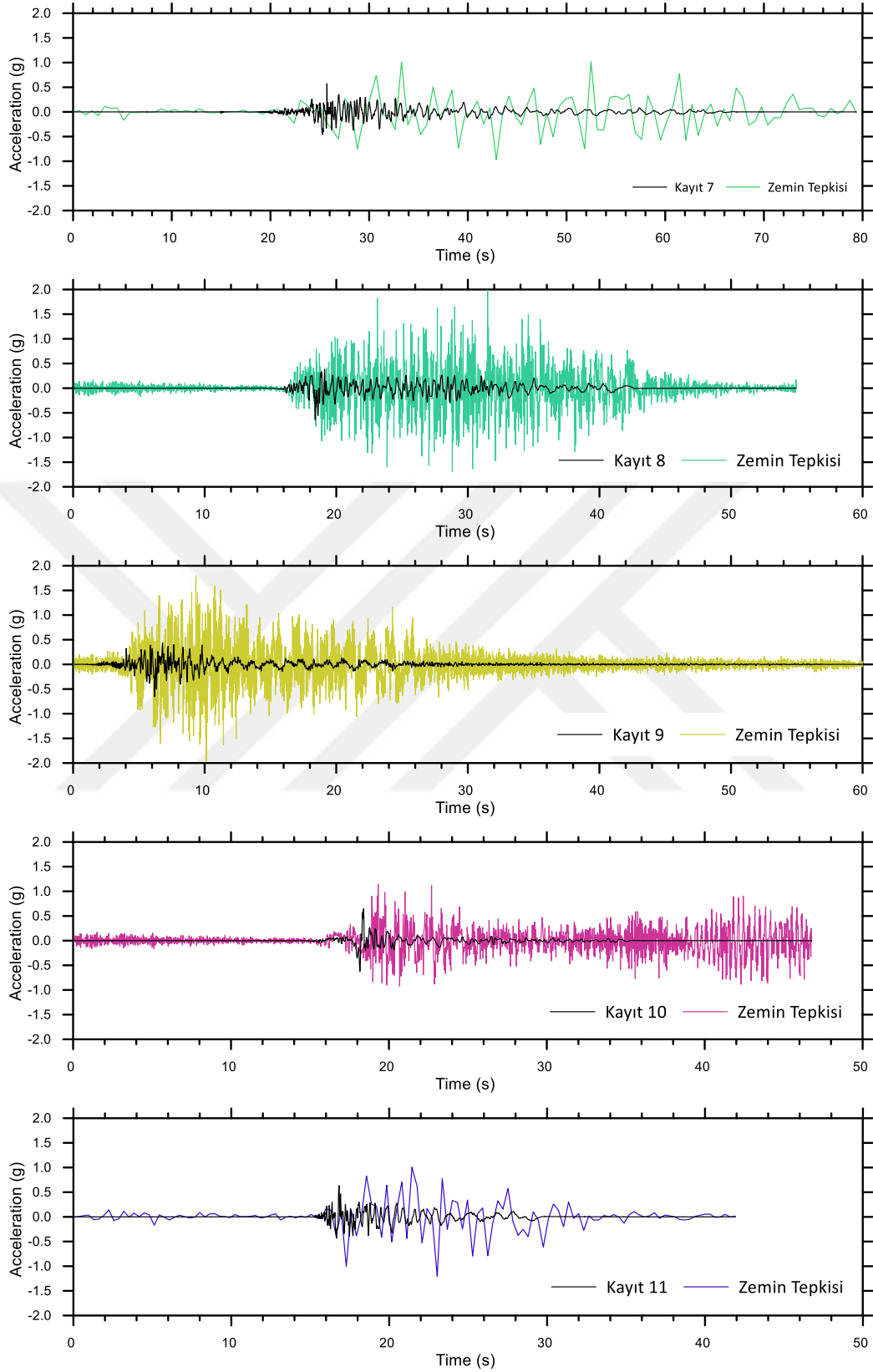
Şekil A.4. Senaryo 4 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



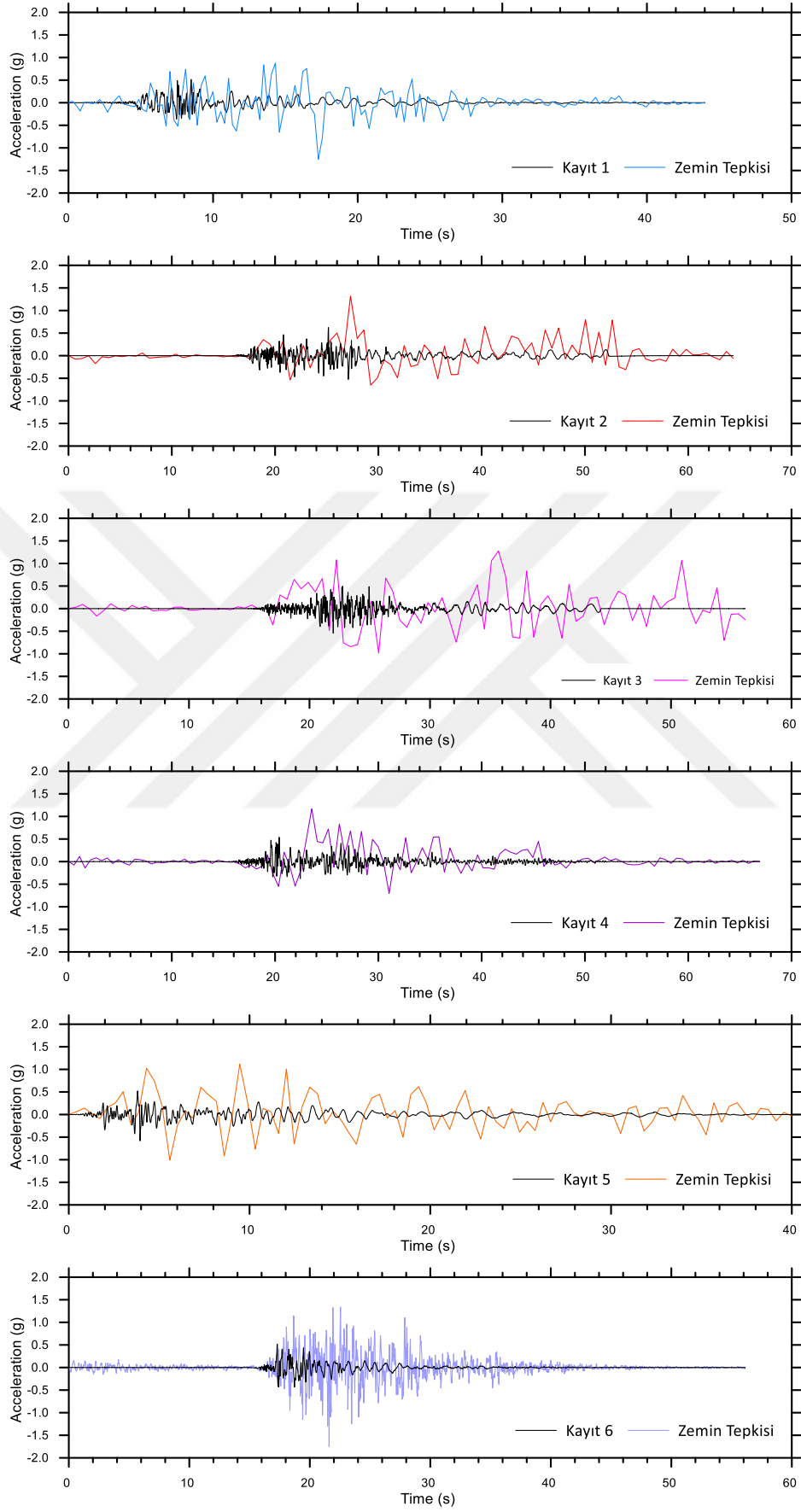


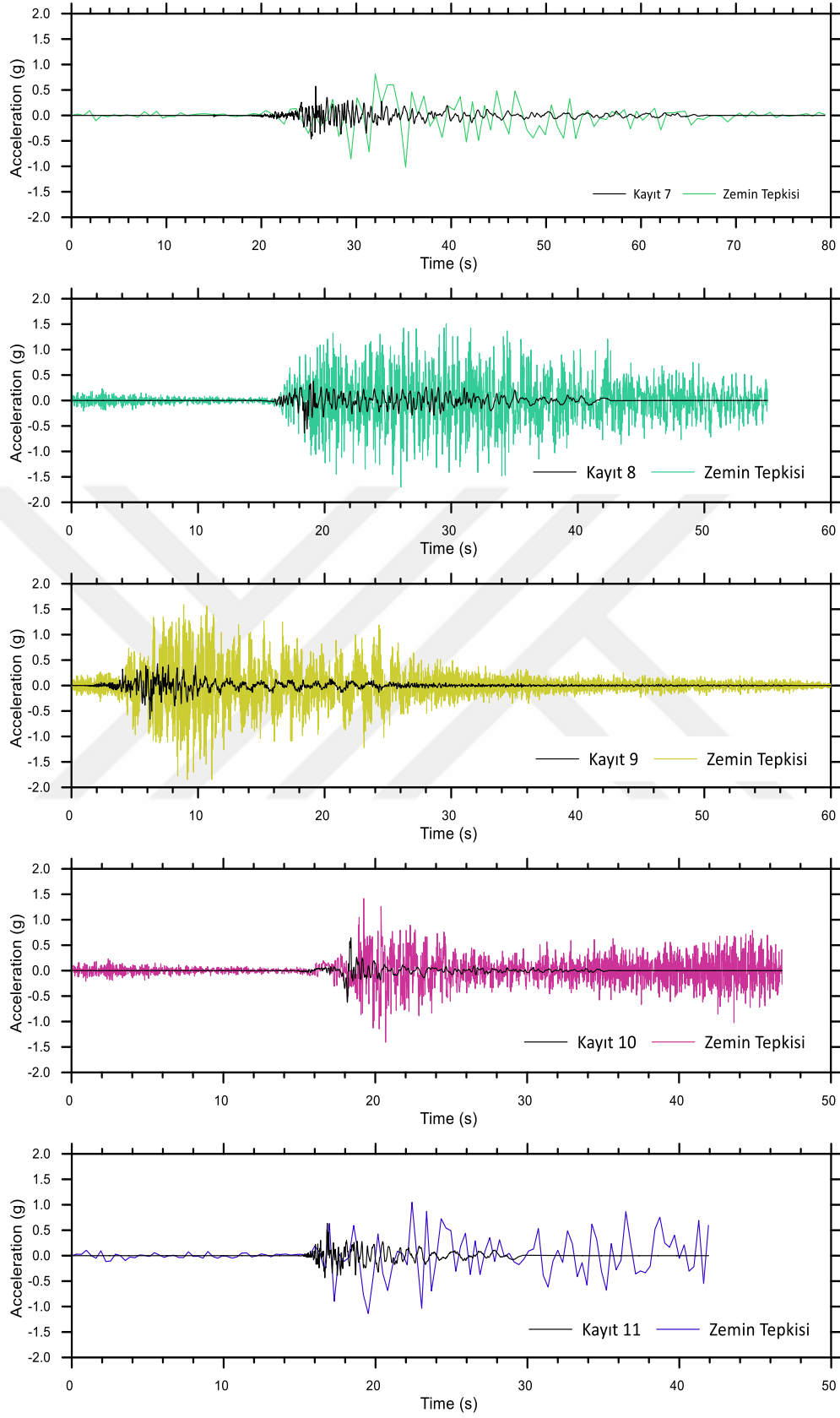
Şekil A.5. Senaryo 5 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



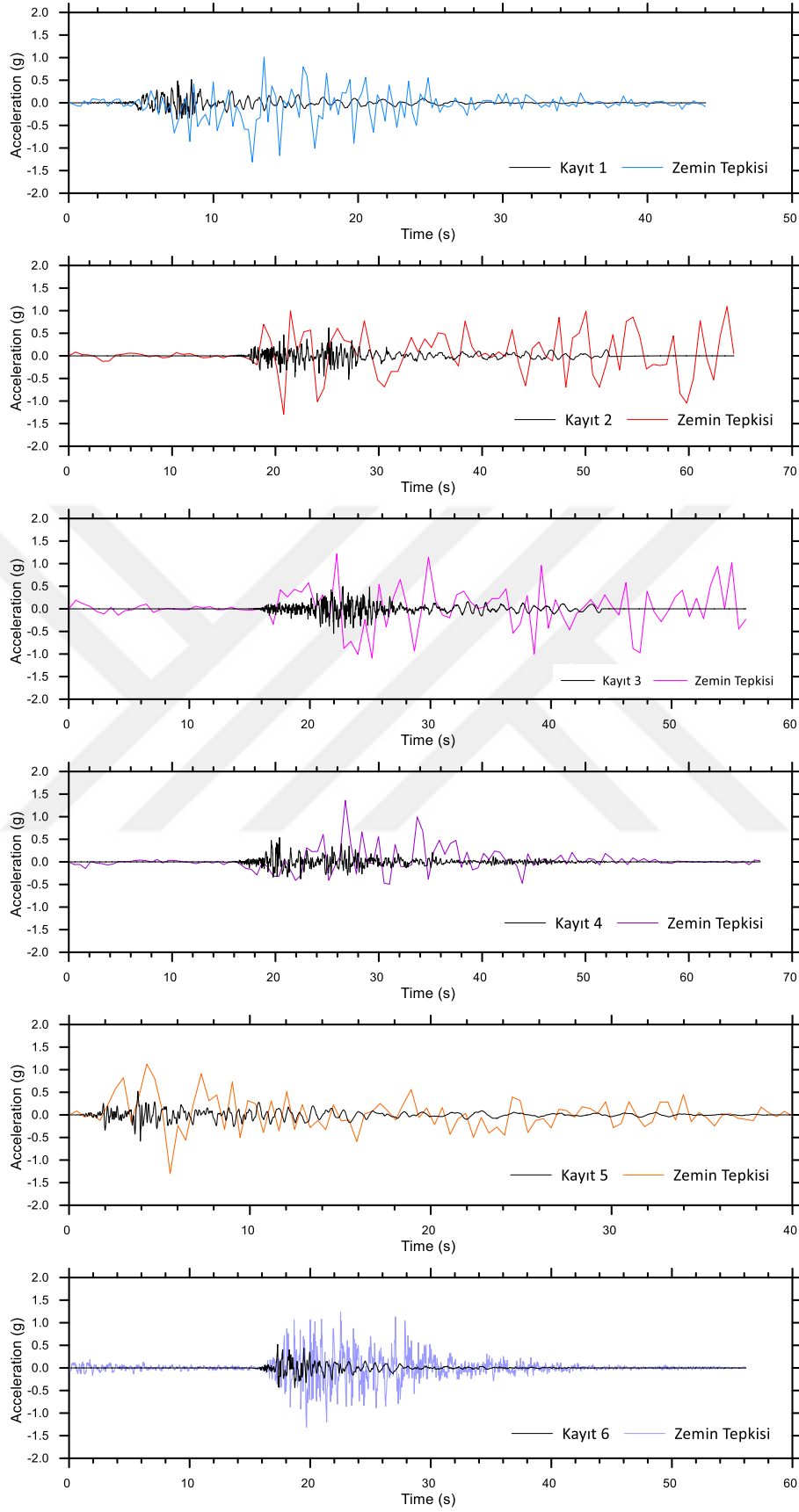


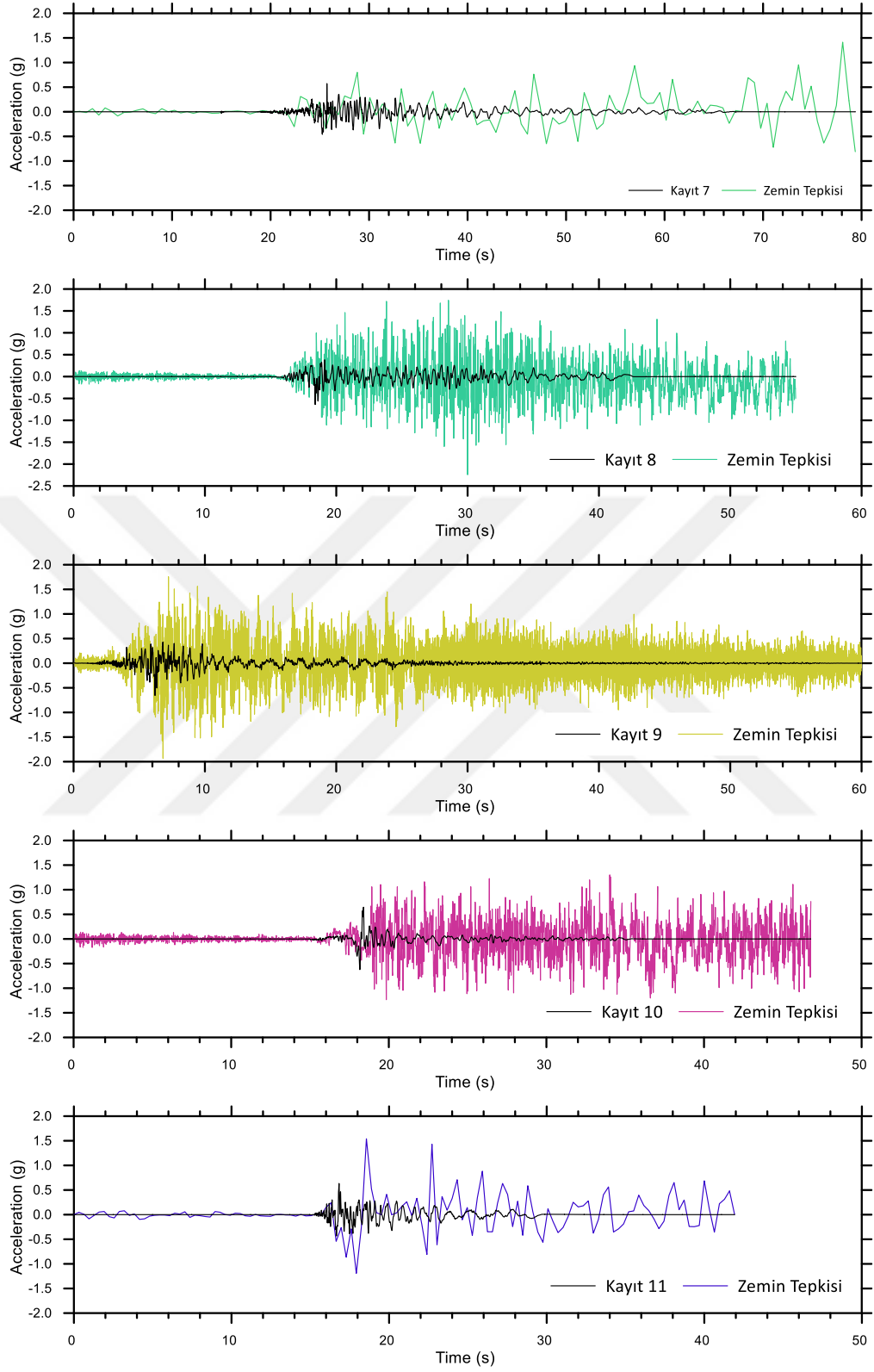
Şekil A.6. Senaryo 6 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



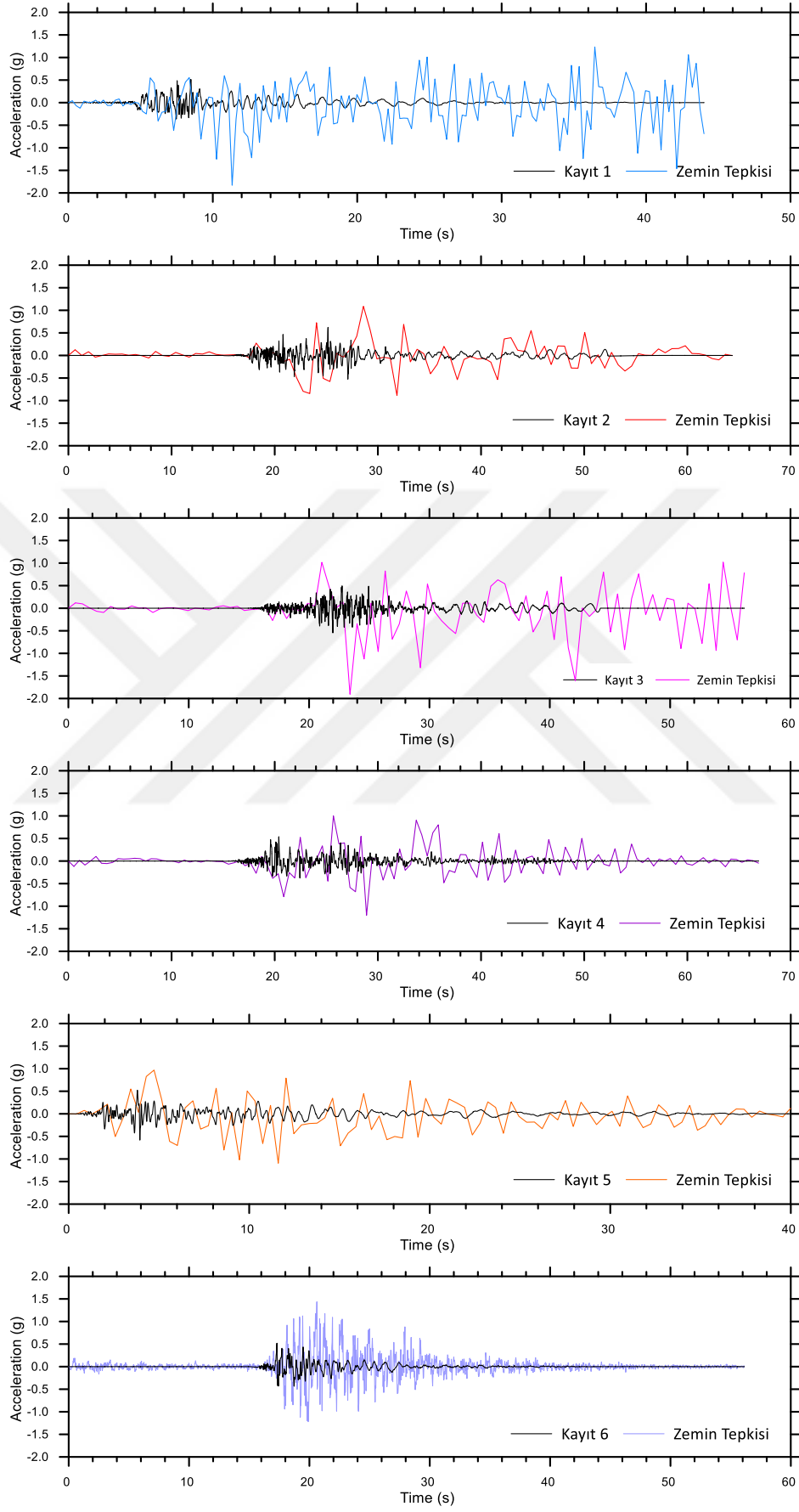


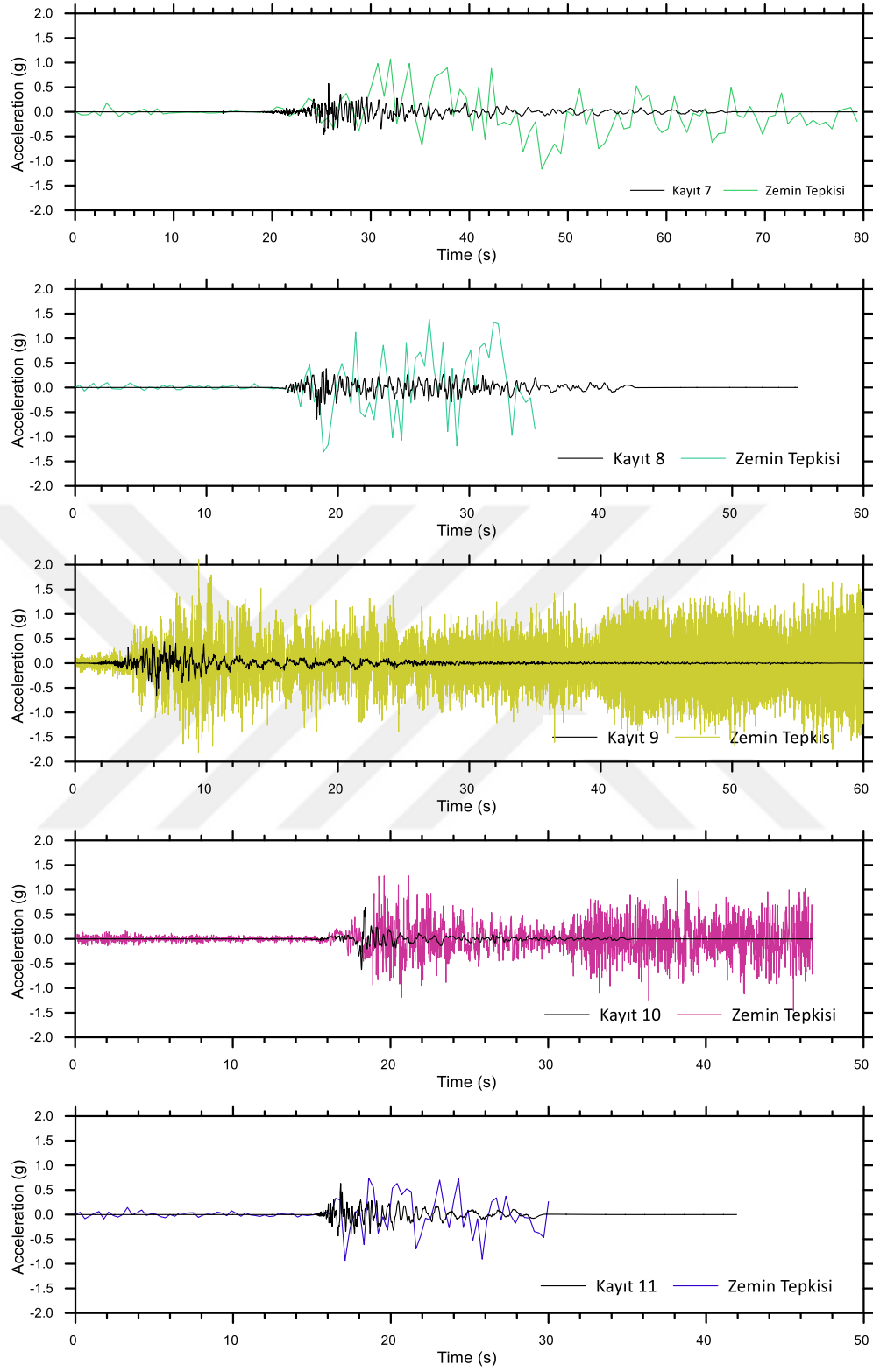
Şekil A.7. Senaryo 7 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



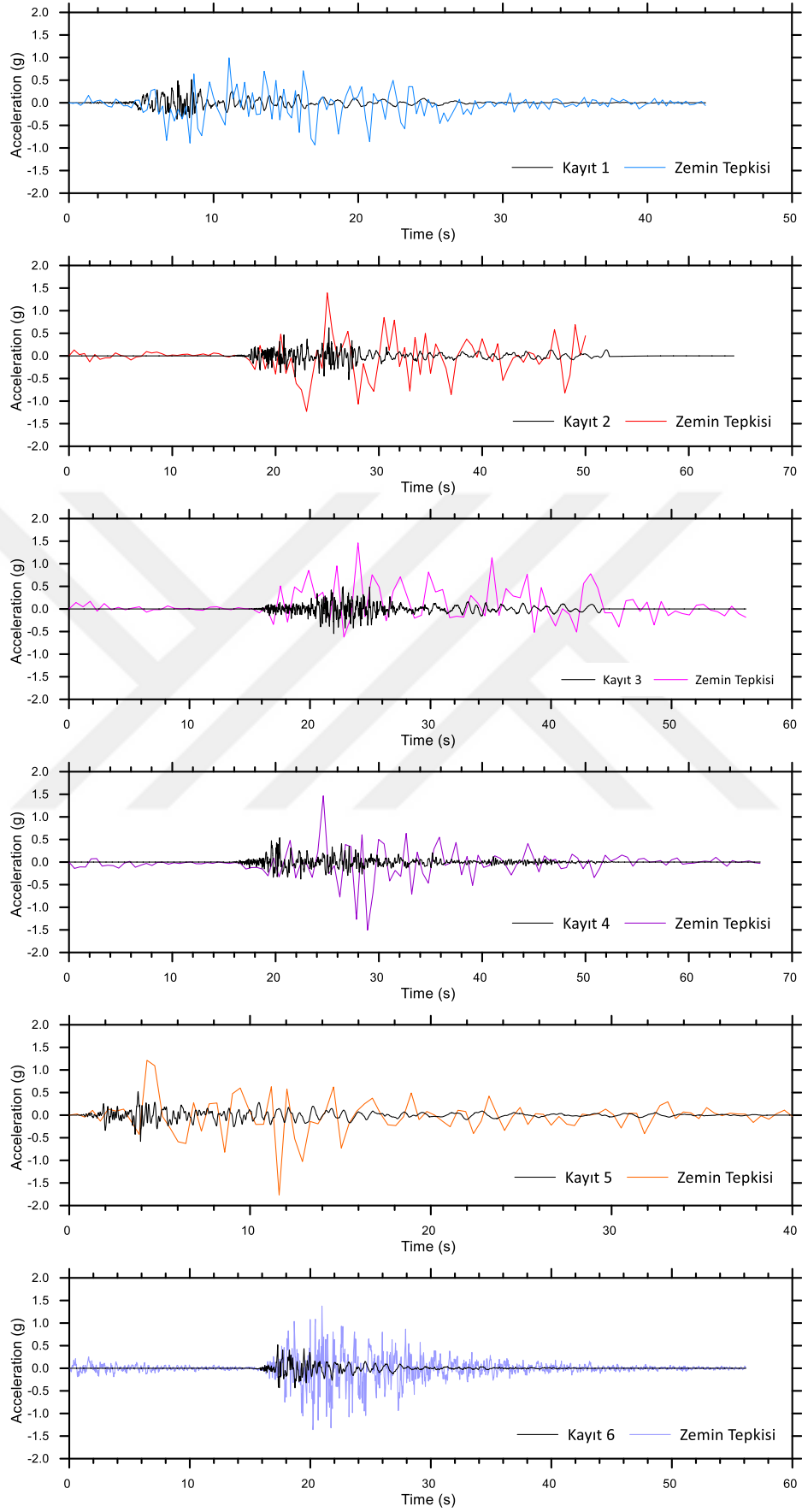


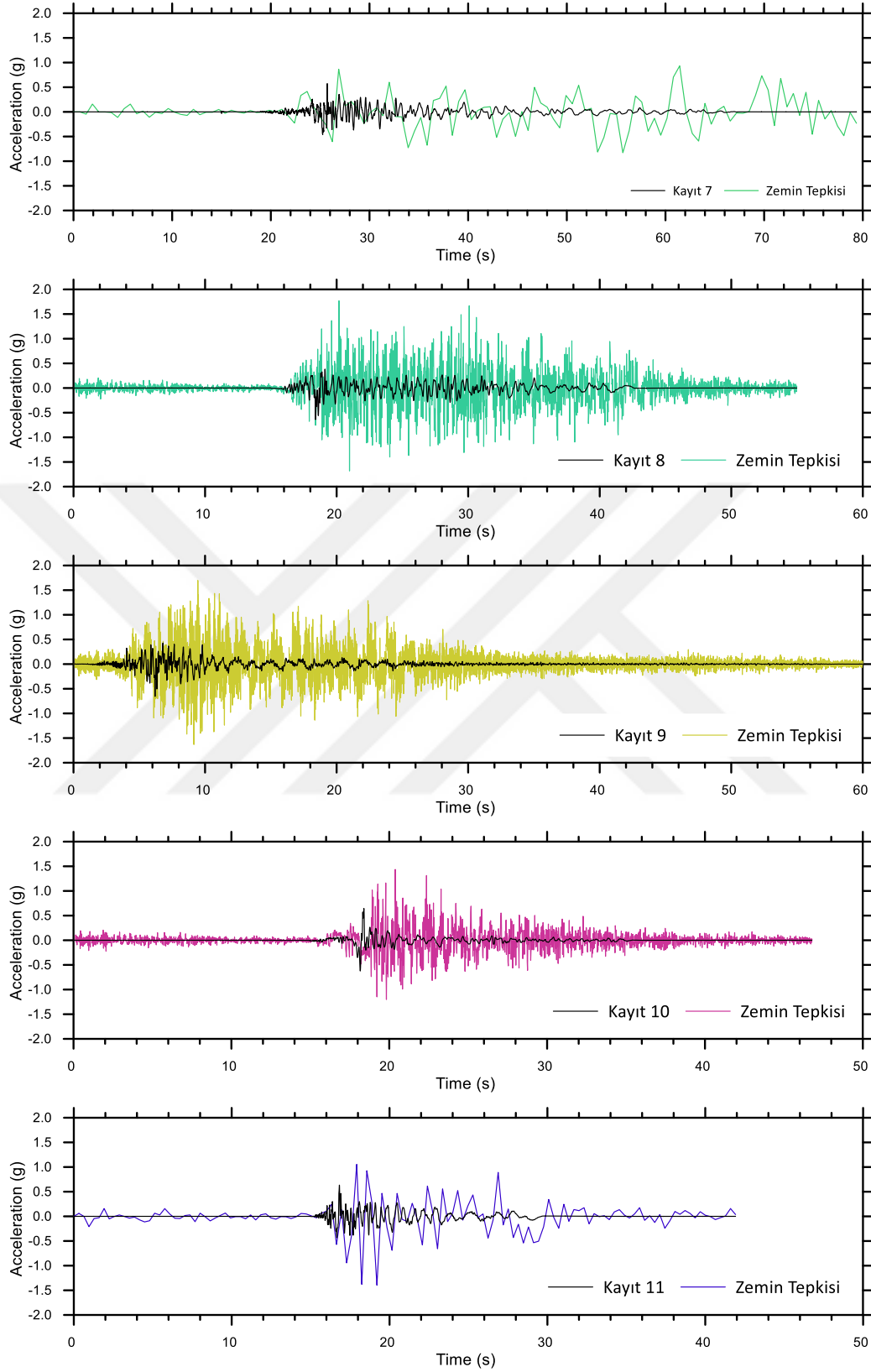
Şekil A.8. Senaryo 8 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



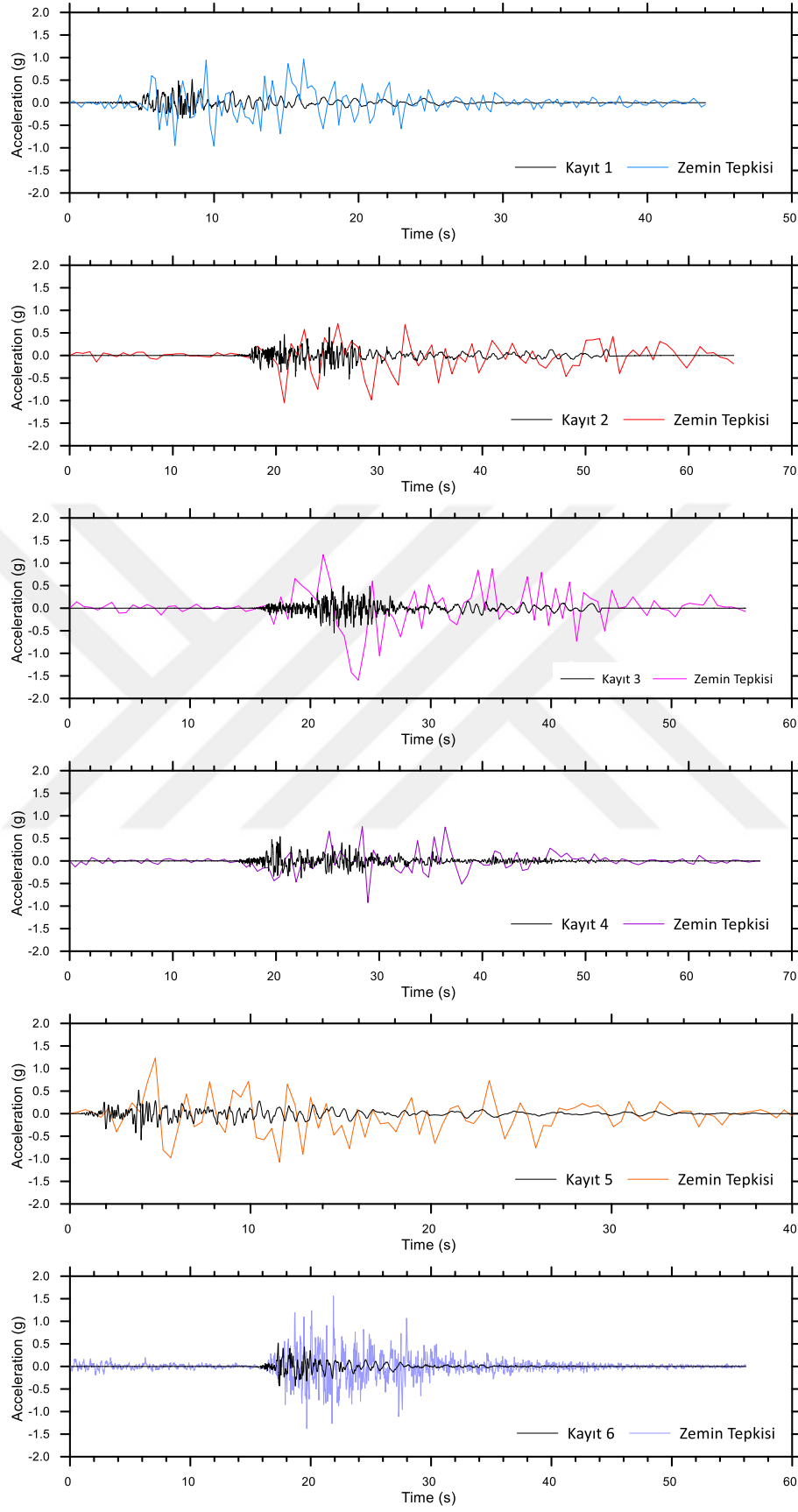


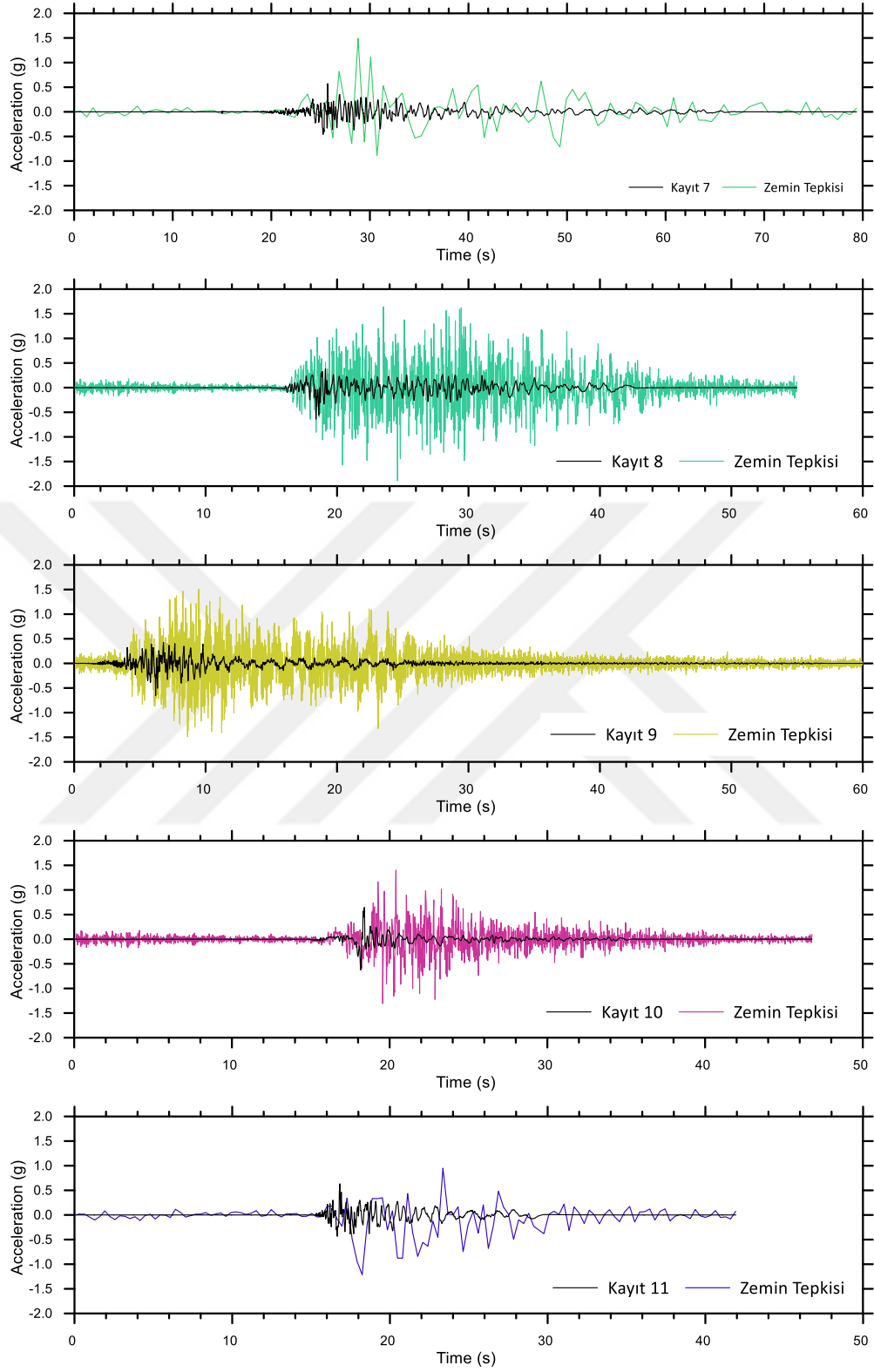
Şekil A.9. Senaryo 9 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği



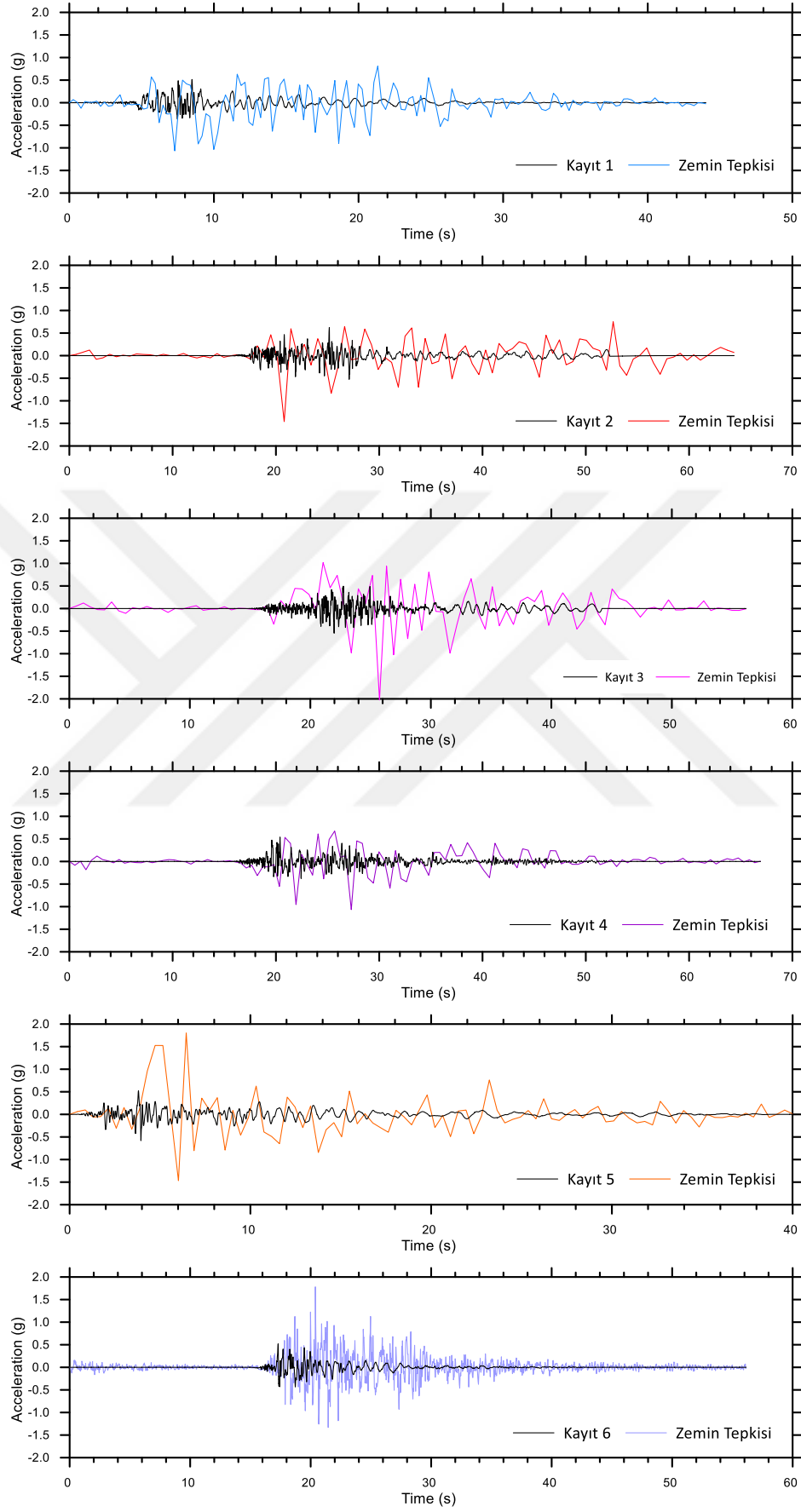


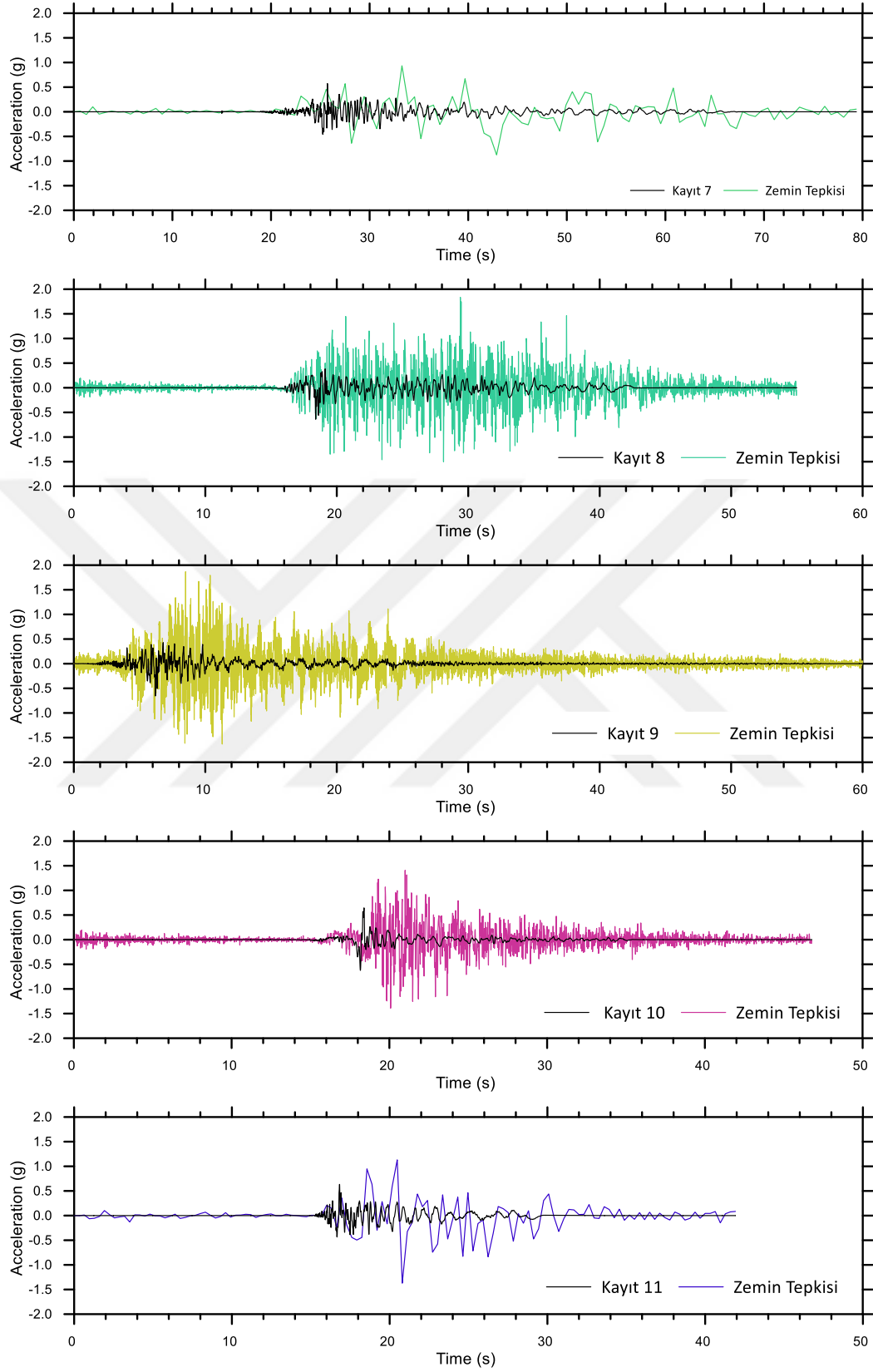
Şekil A.10. Senaryo 10 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği





Şekil A.11. Senaryo 11 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği





Şekil A.12. Senaryo 12 için anakaya hareket ile zemin tepki grafiği