Barajların Sismik Stabilitesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi

Vicdani Barış Uysal

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2020

Determination of Seismic Stability of Dams by Finite Element Methods

Vicdani Barış Uysal

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June 2020

Barajların Sismik Stabilitesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi

Vicdani Barış Uysal

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN

Haziran 2020

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN danışmanlığında hazırlamış olduğum "Barajların Sismik Stabilitesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik 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. 23/06/2020

Vicdani Barış Uysal

İmza

ÖZET

Su tutma yapılarına verilen önem ülkemizde giderek artmaktadır. İnşa edilecek yeni su tutma yapıları ile mevcut su tutma yapılarının dinamik yükler altında performanslarının değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Eskişehir Seyitgazi Gökbahçe Göleti'nin nonlineer analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Gökbahçe Göletinin PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programları ile modellemesi yapılmış ve bu programlar vasıtasıyla 11 farklı dinamik yük etkisine maruz bırakılmıştır. İki programdan elde edilen ivme, deformasyon ve en büyük spektral ivme verileri karşılaştırılmıştır. Programların farklı boyutlarda modelleme yapmasından dolayı modellemedeki boyut etkisinin sonuçların değişimine etkisi araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, modellemede aynı sınır koşullarına sahip zemin tabakalarında veriler birbiri ile uyumlu çıkmıştır, fakat göletin gövde kısmında verilerin uyumlu olmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dinamik analiz, PLAXIS, DEEPSOIL, Non-Lineer analiz, en büyük spektral ivme.

SUMMARY

The importance given to the water retention structures in Turkey is gradually increasing. The evaluation of already existing and to be constructed water retention structures under dynamic load is highly important. In this study, nonlinear analysis of Eskişehir Seyitgazi Gökbahçe Pond is performed by the means of PLAXIS 2d and DEEPSOIL programs while using the finite element method. A model of Gökbahçe Pond is created in PLAXIS 2D and DEEPSOIL programs, and this model exposed to 11 different dynamic load effects. During the study, the acceleration, deformation, and peak spectral acceleration data obtained from the two programs are compared with each other. Due to the fact that those two programs are creating models in different sizes, the impact of the size in modelling is investigated through the results. According to the research, while having the same boundary conditions, the ground layer of the model was compatible with each other, whereas the obtained data from the two programs were not compatible in the pond embankment.

Keywords: Dynamic analysis, PLAXIS, DEEPSOIL, Non-Lineer analysis, peak spectral acceleration.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğretim ve tez çalışmam boyunca hiçbir zaman benden desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN ve geoteknik bilim dalı öğretim üyeleri Prof. Dr. D. Volkan OKUR, Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ ve Doç. Dr. Hasan SAVAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca beni sürekli destekleyen her zaman yanımda olan annem Öznur Uysal, babam Mustafa UYSAL, kardeşlerim Yasemin Ünal ve Meltem Baytimur'a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**

SUMMARY ..... **vii**

TEŞEKKÜR ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xvii**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xviii**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **5**

3. YÖNTEM **20**

3.1. Malzeme Modelleri 20

3.1.1. Pseudo-statik analiz 20

3.1.2. Mohr Coulomb 21

3.1.3 HS Small Model 23

3.2. PLAXIS 2D'in Tanıtılması 25

3.2.1. Model 26

3.2.1.1 Düzlemsel gerilme 26

3.2.1.2. Eksenel gerilme 27

3.2.1.3. Düğüm Noktası 27

3.2.2. Proje 28

3.3. DEEPSOIL'in Tanıtılması 29

4. DEPREM VERİLERİNİN ÖZELLİKLERİ **34**

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1. Analiz İçin Deprem Verisinin Seçilmesi 34
4.2. Spektral İvme Verisinin Değerlendirilmesi 35
5. MODEL 39
5.1. Plaxis 2D 39
5.2. Deepsoil 41
5.3. Model Verileri 42
5.3.1 Model parametreleri ve sınır koşulları 42
5.3.1.1. Darendeli Modeli (2001) 45
5.3.2. Malzeme özellikleri 46
5.3.3. Deprem verisi 48
5.3.4 Depremlerin Baskın Frekans Özellikleri 52
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 55
6.1. Plaxis 2D 55
6.1.1. İvme sonuçları 56
6.1.2. Spektral ivme sonuçları 59
6.1.3. Deformasyon sonuçları 61
6.2. Deepsoil 66
6.2.1. İvme sonuçları 67
6.2.2. En büyük spektral ivme sonuçları 70
6.2.3. Deformasyon sonuçları 72
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 76
7.1 İvme Grafikleri 76
7.2. Periyodun 1. Saniyedeki SA Grafikleri 80

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.3. PSA Grafikleri 83
7.4. Deformasyon Grafikleri 86
7.5 Öneriler 89
KAYNAKLAR DİZİNİ 90
EK AÇIKLAMALAR 94
Ek Açıklamalar-A: PLAXIS 2D İvme Verileri 94
Ek Açıklamalar-B: PLAXIS 2D PSA Verileri 100
Ek Açıklamalar-C: PLAXIS 2D Deformasyon Verileri 106
Ek Açıklamalar-D: DEEPSOIL İvme Verileri 112
Ek Açıklamalar-E: DEEPSOIL PSA Verileri 118
Ek Açıklamalar-F: DEEPSOIL Deformasyon Verileri 124

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Mohr Coulomb modeline ait gerilme birim şekil değiştirme grafiği 21
3.2. Zeminin sertliği karakteristik eğrisi (PLAXIS 2D, 2019) 24
3.3 Histeretik malzeme davranışı (PLAXIS 2D, 2019) 25
3.4. PLAXIS programından bir görüntü 26
3.5. (a) Düzlemsel gerilme ve (b) eksenel simetrik model örnekleri 27
3.7. DEEPSOIL programından bir görüntü 30
3.8. DEEPSOIL programında model özellikleri ve zemin profili 31
3.9. DEEPSOIL profil özet grafikleri 31
3.10. DEEPSOIL programının analiz sonuç ekranı 33
4.1 Türkiye deprem tehlike haritası 36
4.2. Yerel zemin sınıfları (AFAD, 2020) 37
4.3. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları'ndan bölgeye ait spektrum değerlerinin elde edilmesi 38
5.1. Gökbahçe göletinin en kesiti (EKAP, 2018) 39
5.2. PLAXIS 2D model geometrisi 40
5.3. PLAXIS 2D ağ yapısı 40
5.4. DEEPSOIL modelin frekans değişimi 41
5.5. Zeminin lineer olmayan gerilme-stres eğrisi ve kayma gerilmesi birim deformasyonun genliği ile sekant kayma modülünün değişimi (Darendeli, 2001) 43
5.6. Tekrarlı yükleme altında zeminin kayma modülü tahmini ve malzeme sönümleme oranı (Darendeli, 2001) 43
5.7. DEEPSOIL 0 m ve 65.62 m kayma modülü azalım eğrisi 44
5.8. PLAXIS 2D kayma modül azalım eğrisi örneği 45
5.9. Deprem ivme verileri 50
5.10. Düzeltilmiş deprem ivme verileri 51
5.11. Depremlerin ortalama fourier genliği ile frekans ilişkisi 53
5.12. Depremlerin spektral ivme ile frekans ilişkisi 54

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

6.1. Seçilmiş olan noktaların koordinatları 55
6.2. Düzce depreminin ivme verileri 57
6.3. Chi-Chi depreminin ivme verileri 58
6.4. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri 60
6.5. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri 61
6.6. PLAXIS 2D programında Düzce depreminin analizi sonrası oluşan deformasyon 61
6.7. Düzce depreminin deformasyon verileri 63
6.8. Chichi depreminin deformasyon verileri 65
6.9. PLAXIS 2D programında Düzce depremine ait toplam yer değiştirmeler 66
6.10. PLAXIS 2D programında Düzce depremine ait yatay yer değiştirmeler 66
6.11. Düzce depreminin ivme verileri 68
6.12. Chichi depreminin ivme verileri 69
6.13. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri 71
6.14. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri 72
6.15. Düzce depreminin deformasyon verileri 74
6.16. Chichi depreminin deformasyon verileri 75
7.1. (a) Kil çekirdeğe ait ivme verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait ivme verileri, (c) Kil 2 isimli tabakaya ait ivme verileri, (d) Kil 3 isimli tabakaya ait ivme verileri 78
7.2. (a) Kil çekirdeğe ait 1. saniye periyodun SA verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri, Kil 2 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri, Kil 3 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri 82
7.3. (a) Kil çekirdeğe ait PSA verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait PSA verileri, (c) Kil 2 isimli tabakaya ait PSA verileri, (d) Kil 3 isimli tabakaya ait PSA verileri 85
7.4. (a) Kil çekirdeğe ait deformasyon verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait deformasyon verileri, (c) Kil 2 isimli tabakaya ait deformasyon verileri, (d) Kil 3 isimli tabakaya ait deformasyon verileri 88
A.1. Afyon depreminin ivme verileri 94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

A.2. Chichi depreminin ivme verileri 94
A.3. Düzce depreminin ivme verileri 95
A.4. Erzincan depreminin ivme verileri 95
A.5. Erzurum depreminin ivme verileri 96
A.6. Hector mine depreminin ivme verileri 96
A.7. Kobe depreminin ivme verileri 97
A.8. Kocaeli depreminin ivme verileri 97
A.9. Lomaprieta depreminin ivme verileri 98
A.10. Northbridge depreminin ivme verileri 98
A.11. Van depreminin ivme verileri 99
B.1. Ayfon depreminin en büyük spektral ivme verileri 100
B.2. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri 100
B.3. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri 101
B.4. Erzincan depreminin en büyük spektral ivme verileri 101
B.5. Erzurum depreminin en büyük spektral ivme verileri 102
B.6. Hector mine depreminin en büyük spektral ivme verileri 102
B.7. Kobe depreminin en büyük spektral ivme verileri 103
B.8. Kocaeli depreminin en büyük spektral ivme verileri 103
B.9. Lomaprieta depreminin en büyük spektral ivme verileri 104
B.10. Northbridge depreminin en büyük spektral ivme verileri 104
B.11. Van depreminin en büyük spektral ivme verileri 105
C.1. Afyon depreminin deformasyon verileri 106
C.2. Chichi depreminin deformasyon verileri 106
C.3. Düzce depreminin deformasyon verileri 107
C.4. Erzincan depreminin deformasyon verileri 107
C.5. Erzurum depreminin deformasyon verileri 108
C.6. Hector mine depreminin deformasyon verileri 108
C.7. Kobe depreminin deformasyon verileri 109
C.8. Kocaeli depreminin deformasyon verileri 109

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

C.9. Lomaprieta depreminin deformasyon verileri 110
C.10. Northbridge depreminin deformasyon verileri 110
C.11. Van depreminin deformasyon verileri 111
D.1. Afyon depreminin ivme verileri 112
D.2. Chichi depreminin ivme verileri 112
D.3. Düzce depreminin ivme verileri 113
D.4. Erzincan depreminin ivme verileri 113
D.5. Erzurum depreminin ivme verileri 114
D.6. Hector mine depreminin ivme verileri 114
D.7. Kobe depreminin ivme verileri 115
D.8. Kocaeli depreminin ivme verileri 115
D.9. Lomaprieta depreminin ivme verileri 116
D.10. Northbridge depreminin ivme verileri 116
D.11. Van depreminin ivme verileri 117
E.1. Ayfon depreminin en büyük spektral ivme verileri 118
E.2. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri 118
E.3. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri 119
E.4. Erzincan depreminin en büyük spektral ivme verileri 119
E.5. Erzurum depreminin en büyük spektral ivme verileri 120
E.6. Hector mine depreminin en büyük spektral ivme verileri 120
E.7. Kobe depreminin en büyük spektral ivme verileri 121
E.8. Kocaeli depreminin en büyük spektral ivme verileri 121
E.9. Lomapriate depreminin en büyük spektral ivme verileri 122
E.10. Northbridge depreminin en büyük spektral ivme verileri 122
E.11. Van depreminin en büyük spektral ivme verileri 123
F.1. Afyon depreminin deformasyon verileri 124
F.2. Chichi depreminin deformasyon verileri 124
F.3. Düzce depreminin deformasyon verileri 125
F.4. Erzincan depreminin deformasyon verileri 125

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

F.5. Erzurum depreminin deformasyon verileri 126
F.6. Hector mine depreminin deformasyon verileri 126
F.7. Kobe depreminin deformasyon verileri..... 127
F.8. Kocaeli depreminin deformasyon verileri..... 127
F.9. Lomaprieta depreminin deformasyon verileri..... 128
F.10. Northbridge depreminin deformasyon verileri..... 128
F.11. Van depreminin deformasyon verileri..... 129

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

1.1. Ülkemizdeki işletme halindeki baraj ve gölet sayıları (DSİ, 2020) 2
3.1. Uygulama tiplerine göre model yaklaşımları 23
4.1. Seçilen deprem takımı bilgileri 35
4.2. Deprem yer hareket düzeyleri..... 35
4.3. AFAD çıktısı 38
5.1. Göletlerde kullanılan malzeme özelliklerine ait çalışma örnekleri 47
5.2. PLAXIS 2D modelde kullanılan malzeme özelliklerine 47
5.3. DEEPSOIL modelde kullanılan malzeme özelliklerine 48
5.4. Deprem ivme kayıtlarının bilgileri 49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
f_{max}	Maksimum frekans
Vs	Kayma dalgası hızı
H	Zemin tabakasının kalınlığı
M	Magnitüd
g	Yerçekimi ivmesi
DD	Deprem düzeyi
S_s	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_1	1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
PGA	En büyük yer ivmesi
PGV	En büyük yer hızı
G	Kayma modülü
τ	Kayma gerilmesi
γ	Kayma gerilmesi birim deformasyonu
D	Sönüm Oranı
A_L	Histerisis alanı
A_T	Histerisis doğrusunun altındaki üçgenin alanı
G_{max}	Maksimum kayma modülü
PI	Plastisite indisi
OCR	Aşırı konsolidasyon oranı
σ'_0	Efektif ortalama normal gerilme
G_t	Tanjant kayma modülü
G_s	Sekant kayma modülü
G_{ur}	Yüksüz/Tekrar yüklemeli kayma modülü
γ	Hacim ağırlık
γ_s	Kuru hacim ağırlık
E_{50}	Üç eksenli yükleme sertlik modülü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	**Açıklama**
E_{ur}	Üç eksenli yüklemesiz sertlik modülü
E_{oed}	Odometre yükleme sertlik modülü
c	Kohezyon
Ø	Kayma mukavemeti açısı
K_0	Normal konsolide
PSA	Pik spektral ivme
SA	Spektral ivme
T	Periyot
Hz	Hertz
S_a	Spektral ivme

Kısaltmalar	**Açıklama**
DSİ	Devlet Su İşleri
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
PEER	Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Baraj; havzadaki su potansiyelinin belirli bir alan içerisinde sınırlandırılarak akarsuyun kontrol altında alınması veya suyun depolanması amacıyla yapılmış olan mühendislik yapısıdır. Barajlar sulama, hidroelektrik, kullanma ve sanayi suyu ile taşkın önleme olarak farklı amaçlarda inşa edilmektedir. Sulama alanında hizmet veren barajlar bölgedeki tarımın ve hayvancılığın geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bölgelere yapılan su yapıları sayesinde bölgedeki çiftçilerin kalkınması amaçlanmaktadır. Böylelikle kentlere olan göçün önüne geçilmesi ve işsizliğin azaltılma planlanmıştır.

Hidroelektrik alanında hizmet veren barajlar ise ülkenin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla projelendirilmişlerdir. Kullanım suyu temini amacıyla inşa edilen su tutma yapılarında bölgedeki kentlere ve sanayi kuruluşlarına ihtiyaçlarını karşılanması amaçlanmaktadır. Bu yüzden su tutma yapıları ülkemiz için büyük önem taşımaktadır. Ülkemizdeki baraj ve gölet sayıları Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere Devlet Su İşleri (DSİ) ülkeyi 26 alt bölgeye ayırmış ve bölgelerdeki güncel gölet ve baraj sayıları aşağıda sunulmuştur. 2020 verilerine göre ülkemizde toplamda 675 baraj ve 639 gölet bulunmaktadır. En fazla yoğunluğa sahip bölge ise 18. Bölge Müdürlüğü olarak ortaya çıkmış ve bölge merkezi Isparta olup; Burdur, Afyonkarahisar illeri ile Akşehir (Konya) ve Tuzlukçu (Konya) ilçelerini kapsamaktadır.

Çizelge 1.1. Ülkemizdeki işletme halindeki baraj ve gölet sayıları (DSİ, 2020)

DSİ Bölgesi	**Baraj**	**Gölet**
1. Bölge	28	32
2. Bölge	72	-
3. Bölge	47	36
4. Bölge	50	67
5. Bölge	-	72
6. Bölge	35	17
7. Bölge	34	49
8. Bölge	12	19
9. Bölge	36	5
10. Bölge	12	11
11. Bölge	10	35
12. Bölge	38	18
13. Bölge	25	9
14. Bölge	11	23
15. Bölge	5	4
16. Bölge	1	-
17. Bölge	8	2
18. Bölge	82	79
19. Bölge	22	38
20. Bölge	16	28
21. Bölge	37	22
22. Bölge	22	3
23. Bölge	15	11
24. Bölge	4	2
25. Bölge	50	57
26. Bölge	4	-
Türkiye Geneli	676	639

Barajlar dolgu baraj, beton baraj ve karışık kesitli barajlar olmak üzere üç ana kategoriye ayrılırlar. Dolgu barajlar; homojen toprak dolgu barajlar, geçirimsiz çekirdekli barajlar ve önyüzü kaplamalı dolgu barajlar olmak üzere alt sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflarda kullanılan yapı malzeme türüne bağlı olarak kendi içerisinde de sınıflandırılmaktadır. Beton barajlar; geleneksel ve silindirle sıkıştırılmış beton barajlar olmak üzere ikiye alt sınıflara ayrılır.

DSİ'nin yapmış olduğu çalışmalar göstermiştir ki Türkiye'de kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 1519 m^3/yıl civarındadır. TUİK verilerine göre 2030 yılında kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 1120 m^3/yıl olacağı tahmin edilmektedir. (DSİ, 2020) Ülkemizin şu anki durumda su azlığı olan bir ülke olduğu söylenebilir. Bu durumda ülkemizdeki su kaynaklarının doğru kullanılması amacıyla su tutma yapıları yapılarak kişi başına düşen kullanılabilir su miktarının artırılması hedeflenmektedir. Su varlığının artırılmasıyla birlikte kişi başına düşen su miktarının artırılması hedeflenmektedir.

Barajların inşalarının yüksek maliyeti ve sahip oldukları önemden dolayı yapılan yatırımların karşılanması için hizmet sürelerinin mümkün olduğunca uzun tutulması istenmektedir. Bu amaç doğrultusunda su tutma yapılarının dizaynında yüksek güvenlik katsayıları alınmaktadır. Dizayn aşamaları DSİ'nin yayınlamış olduğu baraj projesi yapım teknik şartnamesinde açıkça belirtilmiştir. Bu tasarım aşamalarında stabilite analizleri, gerilme ve deplasman analizleri, sızma analizleri ve dinamik analizlerin yapılması istenmektedir. Analizlerin sonlu elemanlar yöntemi ve laboratuvar deneylerine dayanması istenmektedir fakat dinamik analizlerinde verilerin nasıl kullanılacağına dair bir tanım bulunmamaktadır.

Deprem hareketleri oluşumun gerçekleştiği bölgeye göre çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitliliği etkileyen faktörler zemin özelliklerine bağlı olarak kayma dalgası hızına, faya olan uzaklığına ve oluşum tipine göre değişiklik göstermektedir. Güncel olarak bu bilgilere AFAD'ın sismik tehlike haritasında inşası yapılacak yapının konumu, yapı özelliğine bağlı olarak deprem yer hareket düzeyinin ve zemin özelliğinin girilmesiyle birlikte o bölgeye ait rapor elde edilmektedir.

Yapının deprem altındaki davranışının incelenmesi için yapının konumu, yapı özelliğine bağlı olarak deprem yer hareket düzeyinin ve zemin özelliğinin bilinmesinin yanında dizaynı da büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında yapı-zemin etkileşimini inceleyen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirtilen kriterler kullanılarak bu çalışmada Seyitgazi Gökbahçe Göleti'nin sismik analizi yapılmıştır. 11 farklı deprem altındaki modelin performansa dayalı sismik analizi sonlu elemanlar yöntemini kullanan PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programlarıyla gerçekleştirilmiştir. Barajların sismik yükler altındaki davranışının incelenmesi için kullanılan sonlu elemanlar programlarındaki dizayn boyutlarının sonuçlara olan etkisi bahsedilen programlarından elde edilen verilerin karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Zeminlerin sismik yükler altındaki davranışı geoteknik mühendisliğinde en çok çalışılan konulardan birisidir. Bu alanda teorik, analitik, deneysel, istatistiksel ve sayısal yaklaşımlar açısından birçok bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Ülkemiz su fakiri ülkelerden birisi olduğu için su kaynaklarının korunması ve verimli kullanılması amacıyla farklı amaçlarda birçok gölet inşa edilmektedir. Coğrafi açıdan bakıldığında ülkemizde aktif fay hatların bulunması sebebiyle depremin göletler üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir. Göletlerin tasarımında pseudo-statik analiz yöntemi kullanılmaktadır fakat bu yöntem zamana bağlı bir analiz türü olmadığı için hesaplamalarda depremin zamana bağlı olan özellikleri göz ardı edilmektedir. Bu sebepten ötürü zamana bağlı analizlerin kullanılması gerekmektedir. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte, sonlu elemanlar yöntemi ile zamana bağlı analizlerin geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı gün geçtikte artmaktadır. Bu konu üzerinde son 15 yıl içerisinde gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi ve barajlar ile ilgili bilimsel araştırmalar incelenerek kronolojik olarak literatür kısmında bahsedilmiştir.

Hayta (2005) tarafından yapılan çalışmalarda PLAXIS programının iki boyutlu analizi kullanılarak projesini ZETAŞ A.Ş.'nin yaptığı bir endüstri yapısına ait binanın inşaatında kullanılan zemin ankrajlarına ait proje hesapları ile PLAXIS'in analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. PLAXIS'te inklinometre'den son kazı derinliğine kadar ankrajlı duvarın yatay deformasyonun hesaplanması için gerekli zemin parametreleri, duvara arkasında oluşan gerilmeleri ve ankraj yüklerinin inşaatın her aşamasındaki değişiminin takibi için kullanılmıştır. Proje firmasının hazırlamış olduğu tasarım ile karşılaştırılmış ve zemin parametre değerleri, E ve ϕ'nin geçmiş çalışmalarda elde edilenlerden daha küçük olduğu görülmüştür.

Öztürk (2005) tarafından yapılan çalışmada donatılı zeminlerin sismik etkilere karşı sergilemiş olduğu davranış PLAXIS programı kullanılarak incelenmiştir. 2 m ile 10 m arasında değişen farklı istinat duvar yüksekliklerinde donatı uzunluğu, donatı aralığı ve blok genişliğinin değişimi ile sismik etkinin oluşturduğu yer değiştirme miktarına olan etkisi değerlendirilmiştir. Adapazarı deprem kaydının ilk 20 saniyesi donatılı zemin istinat

duvarına uygulanarak farklı L/H oranları ve donatı aralığının kalıcı deformasyon miktarına olan etkisi incelenerek analiz sonuçları irdelenmiştir.

Osmanoğlu (2007) tarafından yapılan çalışmada tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar programı olan PLAXIS programı ile analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında tünellere yakın bölgelerde inşa edilecek olan yapıların oluşturacağı yüklerin zemin yüzeyinde ve tünelin kaplamasında meydana getirdiği deformasyon değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup olmadığını incelemiştir. Deformasyon değerleri kabul edilebilir sınırlarda olmadığı zaman çeşitli zemin iyileştirme iyileştirme yöntemleri kullanılarak minimum deformasyon değeri elde edilmiştir.

Özsoy (2007) tarafından yapılan çalışmada dinamik yükleme etkisi altındaki kemer barajların davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında Gökçekaya Barajı'nın iki boyutlu modeli sonlu elemanlara ayrılarak tanımlanmıştır. Model sonlu elemanlar metodu ile MATLAB ve SAP2000 programları yardımıyla dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde 1940 yılında El-Centro gerçekleşen depremin kuzey-güney bileşeni dikkate alınmıştır. Maksimum yer ivme değeri 0.33 g olan bu depremin Housner tarafından geliştirilen ivme hesap spektrumu kullanılarak incelemeler yapılmıştır. İncelemede barajın rezervuarındaki suyun oluşturacağı hidrodinamik etkide kütle (Westergaard) yaklaşımı ile dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları göstermiştir ki en kritik durum barajın temelinin ankastre olması ve dolu halinde oluşmaktadır. Gerilme değerleri kesitlerde farklılık gösterse de en büyük düşey gerilme değerleri barajın tabanına yakın bölgede oluşmuştur. Bu gerilme değerleri barajın kenarına doğru azalım göstermektedir. Kayma gerilmeleri ise barajın orta ve üst kısımlarında görülmekteyken barajın sahil kısmına doğru artış olduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda her iki yönteminde birbirine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Wu vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada sismik bir etki altında barajdaki ivme ve aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimleri, barajın göçme kritik erken uyarı göstergesi olduğu belirtilmiştir. Bu varyasyonları değerlendirmek için basitleştirilmiş üç baraj modelinin sismik tepkileri, sayısal simülasyonlar ve santrifüj testleri ile değerlendirilmiştir. Analiz değerleri ile kaydedilen değerler arasında yakınlığı değerlendirmek için

normalleştirilmiş istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Deneysel kayıtların güvenilir olduğu varsayılarak sayısal programın güvenilirliği bu istatistiksel yöntem yardımıyla değerlendirilmiştir. İki yaklaşım arasındaki tutarsızlığa ilişkin açıklamalar yapılmıştır.

Dikmen (2013) tarafından yapılan çalışmada düşük ve yüksek plastisiteli killerin laboratuvar sonuçları ile PLAXIS 3D programından elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Tek sıra çift sıra geotekstil malzeme kullanılarak farklı su muhtevasında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde serbest basınç mukavemet sonuçları kendi arasında irdelenmiştir. PLAXIS programında probleme ait modeller oluşturulmuştur ve sonuçlar geotekstillerin oturma ve taşıma gücüne olumlu yönde katkı yaptığı görülmüştür. Laboratuvar deneyleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi için PLAXIS 3D programında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yücel (2013) tarafından yapılan çalışmanın konusu baraj-temel-rezervuarın zaman tanım alanında yapılan sismik analiz sonuçlarının Fenves ve Chopra tarafından önerilen yöntem kullanılarak elde edilmesidir. Bu yöntem de baraj-temel-rezervuar etkileşimini temel kayası rijitliğini, toplanan suyun sıkıştırılabilirliği ve rezervuar taban malzemelerinin sönüm etkisi dikkate alınmaktadır. Fenves ve Chopra'nın geliştirmiş olduğu EAGD-84 program kullanılmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçları ile stabilite analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Programa girilecek parametrelerin baraja etki edecek sismik etkilerin daha iyi anlamak için parametrik ve determanistik duyarılık analizleri yapılmıştır. Çeşitli özelliklere sahip oluşturulan modellerde gerçekleştirilen doğrusal elastik analiz ile yapılmış hasar değerlendirmeleri aracılığıyla barajın kırılganlık eğrileri elde edilmiştir. Yapılan analizlerde gerilme seviyeleri barajın inşaatında kullanılan betonun elastisite modülü ile temel kayanın elastisite modülüyle doğrudan ilişkili olduğu ve elastisite modülünün değeri artıkça barajda oluşan gerilme değerlerinin azaldığı, fakat deformasyon miktarı barajın elastisite modülünün artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Barajın yüksekliğinin artmasıyla birlikte hidrostatik ve hidrodinamik etkilerle birlikte yüksek mod etkisinin artmaktadır. Bu durum barajda oluşacak gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.

Soysal (2014) tarafından yapılan çalışmada 21 farklı deprem kaydı kullanılarak beton ağırlık barajının doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Sosyal'ın yapmış olduğu

dinamik analizde beton ağırlık barajının davranışı gövde de oluşan hasarın gelişimi ve buna bağlı çatlama düzenlerini elde etmiştir. Diğer araştırmacıların yapmış olduğu deneysel çalışmalar ile kullanmış olduğu malzeme modelini karşılaştırmıştır. Yapılan çalışma ile ölçümler arasındaki ilişkileri incelemiştir. Beton ağırlık barajının gövdesinde meydana gelecek hasarı belirlemede spektral ivme değeri yerine hız ile şiddet değerlerinin daha başarılı sonuç verdiğini gözlemlemiştir. Oluşacak gövde hasarının tahmin edilmesi için deprem kayıtlarının hız karakterine dayanan basit bir yöntem önermiştir. Yapılan dinamik analiz ile statik analiz sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla statik itme analizi gerçekleştirerek iki analizin karşılaştırmasını yapmıştır.

Charatpangoon vd. (2014) tarafından yapılan bu çalışmada 2011 yılında Pasifik sahilinde gerçekleşen Tohoku depreminde hasar görmüş olan Fujinuma barajında olası hasar mekanizmalarının ve dinamik davranışının incelemesi yapılmıştır. Araştırmacılar çalışmayı saha ve laboratuvar deneyleri ile barajın sayısal simülasyonu olmak üzere iki bölümde gerçekleştirmişlerdir. Gerekli bilgilerin elde edilmesi amacıyla saha ölçümleri ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Fujinuma barajının hasar görmemiş kısımlarında yapılan mikro titreşim gözlemleri araştırmacıların dinamik özelliklere ait verilerin ortaya çıkartmasında yardımcı olmuştur. Dinamik analiz için katı-sıvı etkileşiminin olduğu sonlu elemanlar metodu uygulanmıştır ve dinamik etkiyi oluşturacak girdi verisi olarak 2011 yılında gerçekleşen Tohoku depremine ait veriler girilmiştir. Mohr-Coulomb göçme kriterleri kullanılaraktan mekanik davranış açıklanmıştır. Frekans ve dinamik analizler sonucunda barajın davranışı ve olası göçme durumlarından bahsedilmiştir. Ayrıca yapılan analizlerle beraber barajın güncel durumu arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Athani vd. (2015) tarafından toprak dolgu barajları üzerine yapmış oldukları çalışmada barajlarda meydana gelebilecek hasarları hidrolik hasar, sızma, baraj gövdesinde oluşacak borulanma ve deprem etkisiyle oluşan hasarlar olarak tanımlamıştır. Bir barajın tasarımında ve inşasında bu hasarların oluşma ihtimali hep göz önünde bulundurulma gerektiği tavsiye edilmiştir. Toprak dolgu barajın inşası sırasında kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve homojen olmayışından dolayı bu hasarların görülme riski artmaktadır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile sızma ve stabilite analizlerinin sonuçları verilmiştir. Sızıntı analizi için denge durumu analizi ve geçici rejim analizi olmak üzere iki farklı durum

için analizler yapılmıştır. Yapılan analizler ışığında hem sızıntının hem de stabilitenin birlikte oluşturduğu etkilerin dikkate alınarak tüm sızıntı ve stabilite koşulları altında tasarım ve performans değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada barajın çekirdek ve kabuk kısmındaki malzemelerin Young modüllerindeki artışın maksimum kret yer değiştirmesinin azalmasına neden olduğu görülmüştür. Bununla birlikte içsel sürtünme açısındaki değişikliğin stabilite kriterlerinde önemli rol oynadığı görülmüştür.

Fragiadakis vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada Kıbrıs'ta bulunan Kouris toprak dolgu barajının sismik kapasitesinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kouris toprak dolgu barajı Kıbrıs'ın en büyük ve en önemli barajıdır. Barajın adadaki önemi dikkate alındığında mevcut analiz yöntemlerine göre yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir ve güncellenmiş sismolojik veriler ışığında sismik kapasitenin güvenlik kriterlerini karşılayıp karışılamadığı araştırılmıştır. Çalışmada ilk önce barajın özellikleri tartışılmıştır ve mevcut tüm veriler eleştirel bir gözle değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda barajın sonlu elemanlar programı PLAXIS 2D'de modeli oluşturulmuştur. Barajın sismik kapasitesi pseude statik yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Newmark'ın kayan blok yöntemi kullanılarak da ilave gerilmeler hesaplanmıştır. Çeşitli sismik yükleme senaryolarına karşı barajın güvenlik faktörlerinin belirlenmesi için bir takım parametrik araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu araştırmalar sonucunda Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD) tarafından belirlenen kriterleri karşıladığı tespit edilmiştir.

Duygu (2014) tarafından yapılan çalışmada beton ağırlıklı barajların sismik güvenliğinin değerlendirilmesi için deprem ivme kayıtlarının ölçeklendirilmesi gerçekleştirilerek yapının lineer olmayan dinamik analiz yöntemi kullanılarak analizleri yapılmıştır. Çalışmada 4 farklı deprem ivme kaydının durağan olmayan spektral eşleştirme, ASCE7-10 standartlarına göre ölçeklendirme, kayıtların maksimum artan hızının aritmetik ortalamasına göre ölçeklendirilmesi ve modsal itme tabanlı ölçeklendirme yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Uysal (2015) tarafından yapılan çalışmada İzmir'de bulunan hafif raylı sistem istasyonlarından olan Fahrettin Altay ve Poligon İstasyonlarının inşası sırasında yapılacak kazı çalışmalarında bölgede bulunan mevcut binaların ve gelecekte yapılacak yüksek katlı

binaların tünellere ve istasyonlara olan etkileri araştırılmıştır. Mevcut binaların yıkılıp yerine yüksek katlı binalar inşa edileceği zaman hafif raylı sistem istasyonlarına oluşturacakları etkilerin araştırılması amacıyla iki boyutlu sonlu elemanlar statik analizleri ve bir boyutlu dinamik zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analiz yöntemi kullanılırken bir boyutlu ve doğrusal yöntem kullanılarak zemin büyütmeleri, spektral ivmeler ve zemin hâkim periyotları belirlenmiştir. Dinamik analizde kullanılacak deprem ivme kayıtlarının belirlenmesi için problemin tanımlanacağı istasyonların 100 km çapındaki bölgede geçmiş yıllarda gerçekleşen deprem kayıtları seçilmiştir. Belirlenen bu deprem kayıtlarının maksimum ivme değerleri olan 0.1g, 0.2g ve 0.4g olacak şekilde ölçeklendirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu ivme değerleri seçilen istasyonlara uzak bölgelerde küçük ivme değerleri kullanılarak küçük depremleri ve yakın bölgelerde büyük ivme değerleri kullanılarak büyük depremleri temsil etmiştir.

Taha vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada geosentetik takviyeli kazık temel sisteminin dinamik performansını değerlendirmek amacıyla sonlu eleman metoduyla problemin analizini gerçekleştirmiştir. Analizler için PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sayısal modeller geosentetik takviyeli kazık temel sisteminin ölçekli modelinin test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Farklı tasarım parametrelerinin geosentetik takviyeli kazık temel sistemi üzerindeki etkilerinin araştırmak amacıyla sayısal parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada yer hareketinin frekansı ve genliği, geosentetik takviyenin sertliği ve mukavemeti, geosentetiğin dolgu malzemesi içerisindeki yeri ve dolgu malzemesinin kalınlığı gibi parametrelere göre analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, geosentetik takviyenin kazık başlığının maksimum yanal hızlanma tepkisini büyük ölçüde azalttığı gözlenmiştir.

Sshivamanth vd. (2015) tarafından yapılan bu çalışmanın konusu limit denge ve sonlu elemanlar kullanılarak taşkın önleme yapısının stabilite analizinin gerçekleştirilmesidir. Yapının stabilite analizi toprak dolgu barajlar için uygulanan yöntemlerle yapılmalıdır. Taşkın önleme yapısının üç farklı akış koşulu için limit dengesi (SLOPE/W) ve sonlu elemanlar (PLAXIS 2D) yöntemi ile analiz gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar inşa sonu, hızlı su düşüşü durumu ve serbest akış koşuludur. SLOPE/W yazılımında güvenlik faktörünün değerlendirilmesinde Morgenstern-Price yöntemi

kullanılmıştır. SLOPE/W yazılımındaki güvenlik faktörü PLAXIS 2D programı kullanılarak da değerlendirilmiştir. Programlarda modellenen taşkın önleme yapısının boyutları 14 metre yüksekliğe ve 6 metre kret genişliğine sahiptir. Taşkın önleme yapısının her iki yüzeyindeki şev eğimi 1V:2H'dir. Yapının altındaki temelde 2 metrelik yumuşak ufalanmış kaya dolgu ve bu dolgunun altında da 8 metrelik sert kaya dolgusu kullanılmıştır. Sonuçlarda tüm koşullar içerisinden en olumsuz koşul olan ani düşü durumunda mansap bölgesinde sızıntının oluşabileceği görülmüştür.

Çavuşli (2016) tarafından yapılan çalışmada FLAC 3D programı kullanılarak Atatürk Barajı'nın baraj temel modeli oluşturularak 3 boyutlu doğrusal olmayan analizi baraj rezervuarının boş ve dolu olması durumu için yapılmıştır. Modelin oluşturulmasında sınır koşulları olarak yan yüzeyler ile tabanda statik analize uygun sınır koşulu seçilmiştir ve malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Yapılan statik analizlerde her iki durum içinde elde edilen asal gerilmeler ve düşey yer değiştirme verileri ile birlikte DSİ'den alınan baraj verileri karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamada analiz değerleri ile DSİ'den alınan verilerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Toromanovic vd. (2016) tarafından yapılan bu çalışmada Kuzey İsveç'teki bir hidroelektrik santral barajının baraj güvenliğine ait araştırmalara odaklanılmıştır. Barajın deformasyonları ve statbilite analizleri için sonlu elemanlar programı olan PLAXIS 2D'de analizler gerçekleştirilmiştir. Tersine analiz metodu ile zemin parametrelerinin tanımlaması için Luleå Teknoloji Üniversitesi'nin daha önce yürütmüş olduğu çalışmalar dikkate alınmıştır. A, B ve C isimlendirmesi yaparak analiz üç bölüme ayrılmıştır. A bölümünde barajın mansap yüzeyindeki artan boşluk suyu basıncı olduğu görülmüştür ve barajın yeni bir drenaj sistemine ihtiyacının olduğuna kanaat getirilmiştir. Hendek drenajının boyutlarının büyütülerek bu sorunun önüne geçileceği vurgulanmıştır. Bölüm B'de barajın topuk bölgesinde erozyona meydana gelmeden sızıntının sağlanması için yeni bir baraj topuk modeli planlanmasına karar verilmiştir. Gerilme artışı olduğu zaman yoğun deformasyon olacağından dolayı zemin malzemesinin ayrışacağı görülmüştür. C bölümünde barajın topuk bölgesinde kazı uygulamadan önce yeni bir sedde yapılmasını kararlaştırılmıştır. Planlanan bu önemlerle birlikte barajın deformasyon ve güvelik katsayılarının kabul edilebilir düzeyde olacağı anlaşılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi bu tür değerlendirmeler için kullanışlı olduğuna ortaya çıkmıştır.

Toma (2017) tarafından yapılan çalışmada kullanılan kazık sisteminin yapının ivme ve temel kesme kuvveti açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Sığ temelde kesme kuvveti etki ettirildiğindeki davranışının incelenmesi için PLAXIS 2D programı yardımıyla analiz gerçekleştirilmiştir, bu analizden elde edilen veriler EuroCode8'in basitleştirilmiş analiz yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. PLAXIS 2D programında analiz gerçekleştirilmeden önce bina inşaatı öncesindeki zemine 0.1 g deprem kuvveti etki ettirildiğindeki zemin davranışı ile aynı modelin DEEPSOIL'deki bir boyutlu analizi gerçekleştirilerek bu iki programda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve verilerin birbiri ile uyum sağladığı görülmüştür. Modele sığ temele sahip kazıklı iki farklı sisteme sahip iki farklı yapı modeline uygulanması ile analizler 4 farklı durum için yapılmıştır. Bu dört farklı durum için yapının doğal frekans veya titreşim periyodunun belirmesi yapılan analiz sonuçlarında elde edilen logaritmik azalımlar EuroCode8'den hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapının sahip olduğu doğal frekans değeri tek katlı yapı için 0.33 saniye, dört katlı bina için 0.6 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçların EuroCode8 ile uyumluluk gösterdiği anlaşılmıştır. Yapılan tüm analiz sonuçları incelendiğinde sismik etki altındaki yapının temel türünün sismik etkiye doğrudan etki ettiği görülmüştür. Tek katlı bina için elde edilen ivme değerlerinde %40'ın üzerinde, dört katlı yapı için elde edilen ivme değerlerinde ise %45'in üzerinde bir artış görülmüştür. Rijit temel altındaki kesme kuvveti değerleri kazık sistemi ile birlikte neredeyse %100 artış göstermiştir. Bu durumdan dolayı kazık sistemi kullanılacak yapılardaki deprem güvenliği için spesifik analiz yapılması gerektiği tavsiye edilmiştir. PLAXIS 2D ile yapılan temel kesme kuvvetinin EuroCode8'de hesaplanan değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Farklılık çok fazla olmadığı için PLAXIS 2D'nin kullanılmasının maliyet açısından daha avantajlı olacağı belirtilmiştir.

Kabakçı (2017) tarafından yapılan çalışmada zemin çivili duvarların tasarım ilkeleri Snap-2, Snailz, PLAXIS ve Slide programları ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. BJK Fulya Projesinde kullanılan çivili duvar kesiti ele alınarak zemin çivili duvarlarda kullanılan malzemelerin tanıtılması ile başlanmıştır ve yapım aşamalarından bahsedilmiştir. Kayma yüzeyi limit denge tasarım yöntemi ile toptan göçme, kayma ve taşıma gücü güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Sonuçların kıyaslanması amacıyla Snap-2, Snailzwin, PLAXIS ve Slide programları ile toptan göçme katsayıları araştırılmıştır. Buna ek olarak Snap-2

programında toptan göçme, kayma ve taşıma gücü güvenlik katsayıları bulunmuştur ve PLAXIS programı ile deplasman sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında kayma yüzeyi limit denge tasarım yöntemi ile yapılan hesaplamalardaki veriler göçme olup olmayacağına karar verilmesinde doğru bir yaklaşım olamadığı görülmüştür ve daha sağlıklı sonuçların elde edilmesi için güvenlik katsayılarının programlar yardımıyla tespit edilmesini tavsiye etmektedir. Ayrıca deplasman miktarlarının ölçülmesi için BJK Fulya Projesinde zemin çivili duvar arkasına yerleştirilen inklinometreden elde edilen verilerin PLAXIS programında elde edilen verilenden 3.5 kat daha küçük olduğu görülmüştür.

Puri vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada Hindistan'ın Haryana eyaletindeki farklı lokasyonlar için eşdeğer lineer yaklaşım kullanılarak deprem tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Bölgeye ait geoteknik veriler devlet ve özel kuruluşlardan elde edilmiştir. Zemin katmanlarındaki en büyük kayma modülü (Gmax) değerleri standart korelasyonlar kullanılarak tahmin edilmiştir. Elde edilen veriler DEEPSOIL sonlu elemanlar programı yardımıyla analizler gerçekleştirilerek, zemin büyütmesi, tepki spektrumları, derinlik boyunca elde edilen PGA değerleri ve farklı derinliklerdeki gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar yorumlandığında dinamik etki altında Haryana eyaletinde zemin büyütmesinin meydana geldiğini ve bu nedenle önem arz eden yapılar inşa edilmeden önce sahaya özel tasarım gerçekleştirilerek dinamik analizlerin yapılması gerektiği görülmüştür.

Yıldırım (2018) tarafından yapılan çalışmada zemin iyileştirme yöntemi olan kireç stabilizasyonu yapılan İzmir Turgutlu sanayi bölgesindeki silt-kum karışımı olan zeminde plaka yükleme deneyi gerçekleştirmiştir ve bu deneyde elde edilen verilerin, PLAXIS programı ile oluşturulan modelden elde veriler kıyaslanmıştır. İyileştirilen zeminde mühendislik parametrelerinden olan elastisite modülü ve poisson oranı farklılaştırılarak değişen parametrelerin zemin deplasmanına olan etkisi araştırılmıştır. Poisson oranında 0.1-0.25 arasında değişim olduğunda deplasman verilerinin %27'ye kadar azaldığı görülmüştür. PLAXIS programında Mohr-Coulomb metodu kullanılarak uygulanan yüke karşılık zemininde oluşması planlanan deplasman değerleri elde edilmiştir. Çalışmada %2 oranında kireç katkısı kullanıldığında zemindeki taşıma gücüne olan etkisi plaka deneyi ve PLAXIS ile araştırılmıştır ve derinlere doğru değişen zemin gerilmelerinin kireç katkısı ile değişen poisson oranının etkisi bağıntısı araştırılmıştır. Yapılan araştırma göstermiştir ki plaka

deneyinde poisson oranı arttıkça deplasman miktarının düştüğü gözlenmiştir, bu poisson oranlarına sahip PLAXIS modellerindeki sonuçlar arasında %10 farklılık görülmüştür.

Yılmaz (2018) tarafından yapılan çalışmada PLAXIS 2D programı ve DEEPXCAV programı Bakırköy-İstanbul'daki bir derin kazı destek sistemi saha uygulamasında kullanarak geoteknik analiz karşılaştırılmıştır. Analiz kapsamında zemin kayma ve duvar hareketindeki incelenmiştir. PLAXIS 2D ile elde edilen verilerde maksimum toplam yatay deplasman değeri ve toplam deplasman değeri DEEPXCAV programında elde edilen sonuçlardan daha büyük olduğu görülmüştür. Bu bilgilere ek olarak eğilme momentinin DEEPXCAV programında elde edilen sonucu PLAXIS 2D programının sonucunun 2 katıdır. Ayrıca kayma kuvveti iki programda neredeyse eşit değer vermiştir. Yapılan saha ölçümleri ve dizayn değerleri incelendiğinde PLAXIS ve DEEPXCAV programında elde edilen verilerin birbirine oldukça yakın olduğu ve kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

Beşli (2018) tarafından yapılan çalışmada deprem hareketliliği fazla olan bölgelerde inşa edilecek kaya dolgu ve kil çekirdekli kaya dolgu barajların sismik performansının incelenmesi gerektiği ve sismik analizi etkileyen faktörlerin araştırılması gerektiğini ifade etmektedir. Çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanılarak farklı deprem kayıtları etkisi altındaki barajların Quake/W FEM programı ile davranışları incelenmiştir. Analizlerde barajların değişik yükseklik, şev eğim açısına ve dolgu malzeme sahip olduğunda dinamik yük altında sergilediği davranış incelenmiştir. Numerik analiz ile elde edilen veriler göstermiştir ki krette elde edilen pik ivme değerinin ana kaya seviyesindeki pik ivme değerine göre 2 kat büyüdüğü ve bu değerin barajın geometrisine, depremin frekansına ve dolgu malzemesinin kayma modülüne göre farklılık gösterdiği ifade edilmiştir. Tez kapsamında Kralkızı barajının Mw=4.6 büyüklüğündeki deprem etkisi altında sismik davranışı değerlendirilmiştir ve barajın kretinden ana kayaya kadar olan bölümündeki ivme değerlerinin nümerik analiz ile elde edilen değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda iki analizin kret sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu ve ana kaya ivme değerlerinin ise daha büyük mertebede olduğu görülmüştür. Bu analizin yanısıra farklı performans değerlerinin incelenmesi için EuroCode8'de tanımlanmış olan göçme limit ve hasar limit durumlarının incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu inceleme de performans hasar

limit değerinin altında kaldığı için barajda ciddi bir hasarın oluşmayacağı yorumu yapılmıştır.

Brojerdi vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada İran'ın güney batısında yer alan Gotvand toprak dolgu barajının sağ sahilindeki konglomeranın dinamik statilitesi farklı sonlu elamanlar yöntemi kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sağ sahilde bir göçme meydana gelmeyeceği görülmüştür. Deprem yüklemesi sonucunda sağ sahilinde 20-60 cm yer değiştirme miktarları gözlenmiştir. Böyle bir yer değiştirme barajın sağ dayanağında çatlak oluşturabileceği için payanda ve kazık gibi geoteknik çözümler yardımıyla engellenmesi gerektiğine karar verilmiştir. Kesme duvarından su sızması riskini en aza indirmek için yapım sürecinde bazı ön iyileştirici çözümler tartışılmıştır.

Yardımcı (2019) tarafında yapılan çalışmada Boğazköy Barajına yerleştirilmiş olan ölçüm aletlerinden okunan veriler ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Boğazköy Barajının modelini oluşturmadan önce barajın inşasında kullanılan malzemelerin laboratuvar deneyleri malzeme özellikleri tayin edilmiştir. Elde edilen parametreler sonlu elemanlar programında kullanılarak model oluşturularak tasarım analizleri gerçekleştirilmiştir. Gövdenin stabilite ve gerilme-deformasyon analizleri sonucunda elde edilen veriler barajdaki ölçüm aletlerinden okunan verilerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda PLAXIS 2D kullanılarak elde edilen veriler ile ölçüm aletlerinden yapılan okumaların birbiri ile uyumluluk gösterdiği görülmüştür.

Kılıç (2019) tarafından yapılan çalışmada Kıbrıs barajının sonlu elemanlar metoduyla incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Kıbrıs barajının bulunduğu Akdeniz havzasında büyük deprem görülmemesine rağmen çok sayıda deprem gerçekleştiği görülmüştür. İki senaryo ele alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. İlk yöntem olarak konvansiyel model kullanılmıştır ve ikinci yöntem olarak ise güncel veriler dikkate alınmıştır. İlk yönteme göre ikinci yöntemin PGA değerleri 2.5 kat daha fazla olarak bulunmuştur. Bu senaryolar olasılıksal esasta işletme bazlı deprem (OBE) ve maksimum tasarım depremi (MDE) için incelendiğinde birinci senaryoda, MDE için PGA değeri 0.477g olarak bulunmuştur. İkinci

senaryoda ise bu değerin 0.521g olduğu görülmüştür. Sismik değerlendirme dışında inşaat sonu hali ve işletme hali için şev stabilitesinde değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme de inşaat sonu hali için elde edilen veriler memba şevine ait güvenlik katsayıları daha yüksek olduğunu göstermiştir. İşletme halinde mansap şevine ait güvenlik katsayısı nispi olarak daha düşük olduğu görülmüştür. Barajın kritik kayma daireleri her iki yüzey içinde topuktan geçtiği tespit edilmiştir. Rezervuardaki su seviyesinin projede belirtilen maksimum su seviyesinden ve kapak üst seviyesinden minimum su seviyesine ani düşmesi sonucunda dolgu stabilitesinin davranışı ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kıbrıs barajının PLAXIS 2D programında yapılan analizler sonucunda kritik durumun deprem yükleme koşulunda olduğu görülmektedir. Analizde elde veriler yorumlandığında PGA değerlerinin oldukça yüksek olduğu ve k değerlerinin hesaplanmasında rasyonel olmayan sonuçlar ortaya çıktığı görülmüştür. Bu veriler ışığında şev stabilite analizlerinde güvensiz halinin deprem durumunda olduğu ortaya çıkmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanıralak MDE şartlarında oluşacak bir deprem etkisi altında düşey deplasman değerinin 3.15 cm olacağı ve memba topuğu ile kretin mansap yüzeyinde çekme çatlaklarının oluşacağı tahmin edilmektedir. Deplasman değerinin büyüklüğü ve oluşum şekillerinin yapının güvenliği açısından bir tehlike arz etmeyeceği belirtilmiştir.

Arslan (2019) tarafından yapılan çalışmada Köprübaşı Barajının oturma davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Phase2 v8.005 programında temel ve dolgu malzemesinin özellikleri, dolgu geometrisi, dolgunun inşa aşamaları, rezervuar yükleme koşulları gibi parametreler dikkate alınarak oluşturulan modelde analizler yapılmıştır. Analizlerde Köprübaşı barajının inşaat sonu hali ve su tutma durumundaki oturma değerleri doğrusal olmayan gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranış sergileyen bir dolgu malzemesi tanımlanmıştır. Dolgu malzemesinin tanımlanmasında Duncan-Chang hiperbolik malzeme modeli kullanılmıştır. Kil çekirdek malzemenin özelliklerinin tanımlanmasında üç eksenli basınç deneyinden elde veriler kullanılmıştır ve filtre ile kaya dolgu malzemelerinin tanımlanmasında ise literatür araştırmalarından yararlanılmıştır. Modelin oluşturulmasında barajın inşaat hali dikkate alınarak kademeli bir model oluşturulmuştur. Barajın inşasında yerleştirilmiş olan çapraz kollu çökme ölçerlerden elde edilen deformasyon verileri ile Phase2 v8.005 programında gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır ve bu sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Parıltan'ın (2019) yaptığı çalışmada çatlaklı beton ağırlık barajlarının bölgedeki yakın ve uzak fay hatlarında meydana gelebilecek bir deprem sonrasındaki baraj ile su etkileşimini de dikkate alarak barajın dinamik davranışını incelemiştir. Araştırma kapsamında Sarıyar beton ağırlık barajı araştırılmıştır. Seçilen baraj yüzeyinde zamanla oluşan çatlakların ölçümleri gerçekleştirilerek bu barajın çatlaklı ve çatlaksız durumu için SAP2000 programı ile modellenmesi yapılmıştır. Oluşturulan modeller adım-adım integrasyon tekniği ve Newmark metodu kullanılarak dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 4 farklı deprem kaydı kullanılmıştır, 1979 Imperial Valley depremine ait yakın fay yer hareket değeri 0.379 g ve uzak fay yer hareketi olan 0.179 g verisi ile 1989 Loma Prieta depremine ait yakın fay yer hareket değeri 0.48 g ve uzak fay yer hareketi olan 0.48 g verisinin ilk 20 saniyelerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda uzak fay yer hareketi etki ettirildiğinde iki deprem kaydı için de rezervuarın dolu veya boş olması durumu için çatlaklara sahip olan modelin çatlak olmayan modele göre krette daha büyük yer değiştirmelere sahip olduğu fakat bu yer değiştirmelerinin beklenenden küçük olduğu görülmüştür. Yakın fay yer hareketi etkisi altında yapılan analizlerde barajın kretinde rezervuarın boş veya dolu olması durumu için çatlaklı baraj modelinin çatlaksız baraj modeline göre daha büyük yer değiştirme ve gerilmelerin değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Yakın fay hattına ait yer hareketlerinde elde edilen sonuçlar uzak fay yer hareketine göre daha büyük değerler elde edilmiştir.

Jadid vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada tekrarlı su seviyenin düşmesi ve yükselmesinden kaynaklı sızıntının deformasyona olan etkisi araştırılmıştır. Analizlerde gerilme esaslı ve mukavemet azaltma yaklaşımına sahip olan PLAXIS 2D programı ve limit denge stabilitesini kullanan SLOPE/W yazılımı kullanılmıştır. Zemin özelliklerinin belirsizliği dikkate alınarak su baskını durumunda seddenin göçme performansı incelenmiştir. Gerilme esaslı analizlerde su baskının çevrim sayısı artıkça plastik kesme bölgesinde bir gelişim göstermektedir. Bu kayma gerilmelerinin birikimi performans limit durumun aşılma olasılığını artırmaktadır. Daha fazla çevrim eklendikçe kayma gerilmelerinin birinci çevrim ile altıncı çevrim arasında 3.5 kat artığı görülmektedir. Bununla birlikte yapılan limit denge analizinde su seviyesinin yükselmesi ve düşmesiyle birlikte stabilite faktörününde küçük değişimler gözlenmiştir. Zaman dikkate alınmadığı durumda ani düşü durumunda mansap hidrografına dayanan daha gerçekçi güvenlik faktörü elde

edilmiştir. Yapılan bu analizler sonucunda tekrarlı su seviyesinin değişiminin göçme riskini artığı görülmüştür.

Lin vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şev stabilitesinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Günümüzde şev stabilitesinde yaygın olarak iki boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır fakat ilişkilendirilmemiş akış kuralı ($\phi' \neq \psi'$) kullanıldığında, özellikle yüksek içsel sürtünme açısı ve düşük dilasyon açısına durumlar için Davis yöntemi kullanılarak düzeltilmektedir. Son zamanlardaki gelişmelerle birlikte iki boyutlu tasarımın yerini üç boyutlu tasarım almıştır fakat dilatasyon açısının etkileri nadiren tartışılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile dahili mukavemet azaltma tekniği ile PLAXIS 3D yardımıyla dilatasyon açısının etkilerinin incelenmesi amacıyla iki boyutlu modelin derinliği arttırılarak üç boyutlu bir model oluşturulmuştur. Yapılan analizlerde farklılık olduğu görülmüştür. Sonuçlar, üç boyutlu ve iki boyutlu modellerin dilatasyon açısından etkisi göz önüne alındığında stabilite üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan dikkate alınması gerektiği tavsiye edilmektedir.

Salem vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada konsol istinat duvarlarının sismik yük altındaki dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Sismik yükü simüle etmek için sekiz farklı deprem belirlenmiştir. Belirlenen deprem yükleri SHAKE2000 programında bir boyutlu bir sayısal hesaplama yapılarak ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirilen deprem yükleri PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında modellenen konsol istinat duvarına etki ettirilerek analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları sismik yükün toprak basıncının büyüklüğüne ve uygulama noktası açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yatay sismik atalet katsayısını temsil eden yanal sismik dolgu basıncı katsayısı arasındaki bağıntıyı ilişkilendirmek için bir ilişki önerilmiştir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi programları olan PLAXIS ve DEEPSOIL programları kullanılmıştır. PLAXIS programında iki boyutlu model kullanılırken, DEEPSOIL programında bir boyutlu bir model oluşturulmuştur. Model olarak Seyitgazi Gökbahçe Göleti göz önünde bulundurulmuş, dinamik yükler altında baraj tasarımı PLAXIS 2D de modellenmiş, davranışı kıyaslamak amacıyla baraj gövdesinden geçtiği varsayılan zemin kesiti üzerinde DEEPSOIL programı yardımıyla bir boyutlu analizler yapılmıştır. İki farklı programdan elde edilen analiz sonuçları, bölgeye

ait olası sismik etkiler altında baraj gövdesinde oluşabilecek en büyük ivme ve deformasyon miktarları bakımından kıyaslanmış ve programların performansı boyut etkisi bakımından araştırılmıştır.

3. YÖNTEM

Dinamik analizlerin gerçekleştirilmesinde sıklıkla bilgisayarlardan yararlanılmaktadır. Problemlerin tanımlanmasında kullanılan malzeme modelleri tanıtılmıştır ve bu çalışma kapsamına yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodu ile çözüm gerçekleştiren PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programlarında problemin modellemesi yapılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1. Malzeme Modelleri

3.1.1. Pseudo-statik analiz

Deprem yükü altındaki modellerle ilgili analitik yaklaşımlarda pseudo statik ve dinamik sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Pseudo-Statik analiz yöntemi istinat duvarları, barajlar, tüneller, setler gibi çeşitli inşaat yapılarının analizinde kullanılmaktadır. İnşaat yapısının geometrisine ve sorunun türüne bağlı olarak kuvvet temelli analiz veya deformasyon temelli analiz olarak iki farklı yaklaşım türü vardır.

Kuvvet temelli analiz, sismik yüklerin etkisindeki atalet kuvvetlerinin yapıya artımlı olarak uygulanan sabit bir cisim kuvveti olarak benzetilebilir. Pseudo-Statik sismik katsayının göçme bölgesinin kütlesi ile çarpılmasıyla Denklem 3.1 ve 3.2'de gösterilen yatay (F_h) ve dikey (F_v) cisim kuvvetleri elde edilir. Kuvvet temelli analiz yönteminin amacı modelin göçmesine neden olacak olan kritik ivme değerinin bulunması ya da tasarım ivme değeri için güvenlik katsayısının belirlenmesidir.

$$F_h = k_h W \tag{3.1}$$

$$F_v = k_v W \tag{3.2}$$

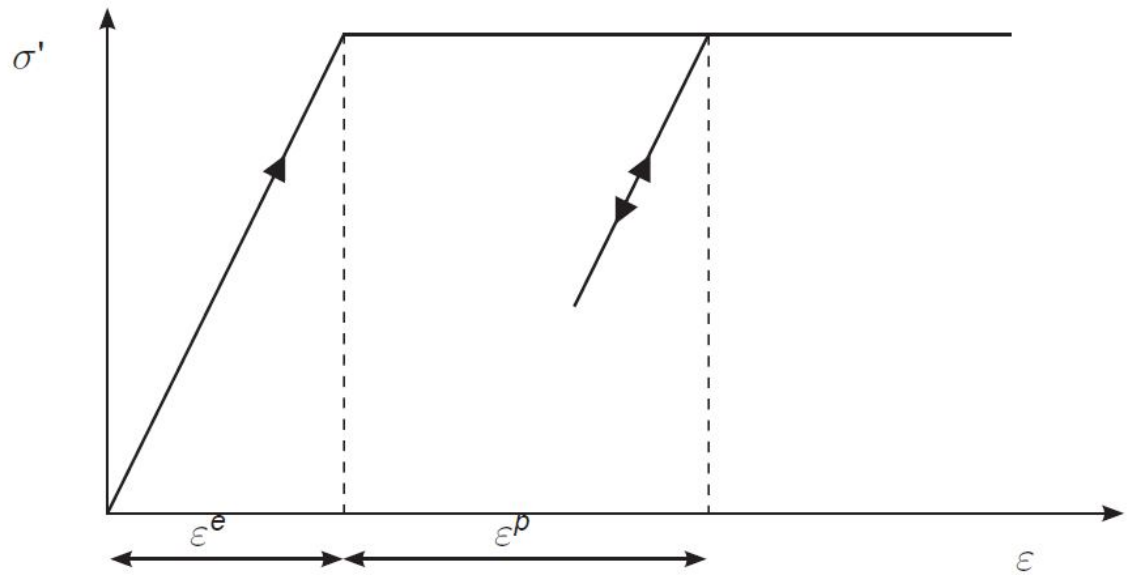
Deformasyon temelli analiz, basit kesme koşullarına maruz bırakılan modelin birim yer değiştirme (u_s) ve üçgen deformasyon dağılımı modelin üst ve yan sınırı boyunca uygulanır. Yer değiştirmenin hesaplanabilmesi için ilk önce ilgili modele karşılık gelen

seviyedeki maksimum serbest-alan kayma gerilmesi (γ_{ff}) belirleyen bir yer tepki analizi yapılır.

Deformasyona dayalı analizde tabakaların zamana bağlı bir dinamik etki altında yer tepki analizi dikkate alınarak işlem yapıldığından sismik yükleri daha gerçekçi olarak simüle edilir. Bununla birlikte bu yaklaşım türü sadece basit kayma koşullarında uygulanması mümkün olduğu için sadece bu tür problemlerin çözümünde kullanılabilir. Ayrıca kritik ivme değerinin bulunması ya da tasarım ivme değeri için güvenlik katsayısının belirlenmesinde bu yaklaşım kullanılamaz. Bu nedenle pseudo-statik analizde genellikle kuvvet temelli analiz yaklaşımı kullanılmaktadır.

3.1.2. Mohr Coulomb

Zeminler maruz kaldıkları gerilmeler altında doğrusal olmayan birim şekil değiştirmeler gösterir. Mohr Coulomb modeli malzemenin basit doğrusal elastik davranış daha sonrada mükemmel plastik davranış gösterdiği varsayılan modeldir. Mohr Coulomb modelin elastik kısmı Hooke'un izotropik esneklik yasasına dayanmaktadır, plastik kısmı ise Mohr Coulomb göçme kriterine dayanmaktadır. Mohr Coulomb modeline ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3.1'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Mohr Coulomb modeline ait gerilme birim şekil değiştirme grafiği

Mohr Coulomb modelini daha iyi değerlendirmek için gerilme ve birim şekil değiştirmeye bağlı bir göçme fonksiyonu olan f'i tanımlayacak olursak Denklem 3.3'te gösterilen f fonksiyonun plastik bölgede 0'a eşit olmasını bekleriz.

$$f_s = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')sin\phi - c\ cos\phi \tag{3.3}$$

Mohr Coulomb modelinin uygulanabilmesi için zemin numunelerinde elde edilebilecek beş parametre gereklidir. Bu parametreler Young modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısıdır. PLAXIS içerişinde Young modülü yerine diğer sertlik parametreleri olan kayma modülü (G) ve oedometre modülü (E_{oed})'de kullanılabilir.

Dinamik yükleme ya da çevrimli yükle altında Mohr Coulomb modeli göçme kriterlerine ulaşırsa hesaplamalarda sönümlemeye yol açacak plastik gerilmeler oluşturabilir. Mohr Coulomb göçme sınırındaki gerilme döngülerinin sadece elastik gerilmeler üreteceği ve ne sönümlemeye ne de gerilme yığılmalarına, boşluk suyu basıncına veya sıvılaşmaya neden olmayacaktır. Çevrimli yüklemede zeminin sönümleme özelliklerini simüle etmek için Rayleigh sönümlemesi tanımlanabilir.

PLAXIS dinamik yük etkisi altında kalacak modellerde HS Small malzeme modelinin kullanılmasını önermektedir, ayrıca problemde modellenecek yapının türüne göre de bazı tavsiyelerde bulunmaktadır. Yapı türüne göre kullanılacak olan malzeme modeli Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

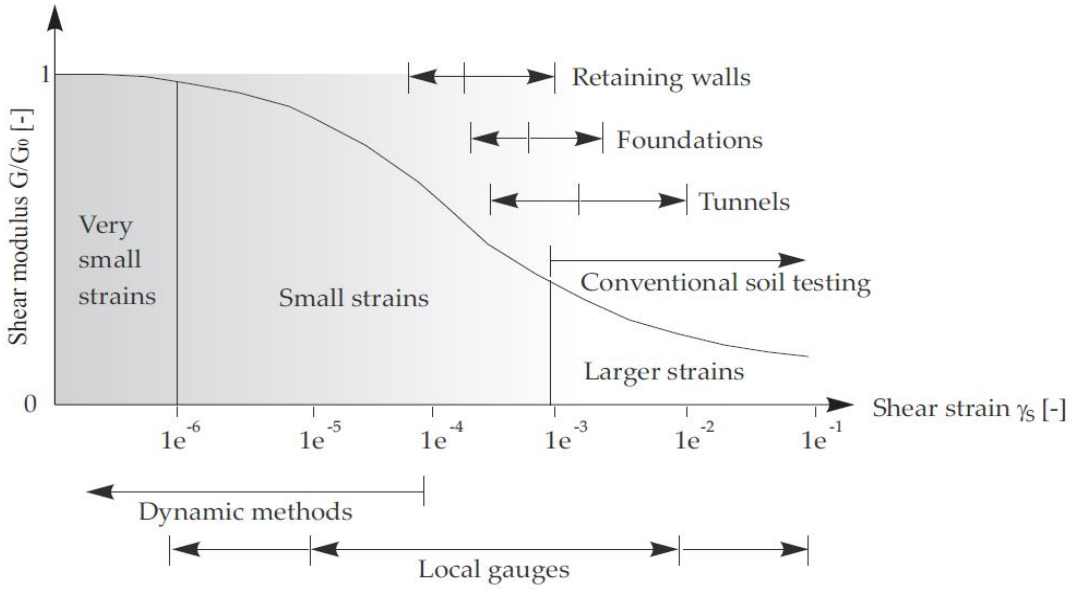
Çizelge 3.1. Uygulama tiplerine göre model yaklaşımları

Model	**Temeller**	**Hafriyat**	**Tünel**	**Dolgu**	**Şev**	**Baraj**	**Kıyı Yapıları**
Mohr Coulomb	Basit yaklaşım	Basit yaklaşım	Basit yaklaşım	Basit yaklaşım	Basit yaklaşım	Basit yaklaşım	Basit yaklaşım
HS Small	En iyi yaklaşım	En iyi yaklaşım	En iyi yaklaşım	En iyi yaklaşım	En iyi yaklaşım	En iyi yaklaşım	En iyi yaklaşım

3.1.3 HS Small Model

Hardening Soil modeli tekrarlı yükleme ve boşaltma sırasında zeminin elastik davranış gösterdiğini varsayarak analizi gerçekleştirmektedir. Zeminin tamamen elastik olarak kabul edildiği gerilme aralığı çok küçüktür. HS Small modeli zeminlerin düşük gerilme altında göstermiş olduğu yüksek sertlik sorunun çözülmesi için kullanılmaktadır. Bu iki model içinde aynı parametreler kullanılmaktadır ancak HS Small modeli için ek olarak iki tane sertlik parametresi tanımlanmaktadır. Başlangıç veya çok küçük kayma gerilmesi modülü G_0 ve sekant kayma modülü G_s'nin G_0'ın %70 oranında azalmasını gösteren kayma gerilmesi birim deformasyon değerini ifade eden $\gamma_{0.7}$ parametreleri HS Small modelin ek parametre değerleridir.

Zeminin sertliğini temsil eden karakteristik eğri vardır. Gerilme genliğinin artmasıyla birlikte zeminin sertliği Şekil 3.2'de görüldüğü gibi doğrusal olmayan davranış sergilemeye başlar ve ortaya çıkan bu eğri zeminin karakteristik eğrisi olarak adlandırılmaktadır.



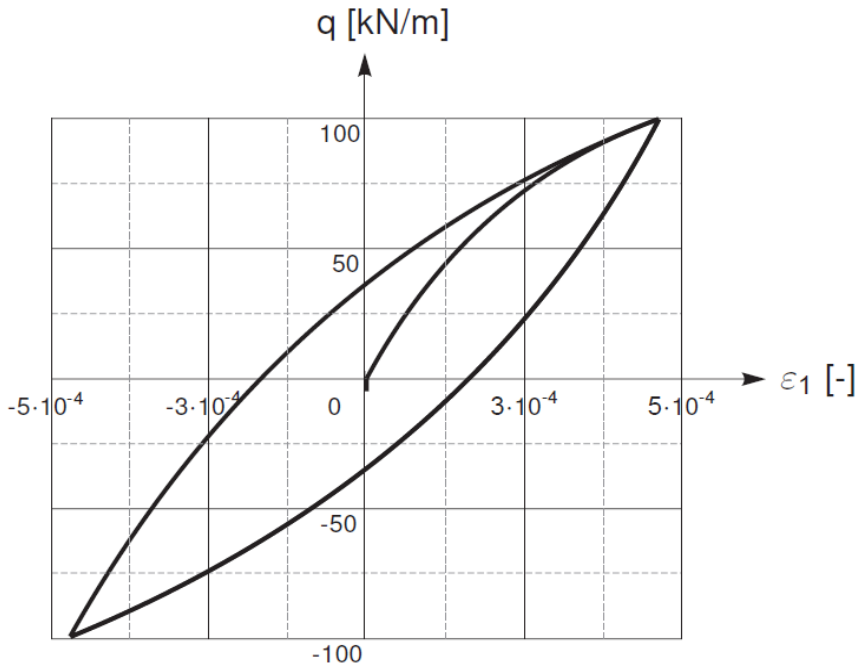
Şekil 3.2. Zeminin sertliği karakteristik eğrisi (PLAXIS 2D, 2019)

Çok küçük gerilmelerdeki kayma modülü olan G_0^{ref} hesabında tekrarlı yükleme ve boşaltma için poisson oranı olan ν_{ur} sabit olarak kabul edildiğinden Denklem 3.4'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$G_0^{ref} = \frac{E_0^{ref}}{2 \times (1 + \nu_{ur})} \tag{3.4}$$

Döngüsel yükleme altında HS Small modeli histerezis davranış gösterir. Histerezis miktarı gerilme genliği ile doğrudan ilişkilidir. HS Small modeli dinamik yüklemelerde kullanıldığında histerik davranışın sönümlenmesine yol açar. Problemde uygulanan yükün genliğine ve bu genliğe karşılık gelen gerilme genliğine bağlıdır. HS Small modelinde maksimum histeretik sönüm oranının elde edilmesi G_0 ve Denklem 3.5'te gösterilen Gur oranına bağlıdır. Bu oranı ile sönüm oranı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

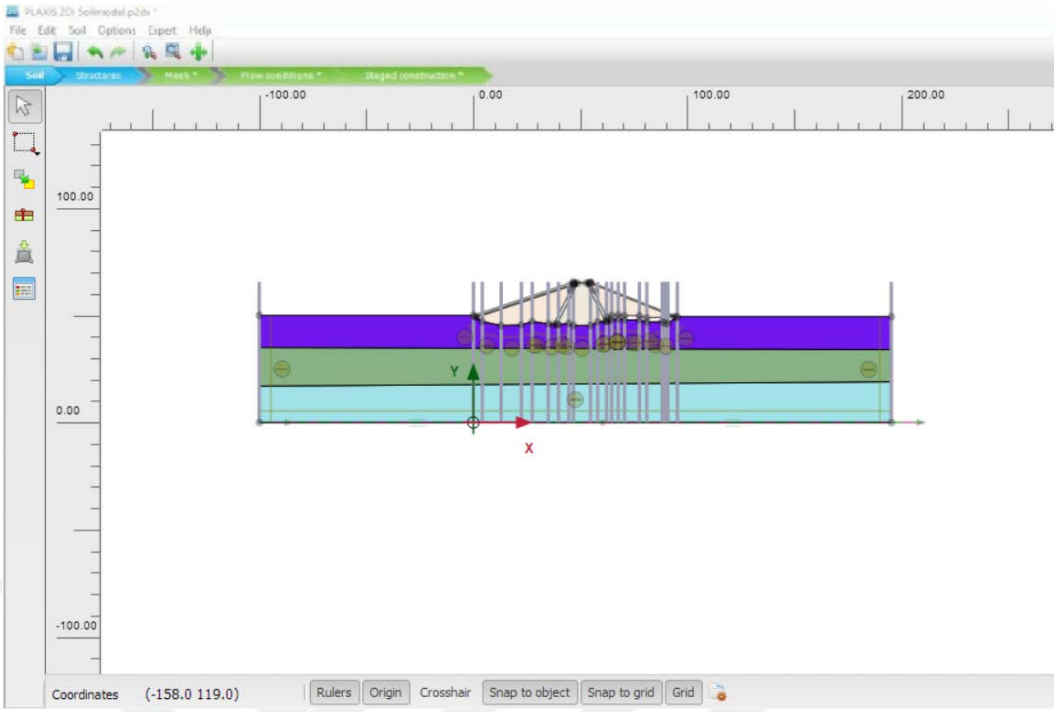
$$G_{ur}^{ref} = \frac{E_{ur}^{ref}}{2 \times (1 + \nu_{ur})} \tag{3.5}$$



Şekil 3.3 Histeretik malzeme davranışı (PLAXIS 2D, 2019)

3.2. PLAXIS 2D'in Tanıtılması

1970'lerin sonlarında geoteknik tasarımlarda sonlu elemanlar yönteminin kullanılmanın yaygınlaşmaya başlamasından dolayı Delf Teknoloji Üniversitesi'nde bu konuyla ilgili araştırma yapılmaya başlanmıştır. Bu araştırmanın ilk projesi basit kum deformasyon problemlerinin düzlem gerilme değerlerinin elde edilmesine yönelik olmuştur. Daha sonra PLAXIS adlı sonlu elemanlar programına çok çeşitli özellikler eklenerek programın kabiliyetleri artırılmıştır. Delft Teknoloji Üniversitesi ve araştırmaya destek veren diğer üniversitelerle birlikte devlet kurumları ve ticari şirketler tarafından bu araştırma desteklenerek 1987 yılında yazılım başarılı bir şekilde kullanıma sunulmuştur. Yıllar içerisinde PLAXIS'e gelen sürüm güncellemeleriyle birlikte kiriş eleman, konsolidasyon modülü, geliştirilmiş mesh yapısı ve yeraltı suyu modülleri, yumuşak zemin modelleri, tüneller ve sert zemin modeli gibi özellikler programa dahil olmuştur. PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D ismiyle iki farklı yazılımı bulunmaktadır. Akış, dinamik ve termal olmak üzere üç farklı modeli bulunmaktadır. PLAXIS programın iki versiyonu da doğrusal olmayan malzeme modeli tanımıyla dinamik analiz imkânı sağlamaktadır. Bahsedilen programdan alınan bir ekran görüntü Şekil 3.4.'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere zemin, yapı, ağ yapısı, akım ve aşamalı inşa ana sekmelerinden oluşur.



Şekil 3.4. PLAXIS programından bir görüntü

3.2.1. Model

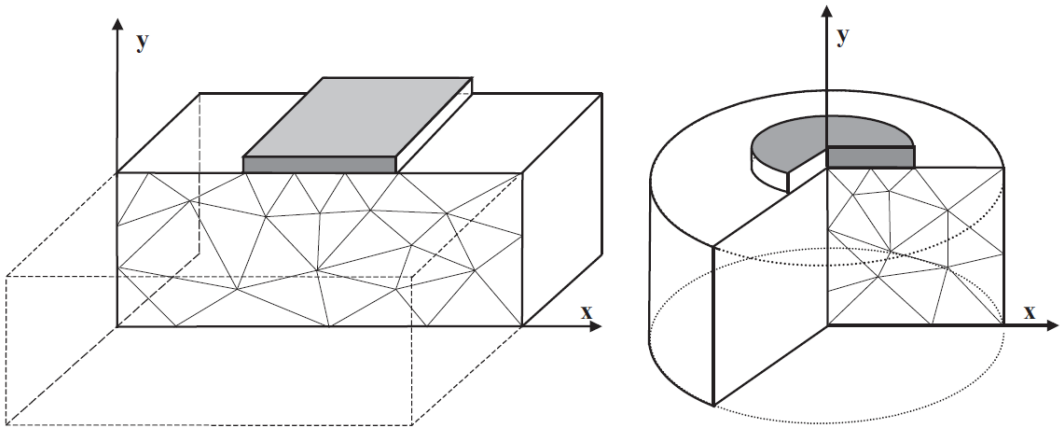
PLAXIS 2D veri giriş kısmı ve sonuçlar kısmı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Giriş kısmında zemin, yapı, ağ yapısı, akış koşulları ve yapım aşamaları adında beş alt başlık bulunmaktadır. Proje oluşturulma işlemine başlamadan önce projenin sahip olacağı temel parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Programın kullanacağı birimler, çalışma alanının boyutları, model tipi ve sonlu eleman tipinin proje özellikleri kısmında tanımlanması ile projenin oluşturulmasına başlanır. Model tipi bölümünde iki farklı model tipi bulunmaktadır, bu model tipleri düzlemsel gerilme ve eksenel simetrik olarak isimlendirilmiştir.

3.2.1.1 Düzlemsel gerilme

Düzlemsel gerilme, belirli bir model derinliği (z ekseni) boyunca aynı en kesite sahip yapıların modellenmesinde kullanılmaktadır. Z ekseni boyunca yer değiştirmelerin ve gerilmelerin sıfır olduğu kabulünü yapar, bununla birlikte z yönündeki normal gerilmeler dikkate alır. Deprem problemlerinde dinamik yükleme modelin altı boyunca uygulanmaktadır ve uygulanan deprem dinamik yükünün oluşturduğu kayma dalgaları yukarı doğru yayılmaktadır. Eğer deprem problemi çözülecek ise bu model tipinin kullanılması tavsiye edilmektedir.

3.2.1.2. Eksenel gerilme

Eksenel simetrik model tipinin kullanılacağı yapıların geometrileri düzgün dairesel kesite ve yüklemeye sahip olması gerekmektedir. Düzlemsel gerilme ve eksenel simetrik model tipine ait model örnekleri Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.5. (a) Düzlemsel gerilme ve (b) eksenel simetrik model örnekleri

Bu model tipi seçildiğinde x ekseni yarıçapı, y ekseni ise döndürülme eksenini temsil etmektedir. Tek kaynaklı titreşim problemlerinde bu model tipinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Bunun nedeni ise eksenel simetrik bir modelde dalgaların üç boyutlu modele benzer bir yayılım davranışı göstermesinden kaynaklıdır. Titreşim kaynağından uzaklaştıkça dalgalarda sönümleme olacaktır ve bu durumun en iyi şekilde modellenebilmesi için eksenel gerilme model tipinin kullanılması gerekmektedir.

3.2.1.3. Düğüm Noktası

Model tipi belirlenen projenin sonlu eleman tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Sonlu eleman tipinin belirlenmesinde ise iki farklı seçim olanağı sunulmuştur. Bunlar; 15-düğüm noktası ve 6-düğüm noktasına sahip yapılardır.

15-düğüm, zemini ve geometriyi oluşturan üçgen parçalarının içerisinde ve sınırında 15 adet düğüm noktası ve gerilme noktası oluşturmaktadır.

6-düğüm seçeneğinde ise 6 adet düğüm noktası ve gerilme noktası otomatik olarak oluşturulmaktadır.

Bu seçimlere ait örnekler Şekil 3.6.'da gösterilmiştir. Düğüm sayısının ve gerilme noktasının arttırılması problemin gerçeğe daha yakın sonuç vermesi sağlayacağı için daha çok düğüm ve gerilme noktası oluşturan sonlu eleman tipinin seçilmesi tavsiye edilmektedir.



(a) 15 düğümlü üçgen



(b) 6-düğümlü üçgen

Şekil 3.6. (a) 15 düğümlü üçgen, (b) 6-düğümlü üçgen örnekleri (PLAXIS 2D, 2019)

3.2.2. Proje

Proje boyutları girildikten sonra programın ilk kısmı olan zemin kısmına geçilir. Zemin kısmında sondaj kuyuları tanımlanarak model geometrisinin temelini oluşturacak olan zemin tabakalarının tanımlanması bu kısımda yapılmaktadır. Düzgün bir tabakalanma varsa bir adet sondaj kuyusu tanımlanabilir veya birden fazla sondaj kuyusu oluşturularak zemin tabakalarının eğimli ya da düzgün olmayan bir tabakalanma oluşturulabilir. Zemin profili tanımlandıktan sonra yer altı su seviyesi varsa yer altı su seviyesi, bu kısım içerisinde oluşturulur. Ayrıca zeminin malzeme özellikleri de bu kısımda tanımlanmaktadır. Zemin kısmındaki işlemler tamamlandıktan sonra diğer kısım olan yapı

kısmına geçilir ve burada zemin üzerine yapılacak bir yapı varsa onun modellenmesi gerçekleştirilerek modelde kullanılan malzemelerin tanımlanarak oluşturulan modele atanması bu kısımda gerçekleştirilir. Böylelikle zemin ve model geometrisinin oluşturulması tamamlanmıştır.

Sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesi için oluşturulan geometrilerde ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. PLAXIS 2D yazılımında ağ yapısı çok ince, ince, orta, kaba ve çok kaba olmak üzere beş farklı büyüklükte oluşturulmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı ne kadar sık olursa işlem sonucu o kadar doğru olmakla beraber analiz süresi de uzamaktadır. Bu yüzden modelde probleme en uygun ağ yapısı oluşturulduktan sonra analiz sonuçlarının en doğru şekilde elde edilmesi için bölgesel olarak ağ yapısında iyileştirme yapılması tavsiye edilmektedir. Böylelikle analiz süreci kısalacaktır ve problemin çözümünde gerçeğe yakın sonuçlar elde edilecektir.

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra problemde eğer su yükü ya da su seviyesinde değişim varsa akış koşulları kısmında farklı durumlar tanımlanır. Yapı inşasından önce ve sonrasında oluşacak durumları bu kısım içerisinde oluşturulacaktır. Akış koşulları kısmında probleme uygun durumlar oluşturulduktan sonra giriş kısmının son kısmı olan yapım aşamalarına geçilir. Burada kademeli olarak inşa yapılacaksa sırasıyla o inşa durumları ve analiz koşulları tanımlanır. Böylelikle analizi yapılacak olan farklı faz durumları tanımlanmış olur ve analiz işlemine geçilir. Modelin tanımlanması ve statik yükler altındaki davranışının incelenmesinin yanında dinamik yükler de burada tanımlanarak dalga hareketinin profil boyunca değişim analizi yapılabilir. Parametre ve malzeme davranış seçimleri çok büyük önem taşımaktadır ve analizleri çok büyük boyutlarda etkileyebilir. Bu sebeple kullanılan değerlerin doğrulundan emin olunmalıdır.

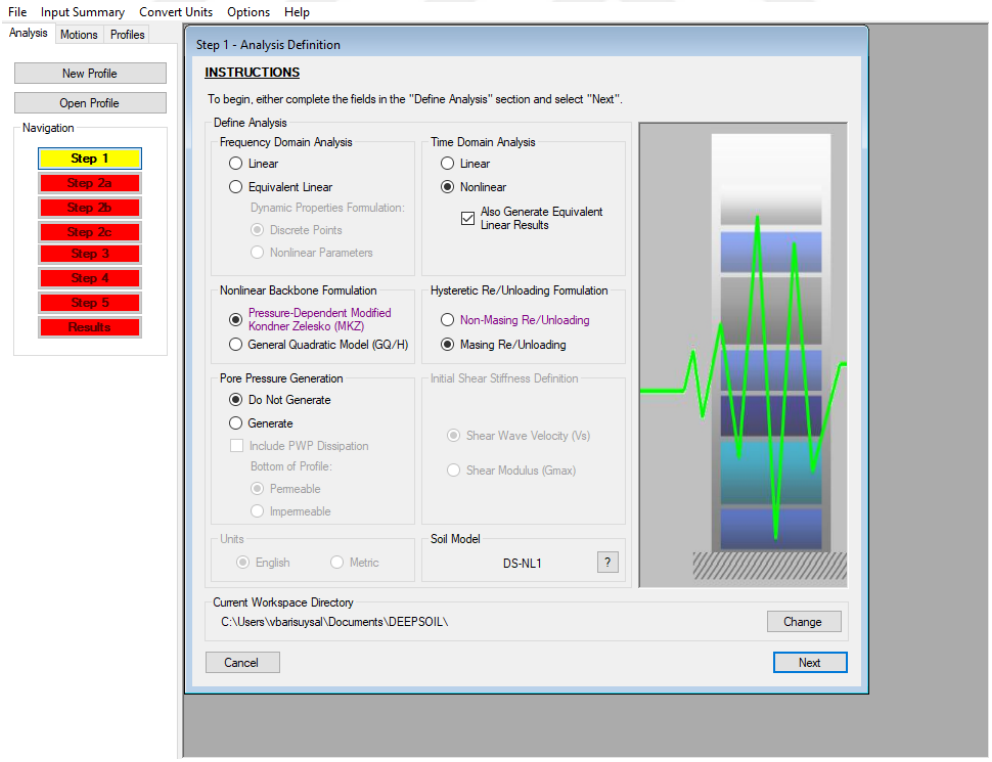
3.3. DEEPSOIL'in Tanıtılması

DEEPSOIL programı Youssef Hashash vderleri tarafından geliştirilmiştir (Hashash,Y.,2016). DEEPSOIL programı bir boyutlu geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan sonlu eleman programlarından bir tanesidir. Program eşdeğer lineer analiz, non-lineer analiz seçeneklerini kullanıcılarına sunmaktadır. Bu analizler frekans ve zaman tabanlı olarak yapılabilir. Analizin tanımlanması, model özellikleri ve zemin profil tanımlanması, sonuç ve hareket seçimi, viskoz sönümleme zamana ve frekans bölgesine bağlı tanımlamalar, analiz kontrol parametreleri ve sonuçlar isimli altı ana başlık altında problemin çözüm aşamalarını yapmaktadır.

Problemin çözüm aşamalarının ilki olan analiz tanımında eşdeğer lineer analiz, evrişim vasıtasıyla frekans bölgesi ters analiz ve non-lineer analiz tipinden problemimize uygun olanın seçilmesi ile işleme başlanacaktır. Buradaki analiz tipleri;

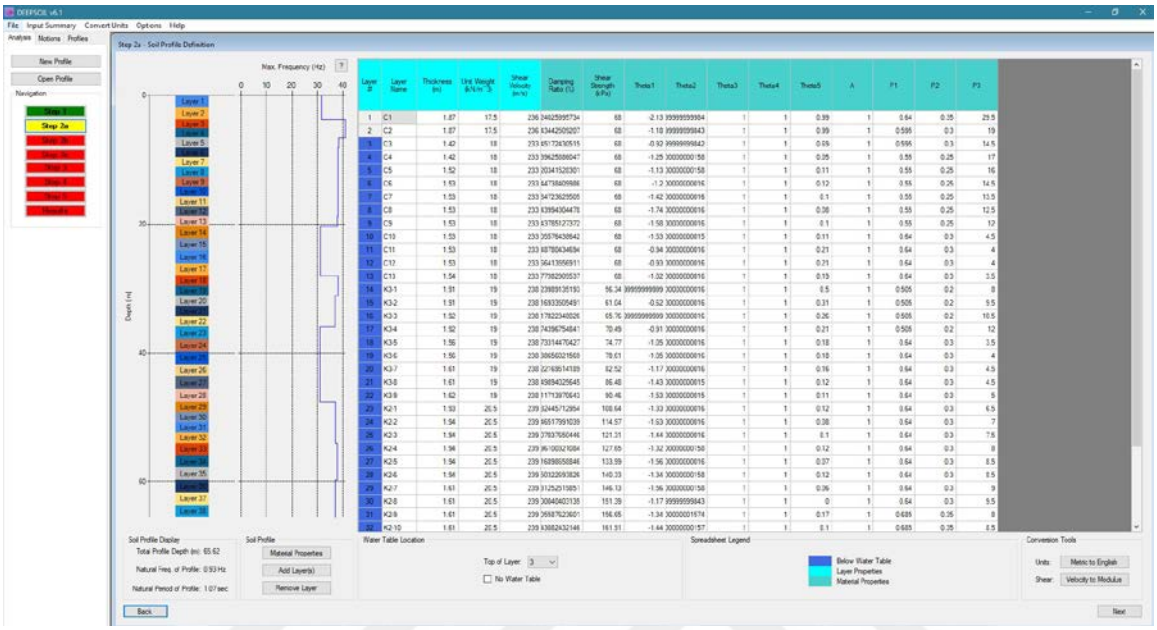
Eşdeğer lineer analiz, SHAKE programının yaptığı gibi zemin özelliklerinde tanımlanan kayma modülü ve zeminin sönümleme oranının iteratif yöntem kullanılmaktadır. Zeminin tanımlanan özellikleri sayesinde bağımsız noktalar oluşturarak ya da malzeme özellikleri yardımıyla bir non-lineer modelinin eğrisini kendisine destek alarak tanımlamalar gerçekleştirmektedir. Bu analiz türünde normalize edilmiş kayma modülü ve sönümleme oranı kullanılarak kayma gerilmesi birim deformasyonunun yüzde değerini ile kurduğu ilişki ile çözümleri gerçekleştirilmektedir.

Non-lineer analiz zamana bağlı hareket denklemlerinin çözümünde Newmark β yöntemi kullanılarak çözüm elde edilir. Bu analizin yapılmasında ortamda boşluk suyu basıncının olup olmamasının bir engel olmamakla birlikte çeşitli zemin modellerine de uygulanmaktadır.



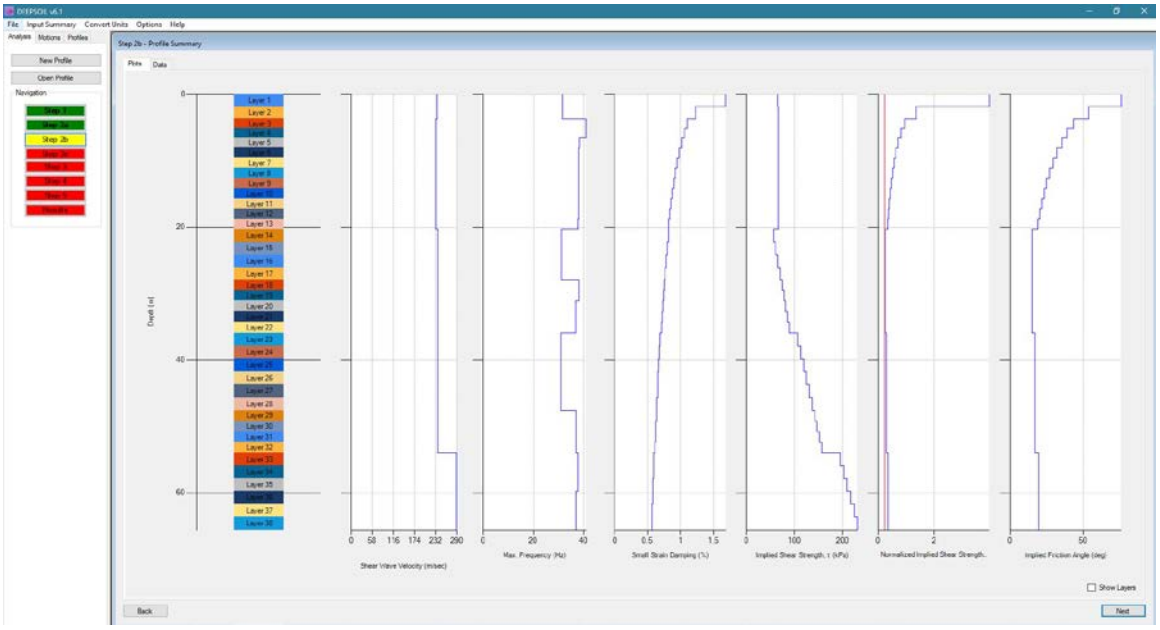
Şekil.3.7. DEEPSOIL programından bir görüntü

İkinci aşama olan model özellikleri ve zemin profillerinin tanımlanması kısmında ise problemde yer alan zemin tabakalarının kalınlıkları ve yer altı su seviyesi ile malzemelere ait özellikler Şekil 3.8.'deki gibi programa girilir.



Şekil 3.8. DEEPSOIL programında model özellikleri ve zemin profili

Modellenen zemin profilline girilen zemin özelliklerine göre profilin sahip olduğu kayma dalgası hızı ve maksimum frekans gibi özet bilgilerin yer aldığı grafikler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. DEEPSOIL profil özet grafikleri

Zemin tabakalarının kalınlıkları belirlenirken DEEPSOIL programının önermiş olduğu 25-50 Hz frekans aralığında tutulmasına dikkat edilmelidir. Tabaka kalınlığının hesabında kullanılan formül Denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$f_{max} = \frac{4V_s}{H} \tag{3.1}$$

V_s: Kayma dalgası hızı

H: Zemin tabakasının kalınlığı

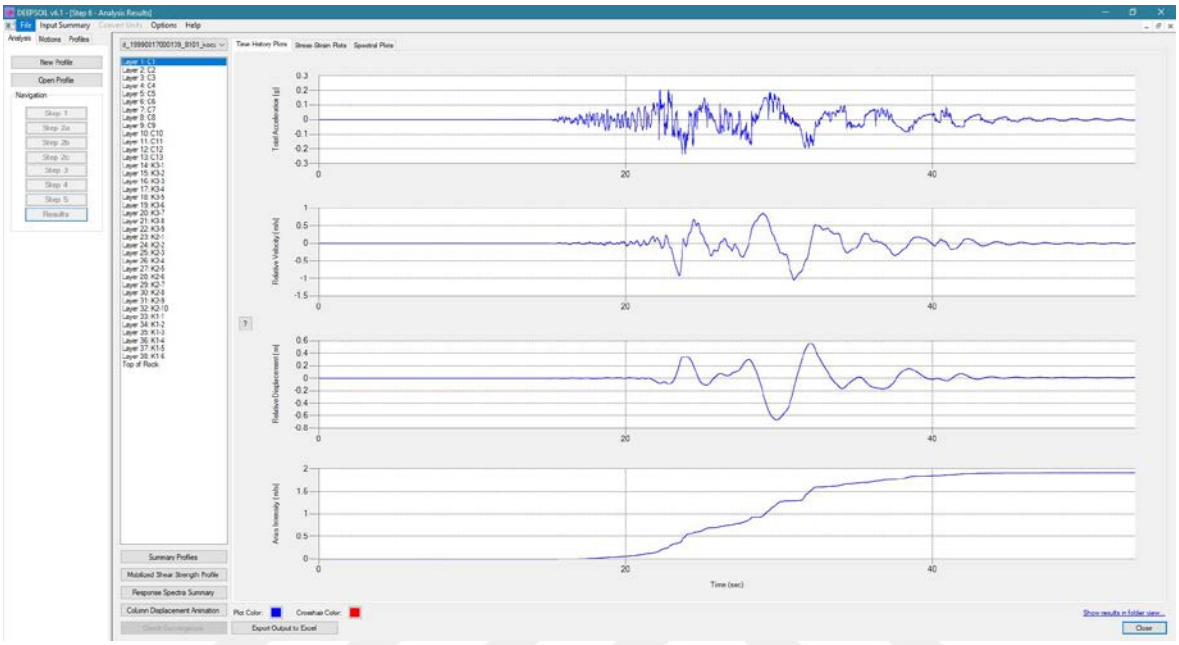
Bu kısım içerisinde malzemenin dinamik özellikleri kullanıcı tarafından belirlenir. Ya program tarafından sunulan eğriler kullanılabilir (Vucetic and Dobry, Darendeli, gibi) ya da tasarımcının deneysel ya da matematiksel modellerle hesapladığı eğriler manuel olarak girilebilir. Analizler kapsamında Darendeli (2001) modelleri kullanılmıştır. Son olarak ana kaya özelliği seçilerek diğer aşamaya geçilir.

Bir sonraki aşamada hareket ve bu hareketin etkisindeki hangi zeminlerin sonuçlarının görüleceği belirlenir. Yapılan çalışmada daha önceden programa tanıtılan deprem ivme kayıtlarının seçilir ve bu seçilen deprem ivme kaydının bütün zemin tabakalarındaki sonuçlarının görüleceğini belirlenir.

Dördüncü aşamada daha önceden seçmiş olduğumuz analiz tipine göre kullanacağız sönümleme oranlarının belirleneceği bir ekran karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada non-lineer analiz kullanacağımız için DEEPSOIL'inde önerdiği frekanstan bağımsız matris tipinin kullanılmasını programa tanıtarak beşinci aşamaya geçilir.

Bu aşamada frekans ve zaman bölgelerinin tanımı yapılır. Programın çözümü elde etmek için kullanacağı iterasyon adımı ile frekans bölgesindeki efektif kayma gerilmesinin oranı, kompleks kayma modülü formülü ve zaman bölgesindeki adım kontrolü, zaman tanım alanı yaklaşım metodunun türü belirlenir.

Son aşama olan sonuç değerlerinin görüleceği aşamaya geçilerek analiz işlemine başlanır. Analiz sonucunda elde edilen veriler bu ekranda görülmektedir. Böylelikle DEEPSOIL programında problemimizin non-lineer analizini gerçekleştirilmiş olur.



Şekil. 3.10. DEEPSOIL programının analiz sonuç ekranı

4. DEPREM VERİLERİNİN ÖZELLİKLERİ

4.1. Analiz İçin Deprem Verisinin Seçilmesi

Baraj gövdesinin projelendirilmesinde stabilite analizleri, gerilme ve deplasman analizleri, sızma analizleri ve dinamik analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın konusu olan sismik stabilite analizi dinamik analizler kısmında yer almaktadır.

Bir barajın dinamik analizi gerçekleştirildiğinde oluşabilecek bir depremin baraj gövdesi ve temelinde meydana getireceği davranışı incelenmektedir. Dinamik analizin yönteminde deprem yükünün seçilmesi büyük önem taşımaktadır. 18/03/2018 tarihinde Resmî Gazete'de yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği bu çalışmada deprem verilerinin seçilmesinde örnek teşkil etmektedir. Yönetmeliğin 2.5.1.3 bölümünde belirtilen "Bir veya iki boyutlu hesap için seçilecek deprem kayıtlarının ve üç boyutlu hesap için seçilecek deprem kaydı takımlarının sayısı en az on bir olacaktır. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecektir." açıklama dikkate alınarak çalışmada 11 farklı deprem yer hareketi takımı kullanılmıştır. Deprem kayıtları ülkemizde ve yurtdışında gerçekleşen büyüklüğü 6.0 üzeri olan 11 deprem seçilmiştir. Seçilen depremler Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Seçilen deprem takımı bilgileri

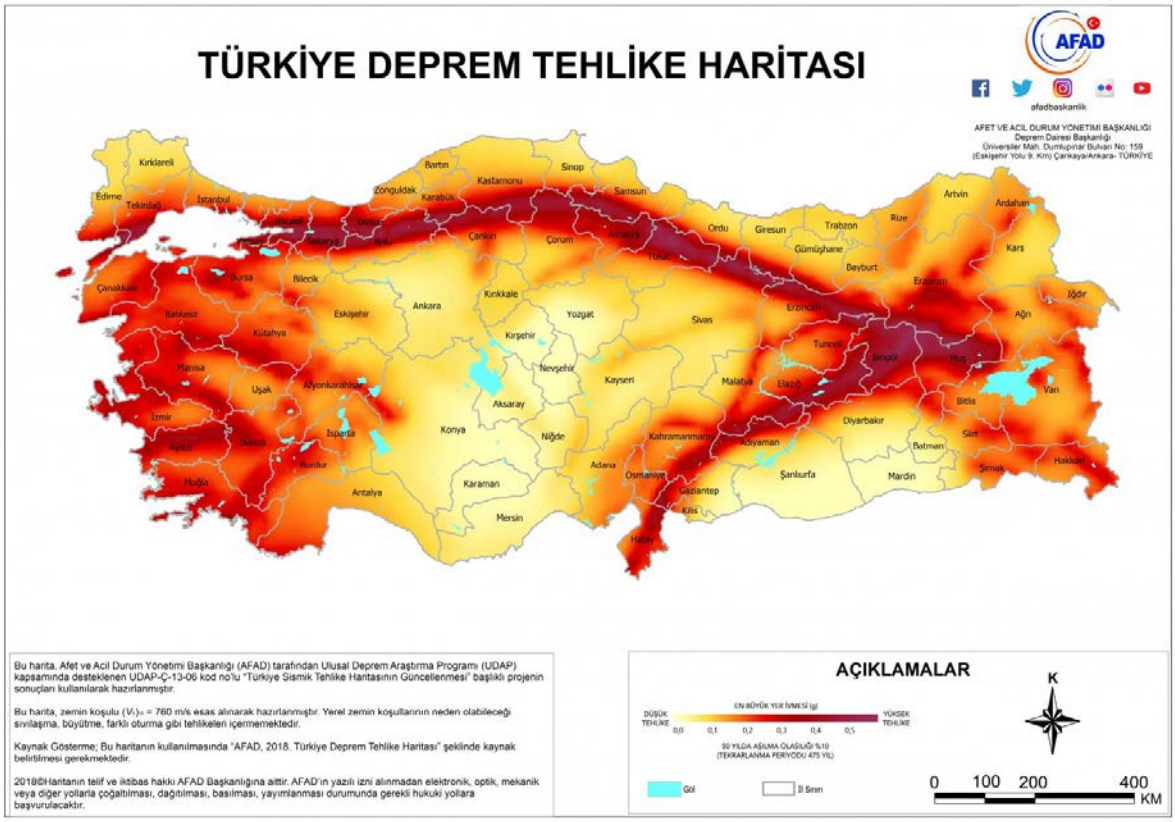
Oluşum Yeri	Oluşum Tarihi	Depremin Büyüklüğü	Bölgesi	Fay Mekanizması
Afyon	01.10.1995	6.0 M	Türkiye	Normal Fay
Chi-Chi	21.09.1999	7.62 M	Taivan	Ters Fay
Düzce	12.11.1999	7.2 M	Türkiye	Yanal Atımlı Fay
Erzincan	13.03.1992	6.1 M	Türkiye	Yanal Atımlı Fay
Erzurum	30.10.1983	6.0 M	Türkiye	Yanal Atımlı Fay
Hector Mine	16.10.1999	7.1 M	Amerika	Yanal Atımlı Fay
Kobe	17.01.1995	6.9 M	Japonya	Yanal Atımlı Fay
Kocaeli	17.08.1999	7.4 M	Türkiye	Yanal Atımlı Fay
Loma Prieta	17.10.1989	6.9 M	Amerika	Ters Fay
Northridge	17.01.1994	6.7 M	Amerika	Ters Fay
Van	23.10.2011	6.7 M	Türkiye	Yanal Atımlı Fay

4.2. Spektral İvme Verisinin Değerlendirilmesi

Deprem takımı belirlendikten sonra barajın yapılacağı bölgeye göre Türkiye Deprem Tehlike Haritaları'na göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Mevcut harita AFAD'ın sayfasında yayınlanmış olup seçilecek bölgeye ait hesapta kullanılacak veriler belirtilmiş olup, haritanın genel görünümü Şekil 4.1'de sunulmuştur. Bu ölçeklendirilmenin yapılması için öncelikle deprem yer hareket düzeyinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde yer alan dört farklı yer hareketi dikkate alınmalıdır. Bu deprem yer hareket düzeylerinin 50 yılda aşılma olasılıklarına bağlı olarak yönetmelikteki tanımlanmaktadır ve detaylar Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Deprem yer hareket düzeyleri

Deprem Düzeyi	Aşılma olasılığı (%)	Tekrarlanma Periyodu
DD1	2	2475
DD2	10	475
DD3	50	72
DD4	68	43



Şekil.4.1 Türkiye deprem tehlike haritası

Deprem hareketi düzeylerinin yanında Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nda dikkate alınan bir diğer parametre ise yerel zemin sınıfıdır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde yer alan altı farklı yerel zemin sınıf yer almaktadır. Bu yerel zemin sınıflarına ait özellikler Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Yerel sınıfın belirlenmesinde 3 parametrenin önemi ortaya çıkmaktadır. Yüzeyden başlamak üzere ilk 30 m'lik zemin profilinin ortalama

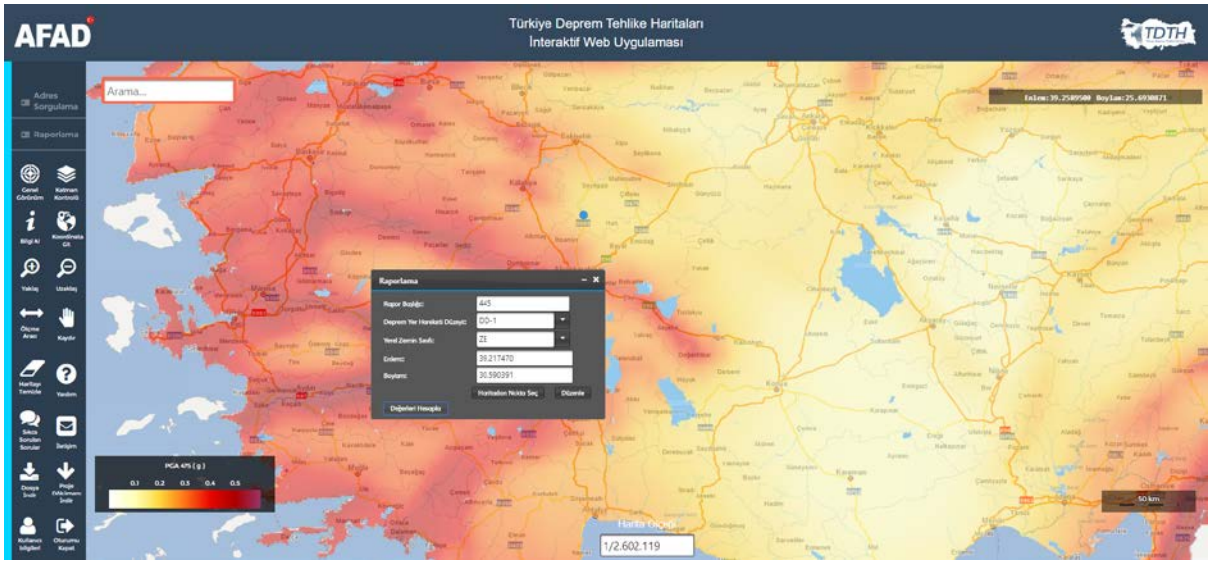
- kayma dalga hızı $(V_s)_{30}$,
- düzeltilmiş darbe sayısı $(N_{60})_{30}$ ve
- drenajsız kayma mukavemeti $(C_u)_{30}$

değerleri zemin sınıfı için fikir vermektedir.

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_S)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(C_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 - 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 - 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 - 360	15 - 50	70 - 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya PI > 20 ve w > % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (C_u < 25 kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler : 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI > 50) killer , 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Şekil 4.2. Yerel zemin sınıfları (AFAD, 2020)

Eskişehir ilin Seyitgazi ilçesine yapılması planlanan Gökbahçe Göleti'nin deprem yer hareket düzeyi DD-1 ve yerel zemin sınıfı ZE seçilerek göletin koordinatı olan 39.092401 enlemi ve 30.574479 boylamındaki nokta için AFAD'tan alınan rapor doğrultusunda en büyük yer ivmesi olarak 0.469g değeri alınmıştır. Şekil 4.3.'te bölgeye ait değerlerin elde edilmesi sunulmaktadır. Bu değer kullanılarak daha önceden seçilen deprem kayıtları ölçeklendirilmiştir.



Şekil 4.3. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları'ndan bölgeye ait spektrum değerlerinin elde edilmesi

AFAD'tan alınan raporda kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (Ss), 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S1), en büyük yer ivmesi (PGA) ve en büyük yer hızı verileri elde edilmiştir ve bu veriler Çizelge 4.3.'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. AFAD çıktısı

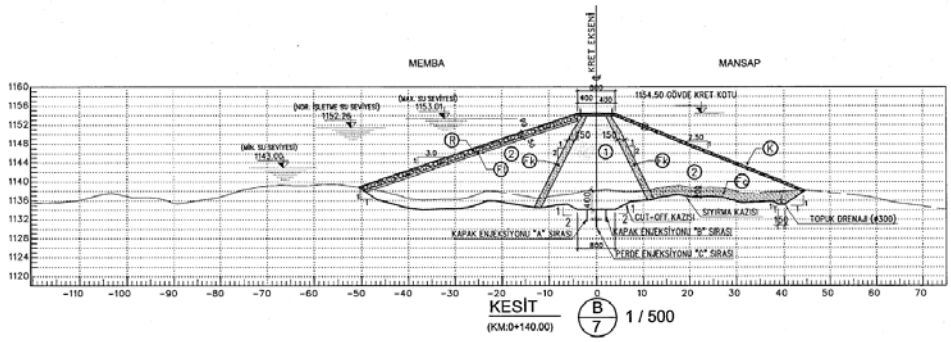
S_s	S_1	PGA	PGV
1.164	0.287	0.469	27.589

5. MODEL

Çalışmada modelin oluşturulması için Eskişehir ili içerisinde yer alan Seyitgazi ilçesine Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılması planlanan Gökbahçe sulama göletinin sismik stabilitesinin incelenmesi için PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programları kullanılmıştır. Bu programlar geoteknik çalışmaların tasarım ve analizinde kullanılan programlardır. Bu iki program temel olarak birbirleriyle benzer işlevlerde kullanılsalar da bazı farklılıkları vardır. Bu farklılıklardan en temel olanı, PLAXIS 2D programı iki boyutlu analiz yapmaktadır fakat DEEPSOIL programı sadece tek boyutlu analiz yapılmasına imkân tanımaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programlarından elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır ve tartışılmıştır.

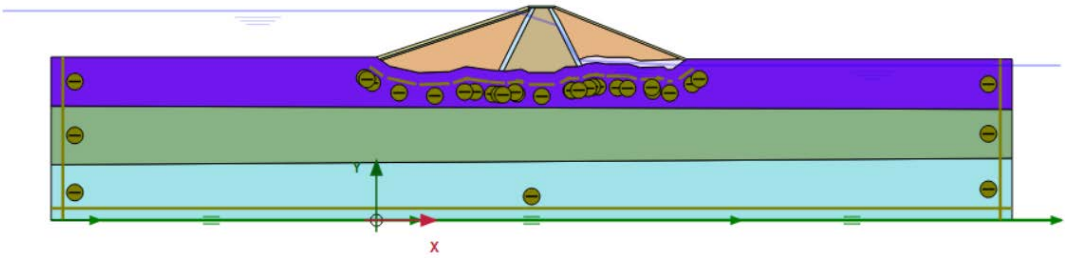
5.1. Plaxis 2D

Problemin tanımlanması için üç katmandan oluşan bir zemin profili seçilmiştir. Zemin profili oluşturulurken PLAXIS 2D proje sınırlarının sağ ve sol koordinat değerleri sınır koşullarından kaynaklanabilecek herhangi bir etkinin önüne geçebilmek için geniş proje alanı oluşturulmuştur. Oluşturulan proje alanın boyutları 300x65.62 m olarak programda tanımlanmıştır. Zemin profilinin kalınlıkları ana kayanın üstünde bulunan 1 numaralı katmanın kalınlığı 18.02 m'dir, 1 numaralı katmandan sonra bulunan 2 numaralı katmanın kalınlığı 16.47 m'dir ve son olarak en üst katman olan 3 numaralı katmanın kalınlığı 10.78 m'dir. Bu zemin profilinin üstüne inşa edilmesi planlanan Gökbahçe Göleti'nin en kesiti Şekil 5.1.'de gösterilmiştir. Şekil 5.1.'de gösterilen en kesite uygun model PLAXIS 2D programında oluşturulmuştur.



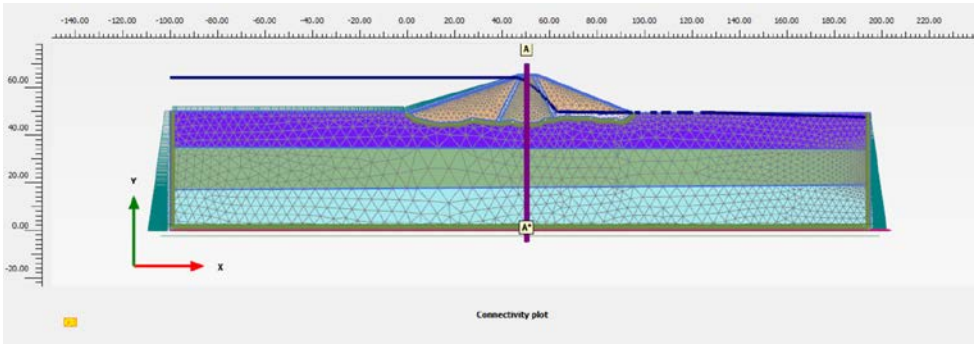
Şekil 5.1. Gökbahçe göletinin en kesiti (EKAP, 2018)

Proje enkesitine uygun olarak PLAXIS 2D'de gövde kret kotunun değeri 65.62 m olacak şekilde modellenmiştir. Proje verilerine göre göletin işletme halinde oluşması tahmin edilen en yüksek su seviyesinin kot değeri model de 64.13 m olarak tanımlanmıştır. PLAXIS 2D'de oluşturulan modelin geometrisi Şekil 5.2.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. PLAXIS 2D model geometrisi

Modelin geometrisi oluşturulduktan sonra analizin yapılması için modelde ağ yapısı oluşturulmuştur. PLAXIS 2D programı ağ yapısını oluştururken üçgenler kullanmaktadır. Ağ yapısıının oluşturulmasında "Fine Mesh" kullanılmıştır ve bu seçim sonrasında oluşan ağ yapısı Şekil 5.3.'te gösterilmiştir. Ağ yapısına bakıldığında barajın çekirdek bölgesinde ağ yapısının daha küçük elemanlardan oluştuğu görülmektedir bu yüzden çekirdek bölgesinde daha fazla düğüm noktası olduğu için analiz gerçek değerlere yakın sonuçlar verecektir. Bu durumun dezavantajı düğüm noktasının artmasıyla birlikte analiz süreside artmaktadır. Problemimizde kullandığımız bu ağ yapısı ile bir dinak analizin çözümü 32 saat sürmüştür. Eğer daha hızlı sonuçlar elde edilmek istenirse ağ yapısının kalitesi düşürülerek düğüm noktasının sayısı azaltılabilir ancak bu durumda sonuç değerleri gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır.

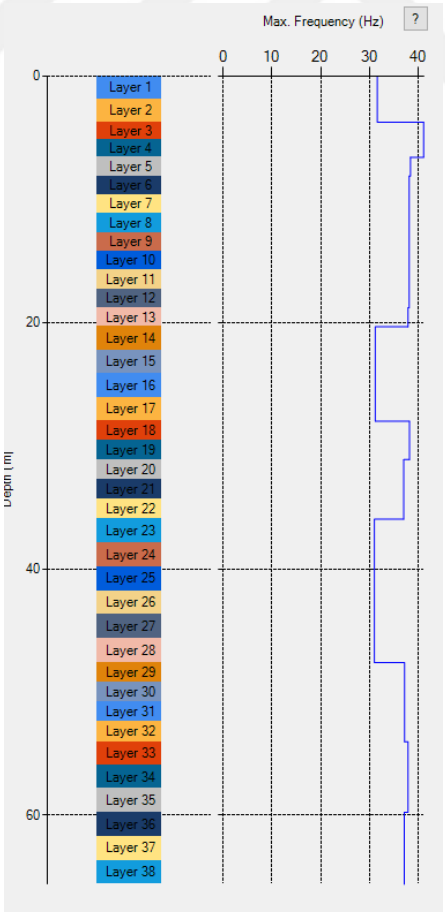


Şekil 5.3. PLAXIS 2D ağ yapısı

5.2. Deepsoil

Problem DEEPSOIL programında tanımlanırken Şekil 5.1.'deki enkesitin çekirdek kısmını ve göletin altında bulunan üç zemin katmanını içeren bir sondaj alındığı varsayılarak tek boyutlu bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin boyutu gövdenin kretini en üst nokta kabul edilerek 65.62 m derinliğinde bir sondaj modeli oluşturulmuştur. Bu modelde çekirdek bölgesi katmanın kalınlığı 29.65 m vder katmanlarda PLAXIS 2D programında tanımlanan zemin katmanlarının kalınlıkları ve isimlendirilmeleri korunarak gerçekleştirilmiştir.

DEEPSOIL programında model oluşturulurken sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için programın önerdiği maksimum frekans değerinin 25-50 Hz arasında kalacak şekilde her katmanın özellikleri korunarak kendi içerisinde farklı derinliklere sahip birden fazla katmana ayrılmıştır. Yapılan modelin frekans değişimi Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. DEEPSOIL modelin frekans değişimi

5.3. Model Verileri

Bu bölümde, PLAXIS 2D ve DEEPSOIL'de dinamik analizin önemli tasarım aşamaları olan model parametreleri ve sınır koşulları, malzeme özellikleri ve deprem verileri ele alınmıştır.

5.3.1 Model parametreleri ve sınır koşulları

i) Sınır Koşuları

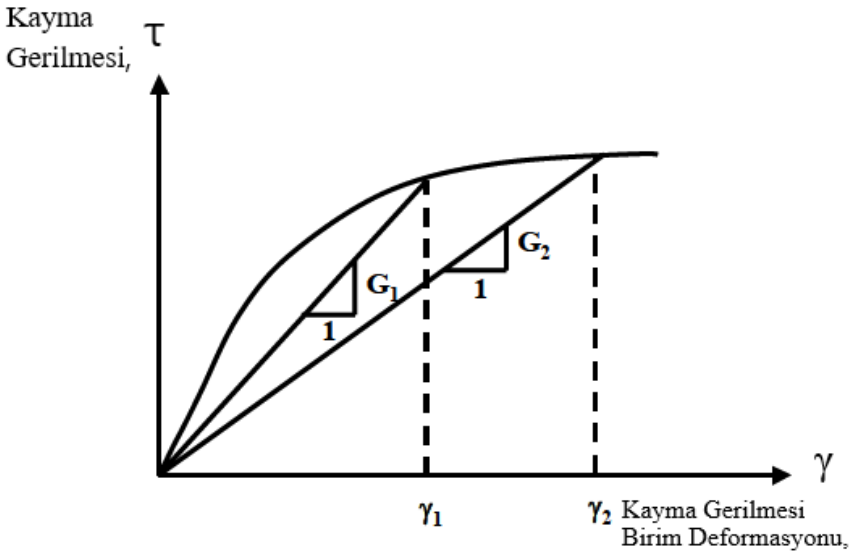
PLAXIS 2D ve DEEPSOIL analiz sonuçlarının sağlıklı olabilmesi için gerçeğe en yakın sınır parametreleri belirlenmelidir. Zemin tabakaları yarı sonsuz olarak kabul edilmektedirler, PLAXIS 2D oluşturduğumuz modelde belirli bir zemin alanı tanımlanmıştır fakat gerçekte zemin tabakası düşeyde devam etmektedir. Bu sorunun önüne geçmek için sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Modelin düşey sınırı viskoz sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Viskoz sınırlar kendisine gelen dalga enerjisini sönümleyerek yansıma yapmasını engellediği için seçilmiştir. DEEPSOIL programında ise model tek boyutlu tanımlandığı için düşeyde bir sınır koşulunun tanımlanmasına gerek yoktur.

ii) Model parametreleri

Dinamik analiz çalışmalarında zeminin tabakalarına ait olan kayma modülü ve sönümleme oranın dikkate alınması gerekmektedir. Kayma modülü (G) zeminin kayma rijitliğini ifade eder. Kayma gerilmesi (τ) ile kayma gerilmesi birim deformasyonu (γ) arasındaki ilişkiden eğim kayma modülü elde edilir.

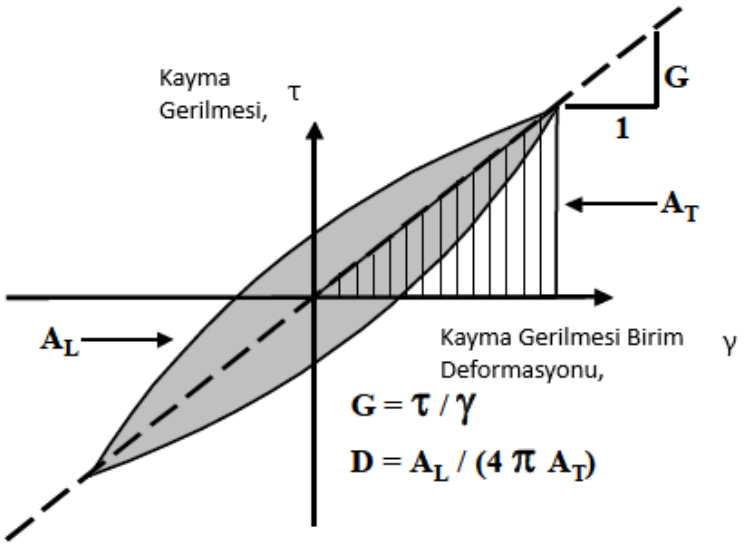
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{5.1}$$

Zeminlerin kayma gerilmesi- kayma gerilmesi birim deformasyonu eğrisinin doğrusal bir eğilim göstermemesinden dolayı kayma modülü gerilme genliği ile değişmektedir. Bu durum Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Zeminin lineer olmayan gerilme-stres eğrisi ve kayma gerilmesi birim deformasyonun genliği ile sekant kayma modülünün değişimi (Darendeli, 2001)

Dinamik tekrarlı yükleme altındaki zeminin kayma gerilmesi birim deformasyon genliğin Şekil 5.6.'daki gibi bir döngü eğrisi oluşturduğu gözlemlenir ve oluşan bu eğri histerisis eğrisi olarak tanımlanır. Histerisis eğrisinin uç noktalarından bir doğru geçtiği varsayılırsa, bu doğrunun eğimi zeminin ortalama kayma sertliğini yani sekant kayma modülünün değerini vermektedir.

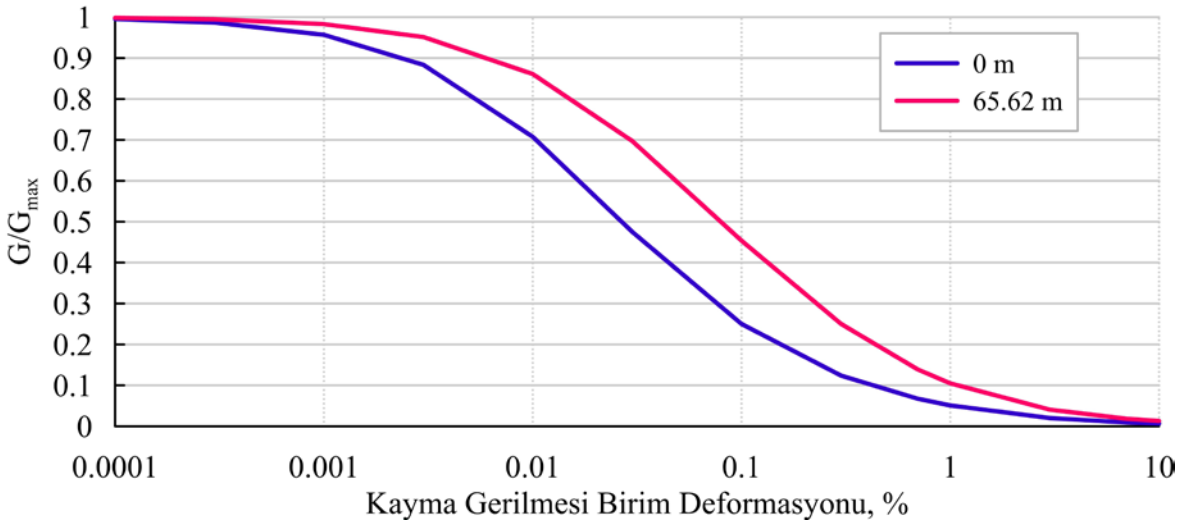


Şekil 5.6. Tekrarlı yükleme altında zeminin kayma modülü tahmini ve malzeme sönümleme oranı (Darendeli, 2001)

Zemin için tanımlanması gereken bir diğer parametre ise sönümleme oranıdır. Sönüm, tekrarlı yükleme altındaki zeminin bir çevrim sonunda yuttuğu enerji miktarıdır. Sönümleme oranından bahsedecek olursak Şekil 5.6.'da görebileceğimiz gibi histerezis eğrisinin oluşturmuş olduğu alanının histerisis eğrisinin uçlarını birleştirildiğinde doğrunun altında kalan üçgen parçasının alanına oranı olarak ifade edilir.

$$D = \frac{1}{4\pi}\frac{A_L}{A_T} \tag{5.2}$$

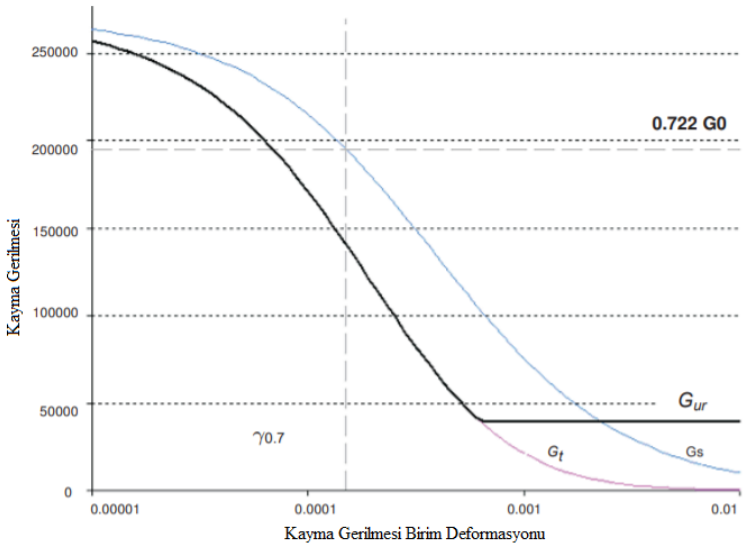
Sekant kayma modülü Şekil 5.6'dan anlaşılacağı üzere kayma gerilmesi birim deformasyon genliğinin artması ile beraber azalmaktadır. Kayma modülünde meydana gelen azalımların normalize edilmesi davranışın değişimini daha kolay yorumlanmasına yardımcı olmaktadır. Bunun için kayma modülü artan çevrimli deformasyonlarda karşılık gelen sekant değerinin maksimum bir kayma modülüne orantılanmasıyla normalize edilmelidir. Maksimum kayma modülü ise histerisis eğrisinin başlangıç çevrimidir Şekil 5.7.'de DEEPSOIL'de tanımlanan en üst nokta ile alt noktanın kayma modülü ile kayma gerilmesi birim deformasyonu arasında ilişki gösterilmiştir ve bu ilişki kayma modülü azalım eğrisi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.7. DEEPSOIL 0 m ve 65.62 m kayma modülü azalım eğrisi

Çalışmada kullanılan iki sonlu elemanlar programı da farklı yaklaşımlarla bu azalım eğrilerini çizdirmektedir. PLAXIS 2D programının çizdirdiği azalım eğrisi Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.

DEEPSOIL programı ise kayma modül azalım eğrisini hesaplarken Darendeli modelinden yararlanmaktadır.



Şekil 5.8. PLAXIS 2D kayma modül azalım eğrisi örneği

5.3.1.1. Darendeli Modeli (2001)

Baraj gövdesinin bir boyutlu modellenmesinde zeminin dinamik davranışı Darendeli modeli (Darendeli,2001) yardımıyla tanımlanmıştır. Çalışmada farklı zeminler için farklı katsayılar sunulmuş olup her zemin için kullanılabilecek genelliştirilmiş modül azalım eğrisi formülleri Denklem 5.3 ve Denklem 5.4'te gösterilmiştir.

$$\frac{G(\gamma)}{G_{max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\alpha}} \tag{5.3}$$

$$\alpha = 0.92\ (sabit)$$

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 \cdot PI \cdot OCR^{\phi_3}) \cdot \sigma'^{\phi_4}_0 \tag{5.4}$$

$$\phi_1 = 0.0352, \qquad \phi_2 = 0.0010, \qquad \phi_3 = 0.3246, \qquad \phi_4 = 0.3483$$

$$\gamma = \%, \qquad \sigma'_0 = atm, \qquad PI = \%$$

Dinamik davranışı tanımlayan diğer temel özellik olan sönümleme oranı eğrisinin çizilmesi için gerekli olan Darendeli Modeli'nin denklemleri de Denklem 5.5 ile Denklem 5.12 arasında gösterilmiştir.

$$\alpha = 1\ için$$

$$D_{M,\alpha=1}(\gamma) = \frac{100}{\pi}\left[4\frac{\gamma-\gamma_r\cdot\ln\left(\frac{\gamma+\gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma+\gamma_r}} - 2\right] \tag{5.5}$$

$$D_{M,\alpha}(\gamma) = c_1\left(D_{M,\alpha=1}\right) + c_2\left(D_{M,\alpha=1}\right)^2 + c_3\left(D_{M,\alpha=1}\right)^3 \tag{5.6}$$

$$c_1 = 0.2523 + 1.8618\cdot\alpha - 1.1143\cdot\alpha^2 \tag{5.7}$$

$$c_2 = -0.0095 - 0.0710\cdot\alpha + 0.0805\cdot\alpha^2 \tag{5.8}$$

$$c_3 = 0.0003 + 0.0002\cdot\alpha - 0.0005\cdot\alpha^2 \tag{5.9}$$

$$D(\gamma) = D_{min} + b\cdot D_{M,\alpha}(\gamma)\cdot\left(\frac{G(\gamma)}{G_{max}}\right)^{0.1} \tag{5.10}$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7\cdot PI\cdot OCR^{\phi_8})\cdot {\sigma'}_0^{\phi_9}\cdot(1+\phi_{10}\cdot\ln(freq)) \tag{5.11}$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12}\cdot\ln(N) \tag{5.12}$$

$$\phi_6 = 0.8005,\quad \phi_7 = 0.0129,\quad \phi_8 = -0.1069,\quad \phi_9 = -0.2889$$
$$\phi_{10} = 0.2919,\quad \phi_{11} = 0.6329,\quad \phi_8 = -0.0057$$

5.3.2. Malzeme özellikleri

Analizin önemli kısımlarından birisi de malzemelerin özelliklerinin tanımlanmasıdır. Çalışmalarda malzeme özellikleri iki şekilde belirlenmektedir, birinci yöntem olarak laboratuvar ortamında deneysel yöntemlerle elde edilmesidir. İkinci yöntem olarak mühendislik yaklaşımı yaparak daha önceden yapılmış olan araştırmaları örnek alarak yapılmasıdır. Bu çalışmada yerel arazi

bilgilerinin erişime açık olmaması nedeniyle, ikinci yöntem olan mühendislik yaklaşımı ile malzeme özellikleri belirlenmiştir. Kullandığımız bu yöntemde örnek alınan Vahdati (2014), Fragiadakis vd. (2014), Majedi vd. (2017), Toma (2017) ve Kılıç (2019) çalışmalardaki malzeme özellikleri ile DSİ'nin projede belirtmiş olduğu malzeme parametreleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Göletlerde kullanılan malzeme özelliklerine ait çalışma örnekleri

	Vahdati	**Fragiadakis vd.**	**Majedi vd.**		**Toma**	**Kılıç**	**DSİ**
γ (kN/m^3)	21.00	19.70	19.20	16.00	20.00	17.50	-
γ_s (kN/m^3)	23.00	20.3	19.20	18.50	20.00	18.00	25.00
E50 (MPa)	70.00	-	-	-	20.00	-	-
Eoed (MPa)	70.00	-	-	-	25.00	-	-
Eur (MPa)	210.00	-	6.130	-	80.00	60.00	-
c (kN/m^2)	20	0	10	10	10	86	71
ϕ ($^\circ$)	38	29	38	23	0	0	7.40
$\gamma_{0.7}$	-	-	-	-	0.00012	-	-
G_0^{ref} (MPa)	-	-	-	-	240.00	-	-

Çizelge 5.1'de yapılan diğer çalışmalar değerlendirilerek oluşturulan gölet modelinde kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. PLAXIS 2D modelde kullanılan malzeme özelliklerine

	Kil Çekirdek	**Kil 1**	**Kil 2**	**Kil 3**
Malzeme Modeli	HS Small	HS Small	HS Small	HS Small
γ (kN/m^3)	17.50	20.00	19.00	18.00
γ_s (kN/m^3)	18.00	21.00	20.50	19.00
E50 (MPa)	13.00	20.00	16.00	6.40
Eoed (MPa)	16.25	25.00	20.00	8.00
Eur (MPa)	39.00	80.00	65.00	24.00
c (kN/m^2)	68	140	120	120
ϕ ($^\circ$)	0	20	17	15
$\gamma_{0.7}$	0.00006	0.00012	0.00015	0.00008
G_0^{ref} (MPa)	100.0	180.0	120.0	110.0

Çizelge 5.3. DEEPSOIL modelde kullanılan malzeme özelliklerine

	Kil Çekirdek	**Kil 1**	**Kil 2**	**Kil 3**
Malzeme Modeli	DS-NL4	DS-NL4	DS-NL4	DS-NL4
γ (kN/m^3)	18.00	20.00	19.00	18.00
Vs (m/s)	233	238	239	289
OCR	1	1	1	1
K_o	1	0.6580	0.7076	0.7412

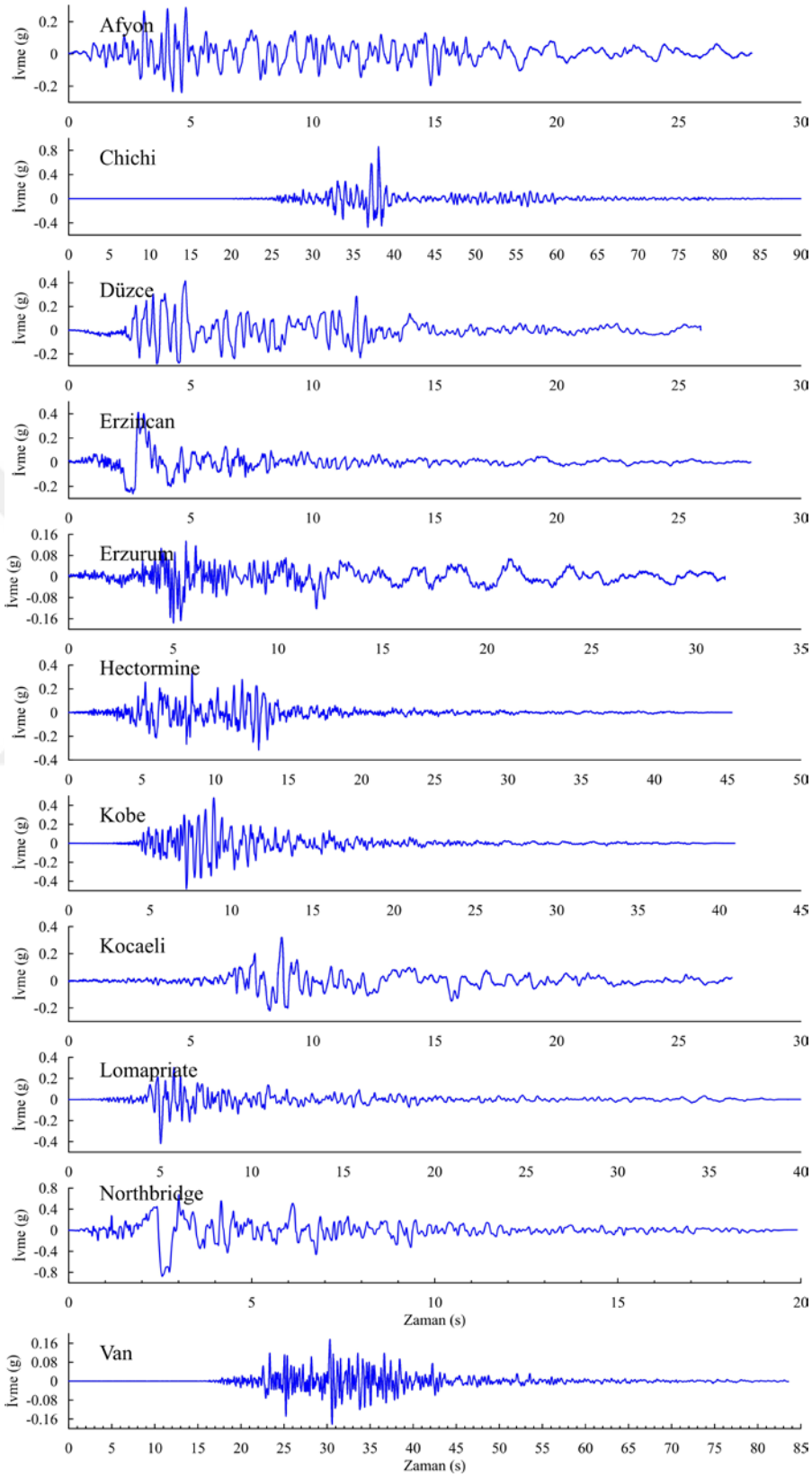
5.3.3. Deprem verisi

Dinamik analizde kullanılması planlanan 11 deprem ivme kayıtları Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı bünyesinde yer alan Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı ve PEER Yer Hareketi Veri Tabanı'ndan alınmıştır. Seçilen deprem ivme değerlerinin istasyon bilgileri, deprem oluşum yeri, deprem büyüklüğü ve deprem oluşum tarihleri Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

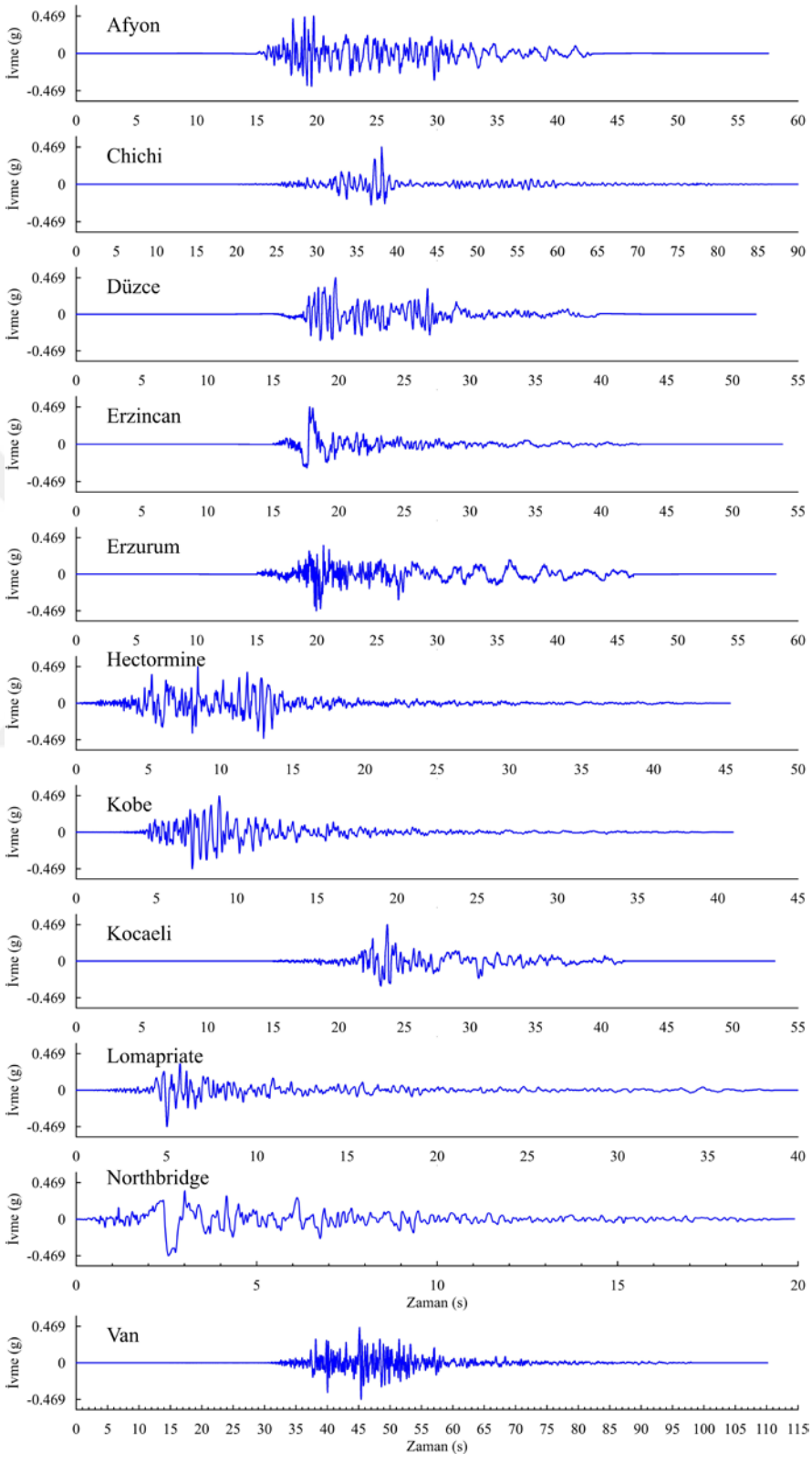
Çizelge. 5.4. Deprem ivme kayıtlarının bilgileri

Oluşum Yeri	**Oluşum Tarihi**	**İstasyon Kodu**	**İstasyon Adı**	**Kayıt Dosyası**	**Depremin Büyüklüğü**	**Deprem Kayıt Yeri**	**PGA**
Afyon	01.10.1995	0302	Dinar	19951001155713_0302	6.0 M	AFAD	0.287
Chi-Chi	21.09.1999	1231	CHY080	RSN1231_CHICHI_CHY080-N	7.62 M	PEER	0.860
Düzce	12.11.1999	8101	Merkez	19991112165721_8101	7.2 M	AFAD	0.415
Erzincan	13.03.1992	2402	Merkez	19920313171839_2402	6.1 M	AFAD	0.412
Erzurum	30.10.1983	2503	Horasan	19831030041228_2503	6.0 M	AFAD	0.176
Hector Mine	16.10.1999	1787	Hector	RSN1787_HECTOR_HEC090	7.1 M	PEER	0.328
Kobe	17.01.1995	1111	Nishi-Akashi	RSN1111_KOBE_NIS000	6.9 M	PEER	0.468
Kocaeli	17.08.1999	8101	Merkez	19990817000139_8101	7.4 M	AFAD	0.320
Loma Prieta	17.10.1989	768	Gilroy Array #4	RSN768_LOMAP_G04000	6.9 M	PEER	0.418
Northridge	17.01.1994	1063	Rinaldi Receiving Sta	RSN1063_NORTHR_RRS228	6.7 M	PEER	0.874
Van	23.10.2011	6503	Muradiye	20111023104120_6503	6.7 M	AFAD	0.181

Seçilmiş olan 11 deprem verisine ait olan ivme grafikleri Şekil 5.9.'da ve deprem ivme verisinin göletin yapılacağı koordinatına göre AFAD'tan alınan maksimum yer ivme değerine düzenlenmiş ivme grafikleri Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Deprem ivme verileri



Şekil 5.10. Düzeltilmiş deprem ivme verileri

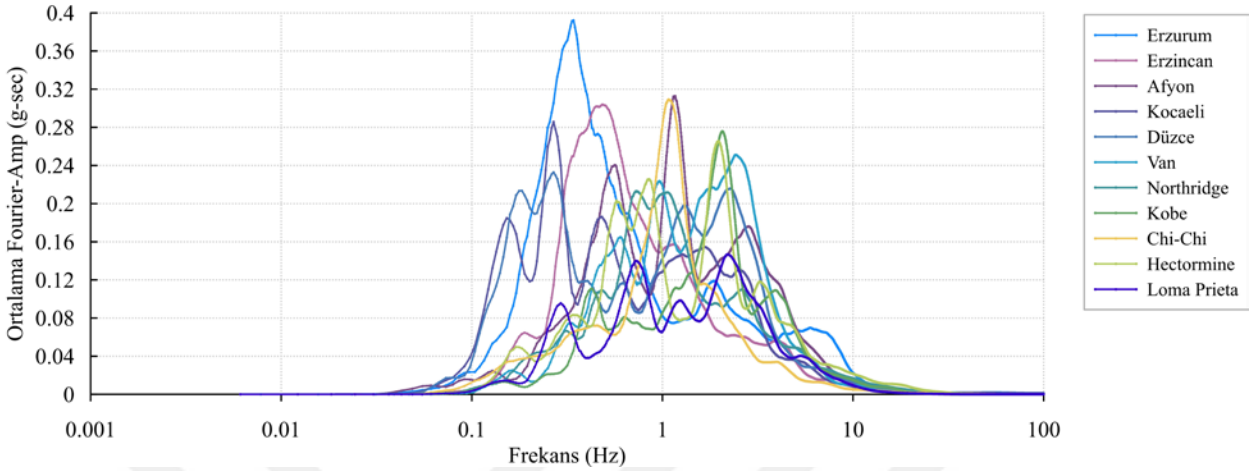
Deprem kayıtları seçilirken çok farklı özelliklere sahip olmasına dikkat edilmiştir. İvme kayıtlarının karakteristik özelliklerinin başında maksimum ivme (PGA), süre (duration) ve frekans içeriği gelmektedir. Süre bakımından seçilen bu depremleri incelediğimizde 20 saniye ile 90 saniye arasında değiştiği Şekil 5.8'de görülmüştür. Bu depremlerin oluşum sürelerine bakıldığında ilk anlamlı ivme pikinin ilk saniyelerinde oluşan deprem olduğu gibi 5., 15., ve 25. Saniyesinde oluşan depremlerde bulunmaktadır. Ayrıca bu depremlerin oluşturduğu maksimum piklerin görüldüğü saniyelerde 5., 10., 30. ve 35. saniye gibi çeşitlilik göstermektedir. Bu deprem kayıtlarının frekans içeriğinde de farklılık bulunmaktadır. Baskın frekansların farklı olduğu, düşük ve yüksek frekans içeriği bakımından çeşitlilik gösteren bir kayıt grubu seçilmiş olup bu konu ileri de daha geniş bir şekilde tartışılacaktır.

Tekil olarak Chi-Chi depremi incelendiğinde deprem kaydının süresi 90 saniye olup deprem hareketi 20. saniyede oluşmaya başlamıştır fakat pikin oluşumu 38. saniye görülmektedir. Bu deprem nedeniyle ortaya çıkan maksimum ivme 0.860 g olarak karşımıza çıkmıştır. Bunun yanında ülkemizde gerçekleşmiş bir başka deprem olan Erzurum depreminin kaydını incelediğimizde deprem kayıt süresinin toplamda 27 saniye olduğu belirlenmiş ve bu kaydın ilk başından itibaren deprem hareketliliği görüldüğü ve depremin pik değeri 3. saniye de oluşum gösterdiği anlaşılmıştır. Bu depremde kaydedilen maksimum ivme değeri 0.176 g'dir. Deprem etkisini değiştiren bu faktörlerin çeşitliliği arttırılarak tasarımın her ihtimale karşı değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Şekil 5.9'da gerçek deprem hareketlerinin ölçeklendirilmiş halleri sunulmuştur. AFAD Türkiye Sismik Haritasında bölgeye ait DD1 deprem düzeyi için ana kaya ivmesinin 0.469g olarak tanımlanmış olduğu yukarıda gösterilmişti. Bütün ivme kayıtlarının önce Fourier'leri alınmış olup bulunun değerler 0.469g'ye ölçeklendirimiş daha sonra ters Fourier alınarak şekildeki ölçeklendirilmiş versiyonları bulunmuştur. Süreleri ve piklerin oluştuğu yerlerin farklı olmasına karşın ana kaya ivmesi olarak kullanılan bu kayıtların en büyük genlikleri 0.469g olarak sabitlenmiştir.

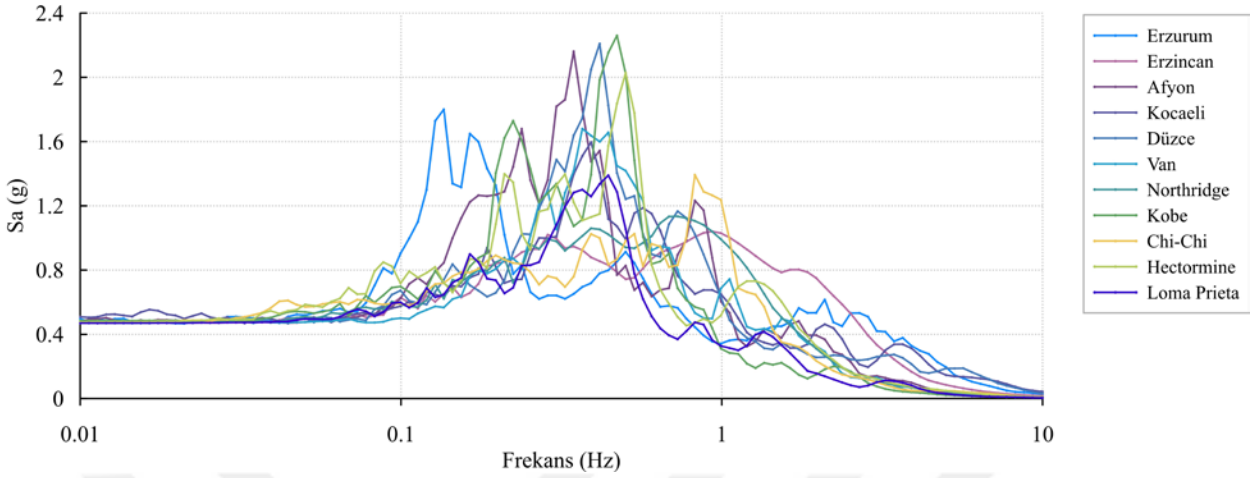
5.3.4 Depremlerin Baskın Frekans Özellikleri

Bu kısımda 11 farklı deprem verisinin Fourier dönüşümleri sonra elde edilen verilerin grafikleri ile spektral ivme grafiklerinin frekans değerleri ile olan ilişkini gösteren grafikler incelenmiştir.



Şekil 5.11. Depremlerin ortalama fourier genliği ile frekans ilişkisi

Fourier dönüşümü sonrası elde edilen verilerin sadeleştirilerek ortalama fourier genlik değerlerinin gösterimi Şekil 5.11.'de yapılmıştır. Şekil 5.11.'deki grafik incelenecek olursa Erzurum deprem kaydına ait verilerinde baskın periyotunun 0.35 Hz'de olduğu görülmektedir ve dar bir bant genişliğine sahiptir. Erzincan depremine ait veriler de ise aynı Erzurum depreminde olduğu gibi dar bir bant genişliğine sahipken baskın periyot değeri 0.48 Hz frekans değerindedir. Kocaeli ve Düzce depremlerinde ise baskın periyotun değerinin gözlemlendiği frekans değerleri sırasıyla 0.27 Hz ve 0.26 Hz olarak elde edilmiştir ve bu iki depremin bant genişlikleri yayvan özellik göstermektedir. Düzce ve Chi-Chi depremlerinin baskın periyot değerlerinin görüldüğü frekans değerleri 1.20 Hz ve 1.12 Hz ile birbirine yakınlık göstermektedir fakat Düzce depreminin bant genişliği yayvan özellikteyken Chi-Chi depreminin bant genişliği daha dar özelliktedir. Hector mine ve Kobe depremlerine ait verilerin baskın periyotu 2.00 Hz ve 2.09 Hz frekansta oluşmaktadır. Aynı Düzce ve Chi-Chi depremlerinde olduğu gibi iki deprem yakın baskın periyot değerlerine sahip olmasına rağmen bant genişlikleri farklı özellik göstermektedir. Hector mine depreminin bant genişliği yayvan olduğu görülürken Kobe depreminin bant gençliğinin daha dar olduğu görülmektedir. Van, Northridge ve Loma Prieta deprem kayıtlarının Fourier verileri incelendiğinde bu üç depreminde bant genişliğinin yayvan olduğu görülmüştür, fakat baskın periyotlarına bakıldığında sırasıyla 2.50 Hz, 0.73 Hz ve 2.16 Hz frekans değerlerinde oluşmuştur.



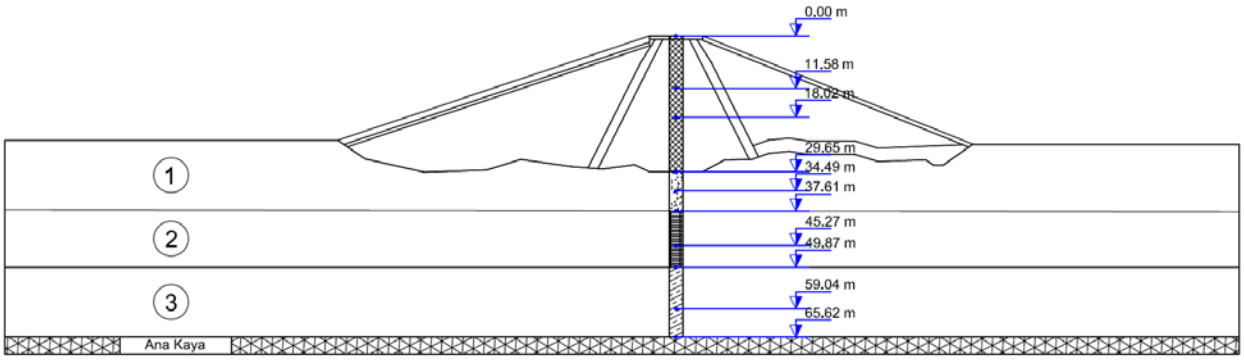
Şekil 5.12. Depremlerin spektral ivme ile frekans ilişkisi

Spektral ivme-Frekans grafiği zemin ile yapı arasındaki ilişkiyi tanımlanmasında öneli bir role sahiptir. Şekil 5.12.'deki verileri inceleyecek olursak 11 depreminde başlangıç noktasının 0.469 g olduğu görülmektedir. Bu spektral ivme değerleri deprem kayıtlarındaki maksimum ivme değeridir. Deprem kayıtlarının maksimum spektral ivme değerlerini oluştuğu frekans değeri 0.35 sn ile 0.82 sn arasında kaldığı görülürken Erzurum depreminin maksimum spektral ivmesinin periyodu değeri 0.14 sn'de oluşmuşken Erzincan 0.93 sn'deki periyot değerinde gerçekleştiği görülmektedir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Seyitgazi Gökbahçe Göleti'nin işletme halinde maruz kalabileceği deprem hareketinin sonlu eleman programları olan PLAXIS 2D ve DEEPSOIL yardımıyla sismik stabilitesine ait sonuç verileri elde edilmiştir. Maruz kalabileceği deprem kuvvetlerinin belirlenmesi için Türkiye'de ve yurtdışında gerçekleşen 6.0 deprem büyüklüğüne sahip sismik deprem hareketleri dikkate alınmıştır. Seçilen sismik depremler hareketleri Afyon, Chi-Chi, Düzce, Erzincan, Erzurum, Hector Mine, Kobe, Kocaeli, Loma Prieta, Northridge ve Van depremleridir. Bu sismik deprem verilerine ait ivme kayıtları Seyitgazi Gökbahçe barajının koordinatı ve zemin özelliklerine göre düzenlenmiştir.

Seçilen sismik deprem kayıtlarının uygulanacağı baraj gövdesi ve baraj gövdesinin altında yer alan 10 adet noktasının koordinatları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Yapılan analizler sonrasında göletin kil çekirdeğinde seçilen noktalarda meydana gelecek deformasyon miktarı, x yönündeki deprem ivme kayıtları ve maksimum spektral ivme sonuçlarının PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programlarında elde edilen verilerin uyumluluğunun irdelenmiştir.



Şekil 6.1. Seçilmiş olan noktaların koordinatları

6.1. Plaxis 2D

Problemin tanımlanmasından sonra gölete etkisi değerlendirilecek 11 farklı deprem seçilirken deprem oluşum sürelerinin, pik oluşum değerleri ile pik sayılarının farklılığına ve deprem verisinin pik frekans

aralığının birbiri ile benzer özellik göstermemesine dikkat edilmiştir. Böylelikle göletin karşılaşabileceği farklı senaryolara ait sonuçların değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Sonuçlar 3 temel parametre üzerinde değerlendirilmiştir: Baraj gövdesi boyunca

- İvme kayıtları
- Spektral ivme davranışı ve
- Deplasman kayıtları

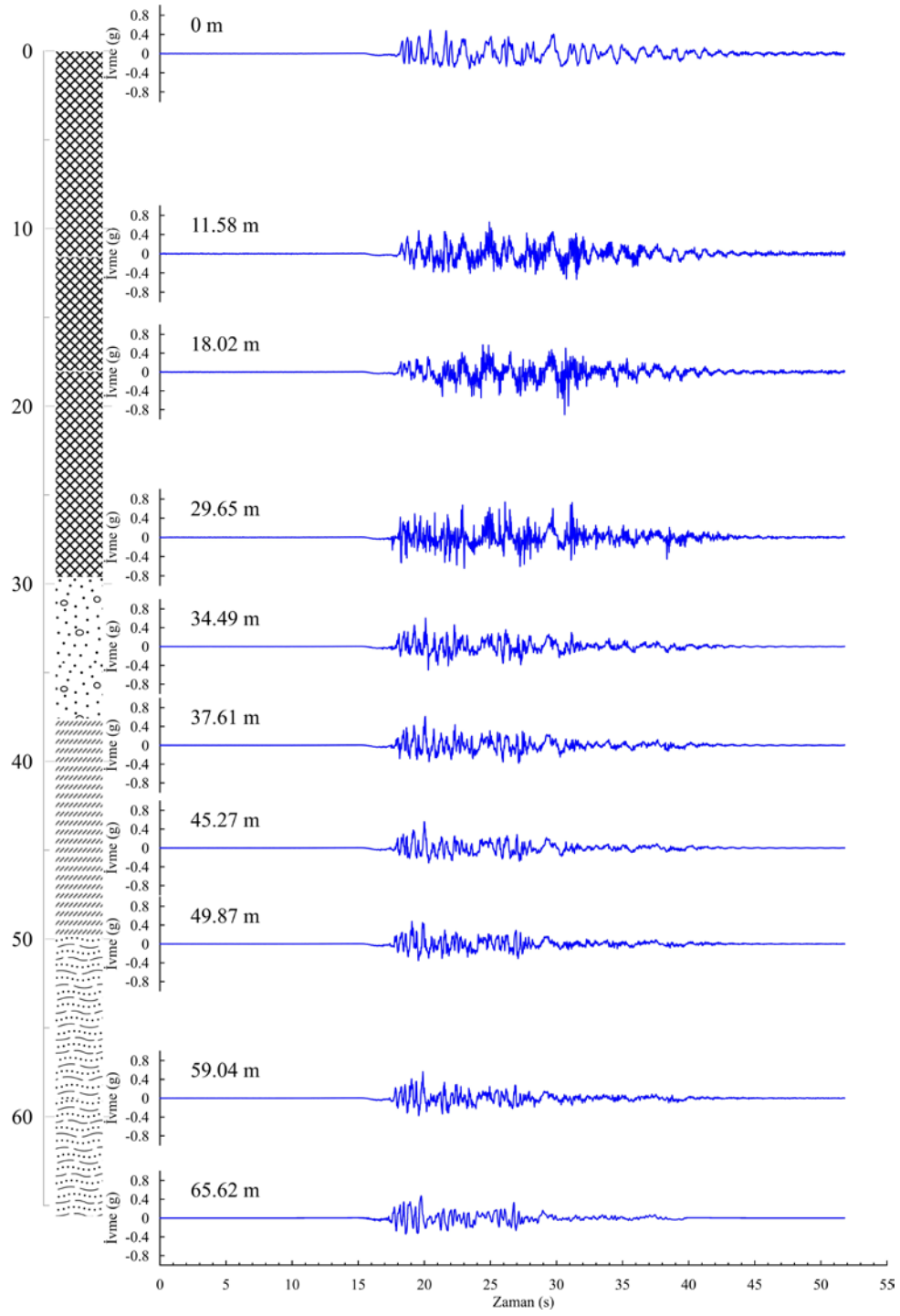
sunulmuş ve profil boyunca değişim tartışılmıştır. Tekrara düşülmemesi amacıyla bir yerel bir uluslararası deprem seçilmiş olup sadece bu kayıtlar için bulunan sonuçlar yorumlanmıştır. Tartışma sonunda ise tüm analizler için genel değerlendirmeler yapılmıştır.

6.1.1. İvme sonuçları

Şekil 6.2'de Düzce Depreminin ana kaya ivmesi olarak seçilmesiyle yapılan analiz sonucu ortaya çıkan gövde boyunca ortaya çıkan ivme kayıtları yer almaktadır.

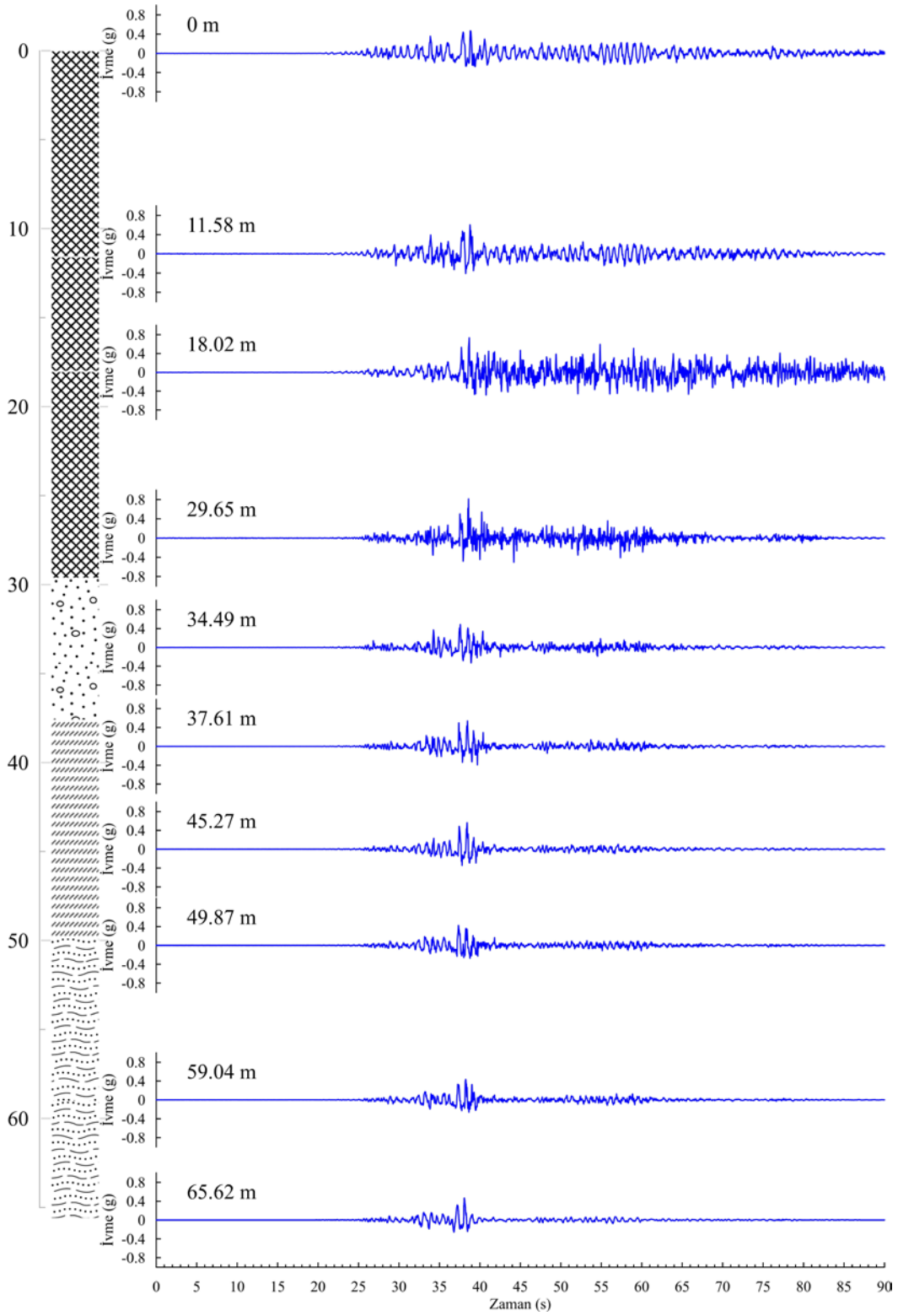
Düzce deprem ivme hareketinin Gökbahçe gölenin altında bulunan ana kayaya uygulanması sonucunda elde edilen verileri incelediğimizde ana kayadaki ivmenin 0.469 g değerinde pik gözlemlenirken ilk zemin tabakasında 0.480 g, ikinci zemin tabakasında 0.614 g, üçüncü zemin tabakasında 0.734 g ve kret noktasında ise 0.489 g değerine sahip olduğu görülmektedir. Tabaka değişiminde yansımaların etkisi ile birlikte bazı pik değerlerinde artışlar olmuştur.

Piklerin oluştuğu süre göz önünde bulundurulduğunda, ana kaya ivme verisine ait ilk pik 18. saniyede oluşmuşken bu pik değeri bir üst noktada 19. saniyede gözlemlenmiştir ve bu değerin gözlemlendiği saniye değeri sürekli artış göstermektedir. Bu büyümenin yanı sıra pik frekans aralığı azalarak üst noktalarda döngü değerlerinin birleşerek yeni döngüler oluşturmuştur. 11.58 ve 18.02 m'deki ivme verileri frehatik hatta yakın oldukları için alt tabakalardaki farklı su doygunluğuna sahip bu noktadan itibaren ivme değerleri harmonik harekete benzer hareket sergilemeye başlamıştır ve yarı doygunluğa sahip olan barajın kret noktasında benzer döngü değerlerine sahip harmonik bir ivme hareketi gözlenmektedir. Frehatik hattın üzerindeki noktalarda ivme kayıtlarındaki suyun yaratmış olduğu gürültülerin azaldığı ve kret noktasında ivme verisinin son kısmında minimum değerlerde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.2. Düzce depreminin ivme verileri

Chi-Chi deprem kaydı kullanılarak elde edilen analiz sonucu profil boyunca ortaya çıkan ivme değişimi Şekil 6.3 te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Chi-Chi depreminin ivme verileri

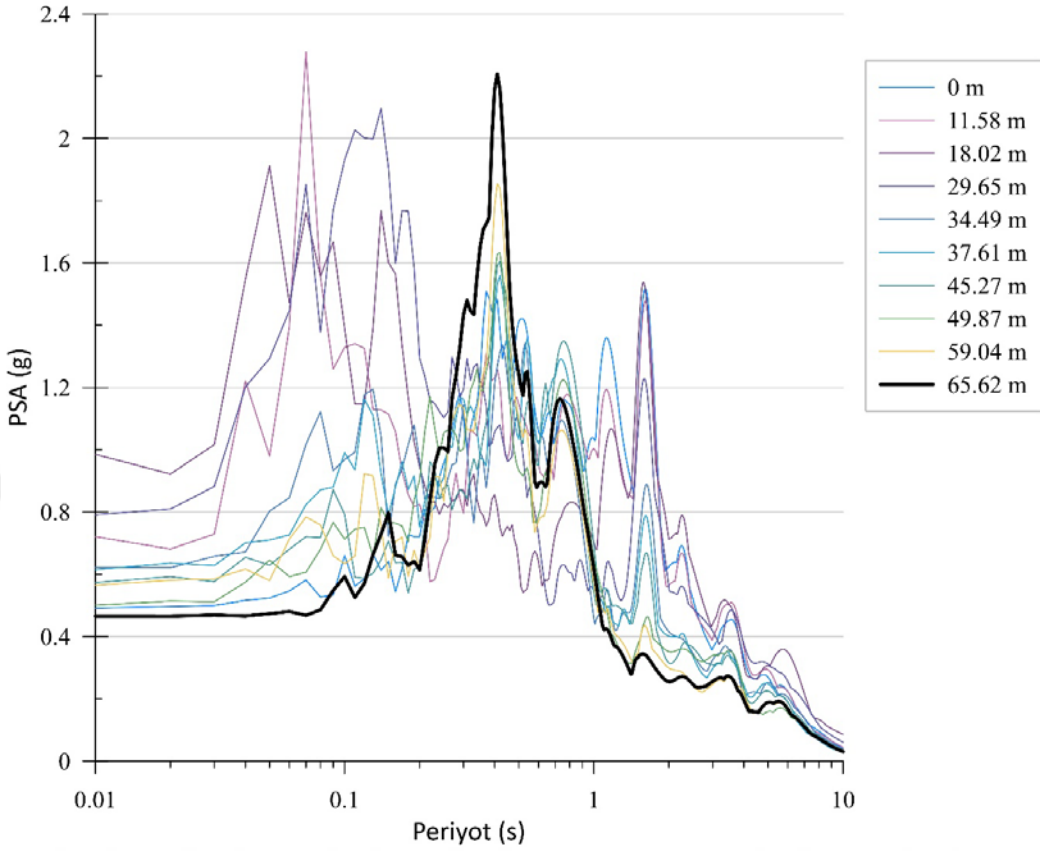
Chichi deprem kaydında ise Düzce deprem ivme kayıtlarının sonuçlarına benzer şekilde ivmelerin pik değerlerinin değişimi ve pik oluşum sürelerinin zamanla daha ilerdeki sürelerde oluştuğu görülmüştür. Düzce depreminden farklı olarak 11.58 m'deki ivme verisinde suyun oluşturduğu gürültü azalmıştır. Bunun nedeni deprem ivme kaydındaki ivme değerinin sahip olduğu pik yoğunluğunun farklı olması, deprem süresinin etkisi ve zeminin yorulması ile açıklanmaktadır. Düzce depreminde olduğu gibi 18.02 m'den itibaren ivme değerleri üniform harmonik davranış göstermeye başlamıştır. Bu derinlikte frekans içeriğinin en yoğun olduğu bir davranış görülmektedir. Tabaka değişimi, doygunluğun değişimi ve empedans oranı farklılığı burada yüksek frekans yoğunluğu olarak ortaya çıkmıştır. PLAXIS 2D programında elde edilen 11 adet deprem verisinin ivme grafikleri EK A'da gösterilmiştir.

6.1.2. Spektral ivme sonuçları

Sismik deprem yükleri altında yapılan analizler sonucunda örnek olarak seçilen Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Grafikte 65.62 m'deki en büyük ivme verisi ana kaya ivmesi göstermektedir.

Tabakaların kısa periyottaki (T=0.01s) spektral ivme değerleri incelendiğinde anakaya ivme değerinin zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin etkileriyle büyüdüğü görülmektedir. Grafikteki spektral pik değerlerine bakıldığında ana kayaya ait ivme verisinde ilk pik değeri 0.40 saniyede oluşmaktayken ikinci pik değeri 0.80 saniyesinde oluşmaktadır. Göletin kil çekirdeğinde yer alan 0 m, 11.58 m, 18.02 m ve 29.65 m noktalarında 0.02-0.12 saniye aralığında ilk pik değerlerinin olduğu görülmekteyken ikinci pik değerleri 1.75 saniyede oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu da spektral pikin periyodunun kısalmasına sebep olmuştur.

Ana kaya ile göletin arasındaki tabakalara ait noktalarda pik spektral ivmeler ilk olarak 0.35 saniyede oluşmuş ve ikinci pik oluşumu ise 0.6-2 saniyede gerçekleşmiştir. Bu periyot değerlerini yapının doğal frekansıyla kıyaslanması projelendirme konusunda yardımcı olacaktır. Rezonans halinden kaçınmak için yapının bu aralıkta frekansa sahip bir etkiye maruz kalmamasını istenir. Grafikte piklerin başlangıç ve bitiş noktalarını periyot genişliğini göstermektedir, göletin kil çekirdeğinde periyot genişliği fazla iken diğer noktalarda periyot genişliğinin dar olduğu görülmektedir.

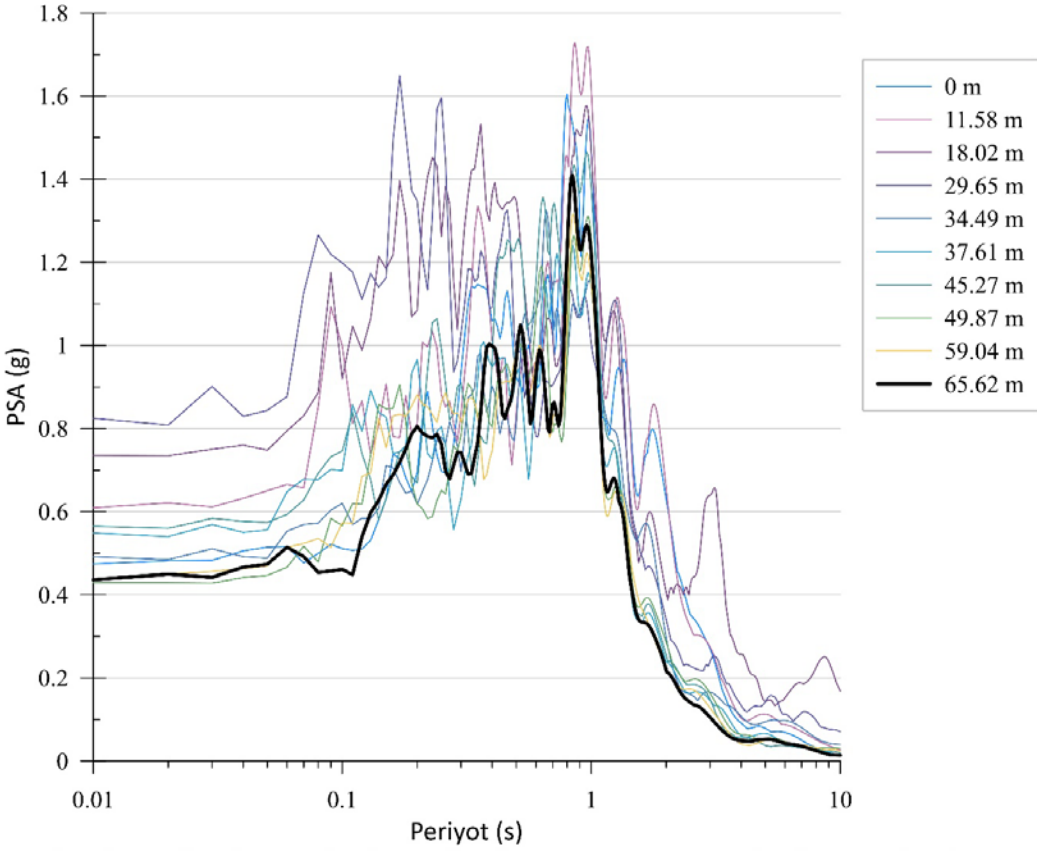


Şekil 6.4. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri

Chi-Chi deprem kaydı kullanılarak yapılan analizlerin sonucunda Şekil 6.5'te gösterilen en büyük spektral ivme verileri elde edilmiştir.

Grafikteki veriler incelendiğinde ana kaya ivme verisinde oluşan baskın pikin periyot değeri 0.90 saniyesindedir. Göletin kil çekirdeğindeki analiz noktalarında da baskın periyot 0.80 saniyesinde oluşmaktadır. Bu noktalarda oluşan ilk piklerin periyot değerleri 0.09-0.3 saniye aralığında oluşmaktadır.

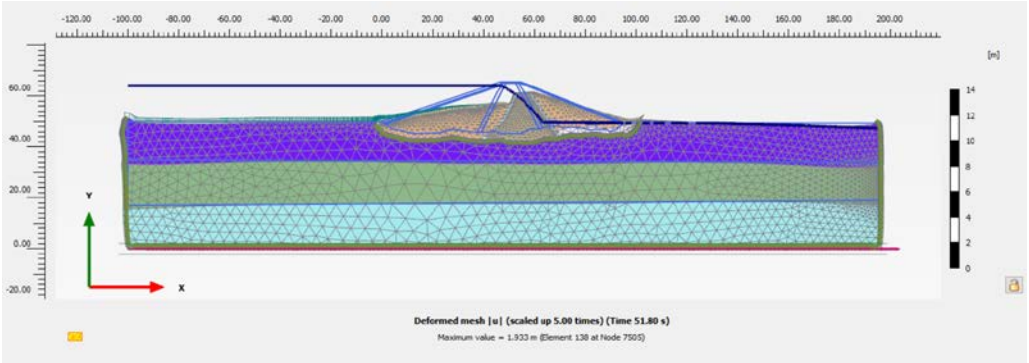
Tabakalara ait noktalardaki en büyük spektral ivme verileri incelendiğinde ise ilk piklerin görüldüğü saniye 0.1-0.25 saniyeleri arasında oluşmuştur. Ayrıca baskın piklerin oluşumu 0.80-1.0 saniyeleri arasında gerçekleşmiştir. Periyot genişliği tüm noktalarda geniş olduğu görülmektedir. PLAXIS 2D programında elde edilen 11 adet deprem verisinin en büyük spektral ivme grafikleri EK B'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri

6.1.3. Deformasyon sonuçları

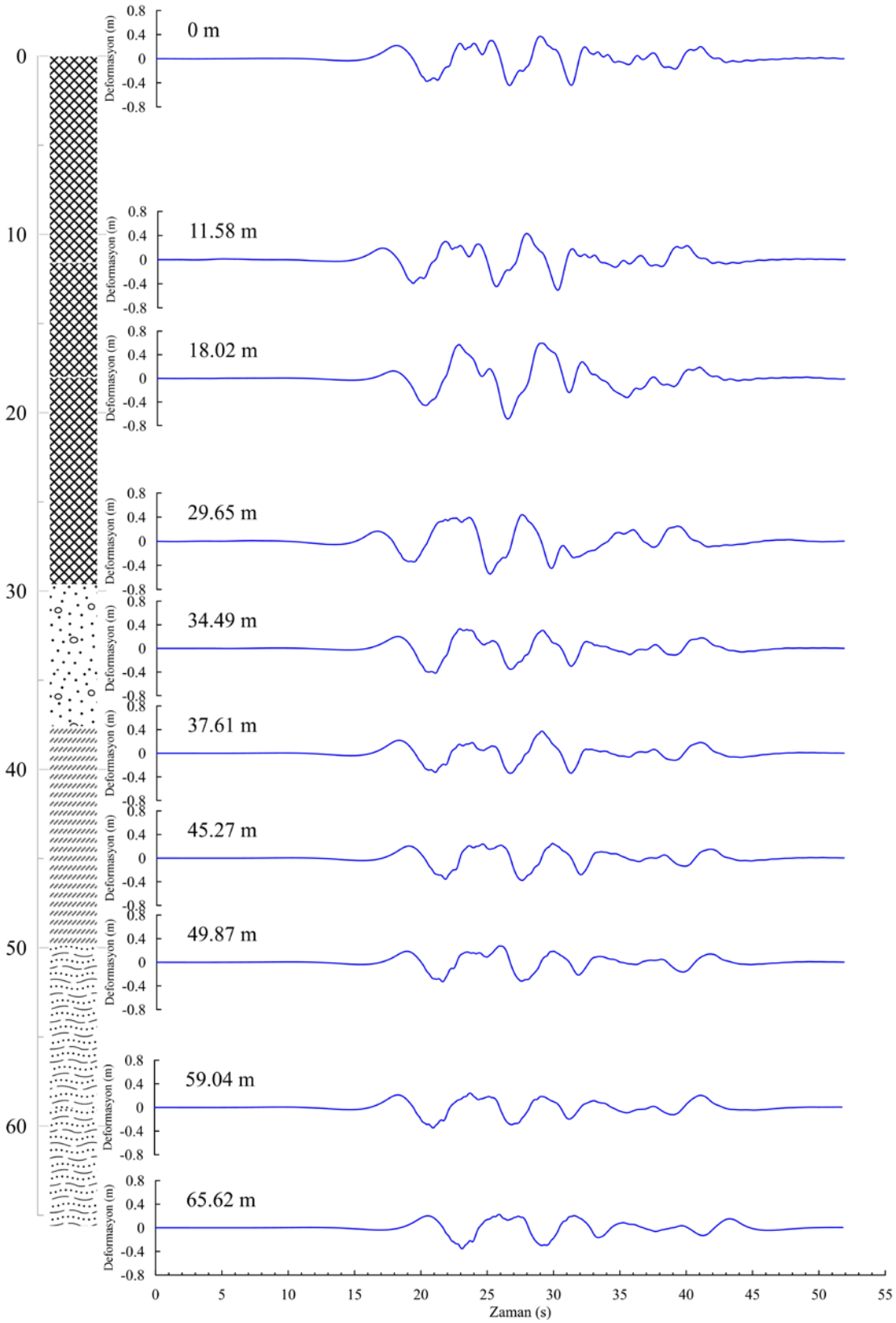
Düzce sismik deprem kaydı altında model de oluşan deformasyon durumu Şekil 6.6'da ve deformasyon değerleri de Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.6. PLAXIS 2D programında Düzce depreminin analizi sonrası oluşan deformasyon

İvme grafikleri ile deformasyon grafikleri arasında bir bağıntı bulunmaktadır. Plaxis programı analizler sonucu elde edilen deformasyonlar ile DEEPSOIL'den elde edilen deformasyon sonuçları kullanılan matematiksel ifadeler nedeniyle farklılık göstermektedir. Kalıcı deformasyonlar yerine, hareket anındaki davranışı görebilmek amacıyla tabakalarda elde edilen ivme değerleri iki kere integre edilerek zamana bağlı deplasman grafikleri elde edilmiştir. Şekil 6.7'deki veriler incelendiğinde 26.40 saniyesinde en büyük deformasyon miktarı 0.68 m olarak 18.02 m'de görülmektedir ve bu noktasında oluşan deformasyon piki kısa süre içerisinde tekrar oluşarak 29.00 saniyesinde ikinci bir deformasyon piki oluşmuştur.

Ana kaya ilk deformasyonun oluşumu 12.92 saniyesinde görülmektedir, daha sonra 27.53 saniyesinde bu noktanın en büyük deformasyon değeri 0.35 m değerine ulaştığı görülmektedir. En büyük deformasyon değerinin 65.62 m ile 49.87 m arasında azaldığı görülmekteyken, tabaka değişiminden sonra 2 numaralı kil tabakasında deformasyon miktarı artış göstermiştir ve bu artış 18.02 m noktasına kadar devam etmiştir. Bu noktadan sonra deformasyon değerleri azalmaya başlamış ve barajın kret noktasında 0.44 m değerine ulaşmıştır. Son olarak tüm profil incelendiğinde, anakayadan itibaren yatay hareket seviyesi şekil olarak aynı davranışı gösterirken ilk 3 tabaka geri kalan profilden ayrılarak daha farklı frekans içeriği ve genliğe sahip deformasyonlar göstermiştir. Gövdenin arkasındaki suyun dinamik etkisi burada ortaya çıkmıştır.

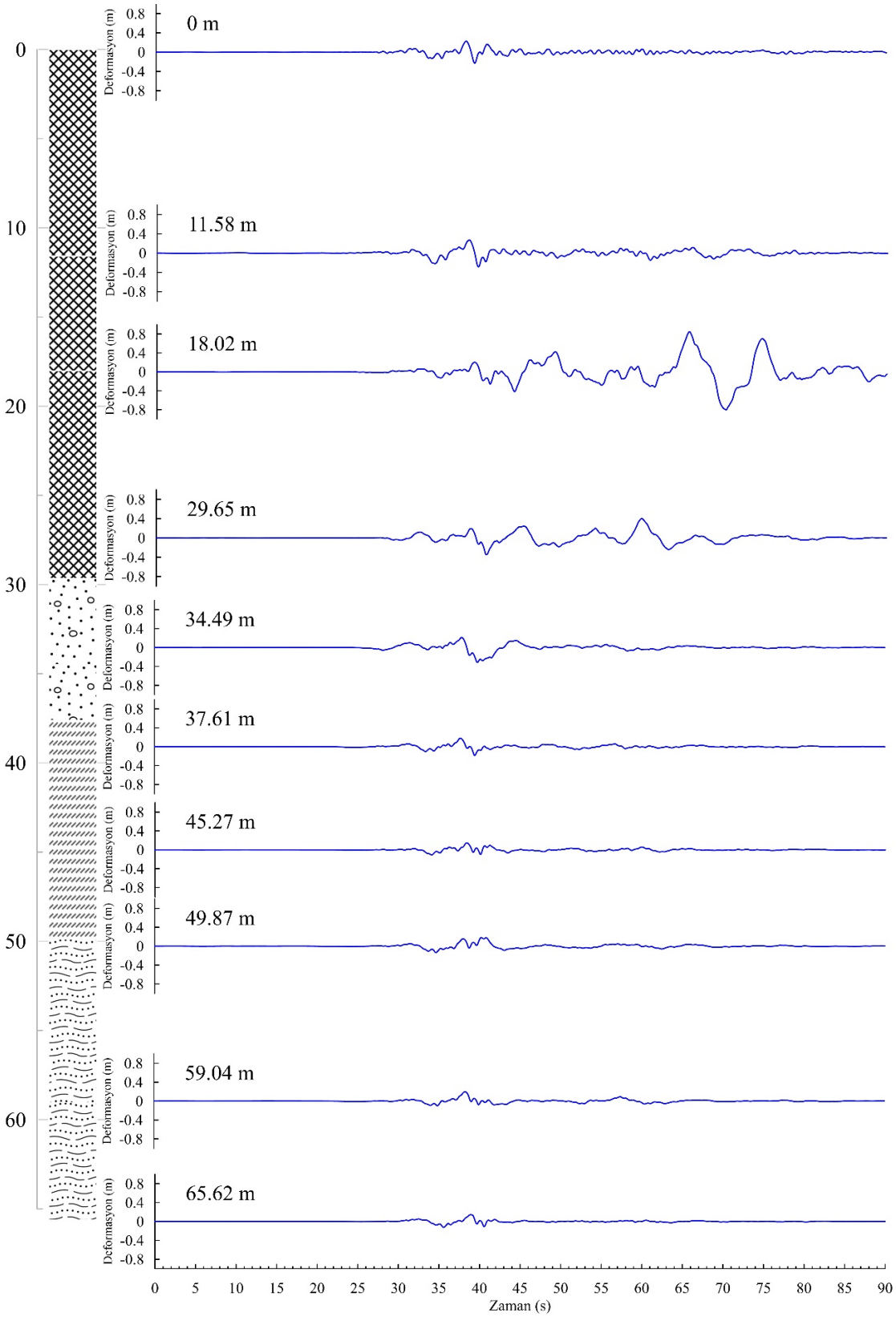


Şekil 6.7. Düzce depreminin deformasyon verileri

Şekil 6.8'de Chi-Chi depreminin baraj modelinde oluşturmuş olduğu deformasyon miktarını gösteren kayıtlar yer almaktadır. Düzce depreminin aksine deplamsn davranışı çok büyük farklılıklar göstermektedir. Chi-Chi sismik deprem kaydının oluşturduğu deformasyon verilerine bakıldığında en büyük deformasyon değerinin barajın 18.02 m'sinde 0.84. saniyede oluştuğu görülmektedir. Chi-Chi deprem kayıtlarında 18.02 m noktasında kısa süre içerisinde maksimum deformasyon değerine iki pik oluştuğu görülmüştür.

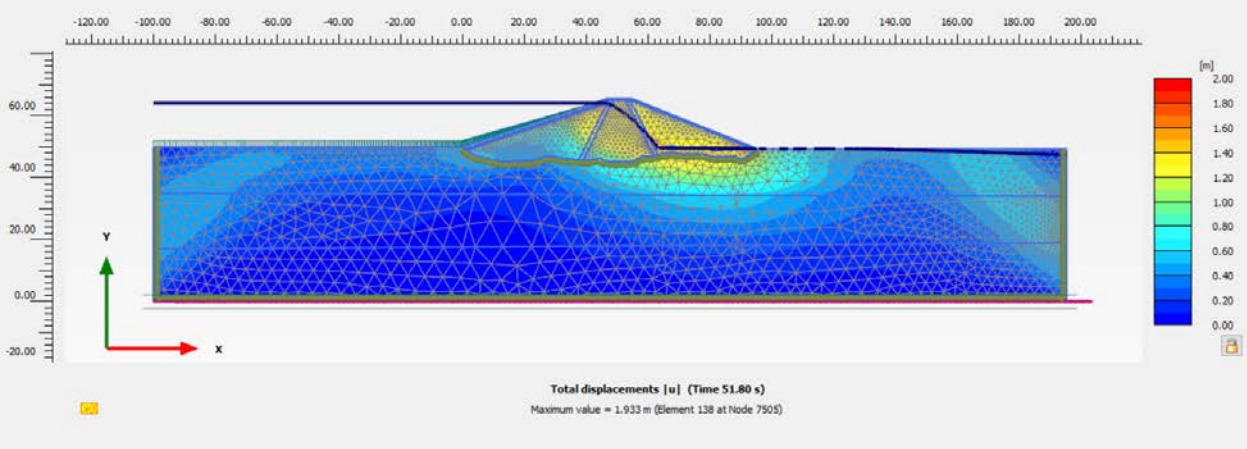
Ana kaya da oluşan deformasyonun ilk gözlemlendiği saniye 23. saniyedir ve 38.88 saniyesinde ise ana kayada oluşan deformasyonun maksimum değeri olan 0.14 m değeri gözlemlenmiştir. En büyük deformasyon değeri 59.04 m'de 0.19 m değerine ulaşmış daha sonra 37.61 m'ye kadar deformasyonda miktarında azalış görülmüştür. 37.61 m noktasından en büyük deformasyonun oluştuğu 18.02 m'ye kadar artmış ve bu noktada 0.84 m değerine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra deformasyon değerinde ciddi bir azalış gözlenmiştir ve barajın kret noktasında 0.23 m deformasyon değerine ulaşılmıştır. Profilin tümü beraber incelendiğinde anakaya davranışı 34.49 m ye kadar frekans ve genlik olarak benzerlik gösterirken 18.02 m ve 29.65 m lerdeki tabakalarda deplasman davranışının süresi artarak 65. saniyeden sonra baskın genliklere sahip harekete maruz kalmışlardır. Buna karşılık yüzeye yakın 2 tabakada ise zeminin de yarı doygun olması nedeniyle daha düşük deplasman göstermiştir.

PLAXIS 2D programında elde edilen 11 adet deprem verisinin deformasyon grafikleri EK C'de gösterilmiştir.

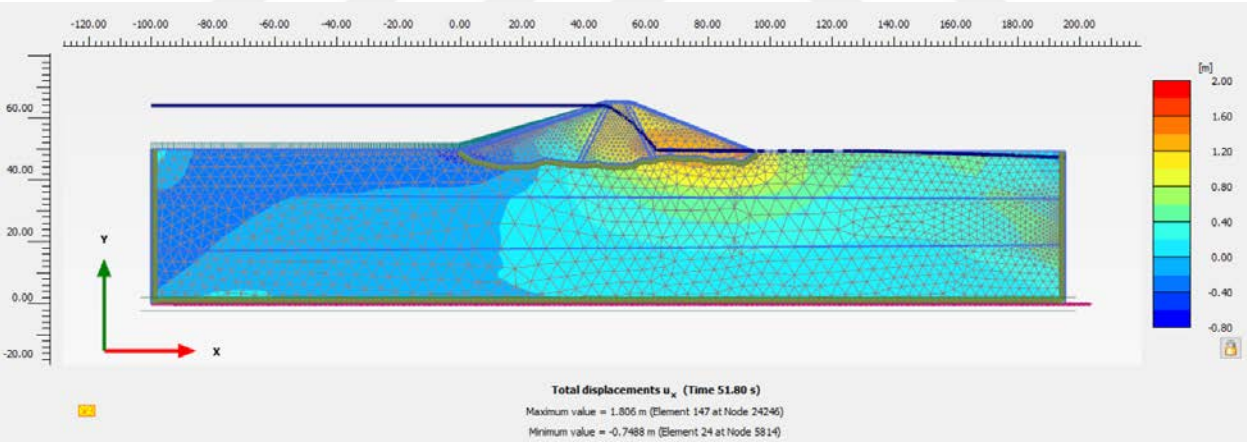


Şekil 6.8. Chichi depreminin deformasyon verileri

PLAXIS 2D programında Düzce deprem kaydının modele etki ettirildiğinde elde edilen toplam yer değiştirmeler Şekil 6.9'da ve yatay yer değiştirmeler ise Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. PLAXIS 2D programında Düzce depremine ait toplam yer değiştirmeler



Şekil 6.10. PLAXIS 2D programında Düzce depremine ait yatay yer değiştirmeler

6.2. Deepsoil

Bir önceki bölüme benzer bir şekilde, tanımlanan problemin DEEPSOIL'deki 1 boyutlu oluşturulmuş modeli 11 farklı deprem ivme kaydının etkisi altında farklı durumlara maruz bırakılmıştır. DEEPSOIL bir boyutlu analiz kapasitesine sahip olması nedeniyle, baraj ve su yapısı modellenememiş fakat gövde zemin davranışının iki boyutlu davranışı ile aralarındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla bir boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda baraj gövdesi ve profil boyunca

- İvme kayıtları
- Spektral ivme davranışı ve
- Deplasman kayıtları

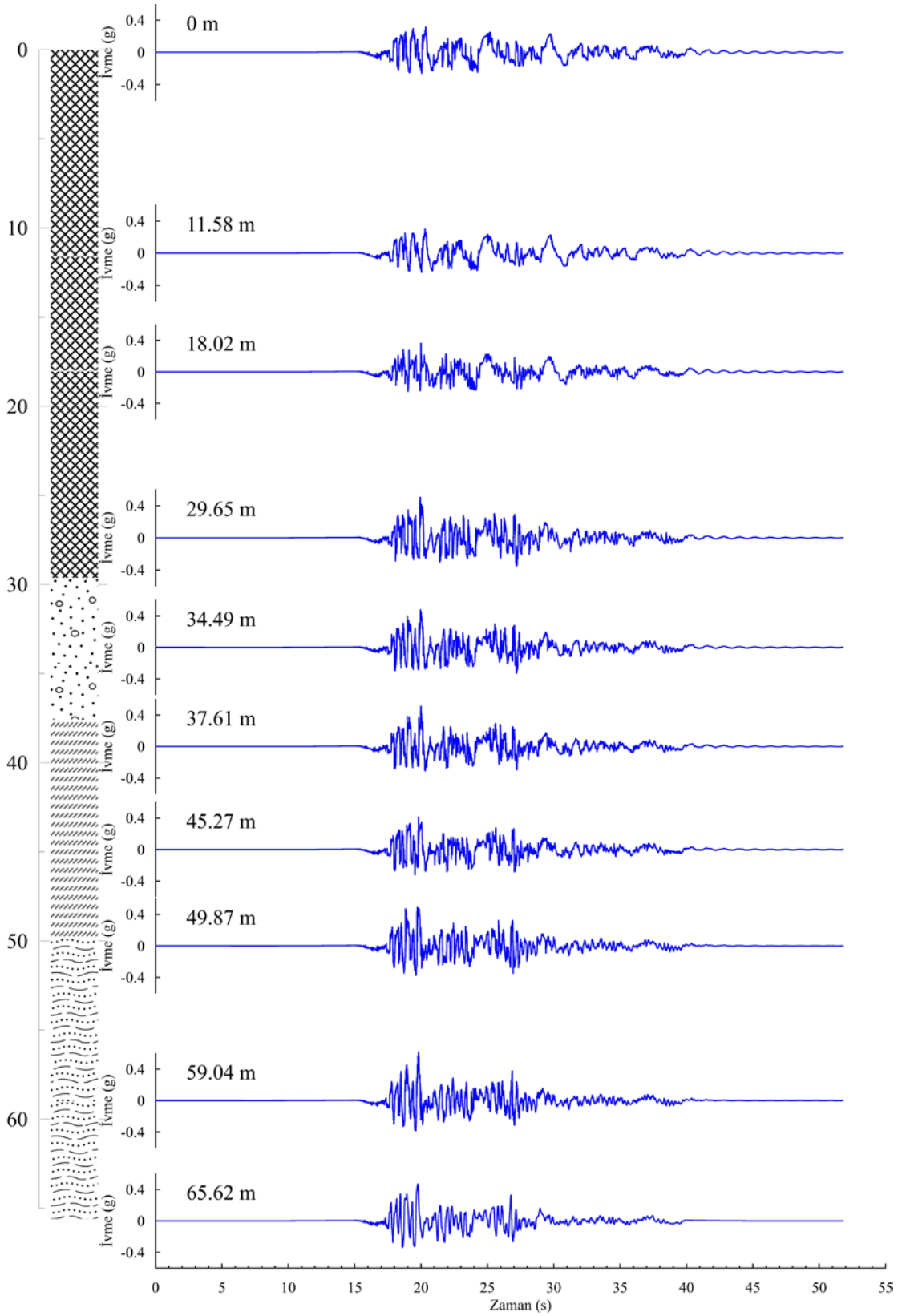
için elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. 11 deprem içerisinden iki farklı deprem kaydı seçilerek detaylı incelemeleri yapılmış vder 9 deprem kaydının sonuçları Ekler kısmında verilmiştir.

6.2.1. İvme sonuçları

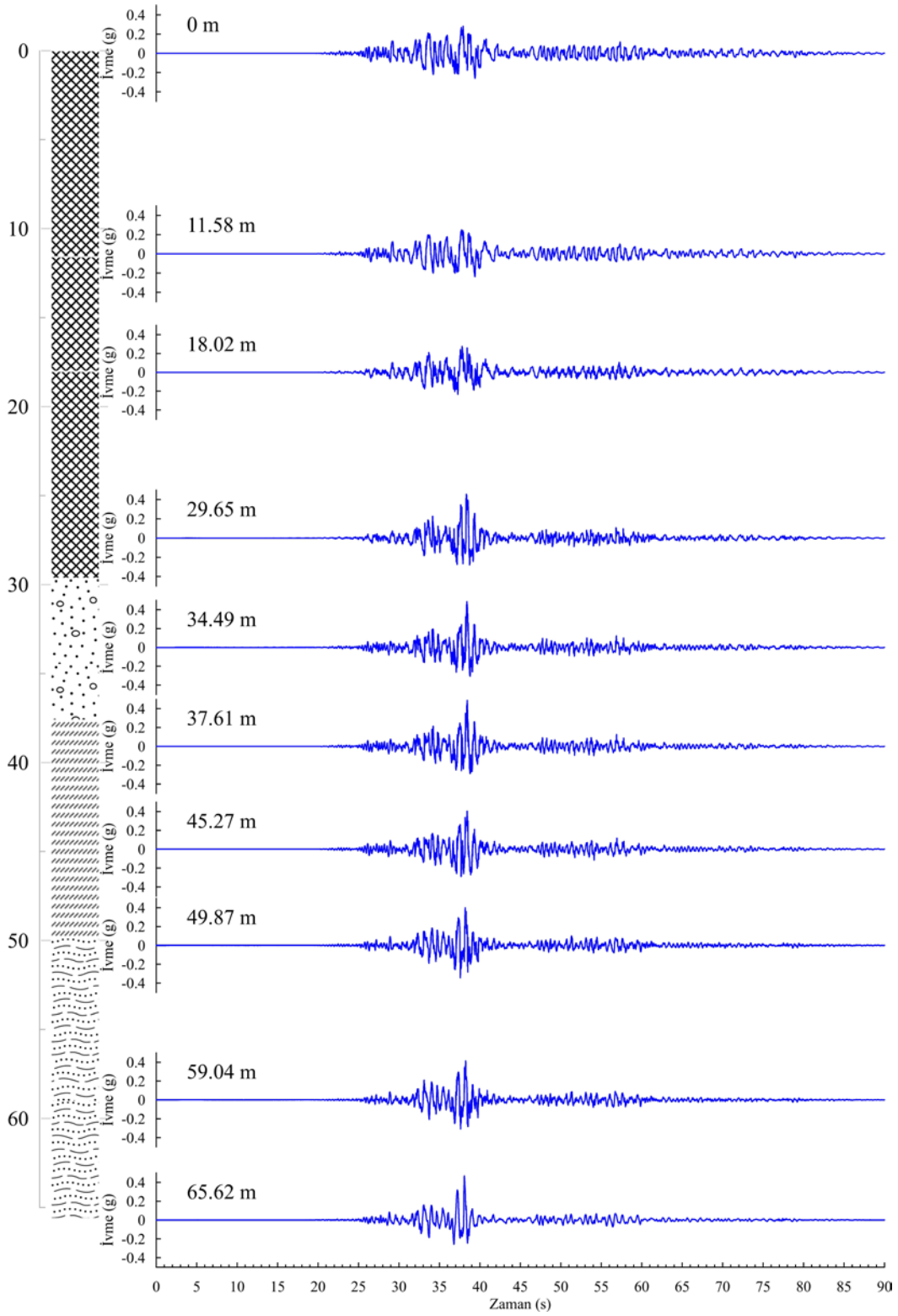
Düzce deprem kaydı ile yapılan analiz sonucunda seçilen noktalardaki ivme kayıtları Şekil 6.11'de yer almaktadır.

Gökbahçe Göleti altında bulunan ana kayaya etki ettirilen deprem kayıtlarının sonucunda elde edilen ivme grafiklerini incelediğimizde ana kayadaki ivmenin 0.469 g değerinde pik gözlemlenirken ilk zemin tabakasında 0.489 g, ikinci zemin tabakasında 0.510 g, üçüncü zemin tabakasında 0.505 g ve kret noktasında ise 0.317 g değerine sahip olduğu görülmektedir. Tabaka değişiminde yansımaların etkisi ile birlikte bazı pik değerlerinde artışlar olmuştur fakat grafiklerdeki en büyük ivme değerlerinde genel anlamda azalım olduğunu görülmektedir.

Ana kayaya ait ivme verisinde ilk pik 18. saniyede oluşmuşken bu pik değeri bir üst noktada 18. saniyede gözlemlenmiştir ve incelenen pik değerinin diğer tabakalarda da aynı saniye değerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Deprem kayıtlarına ait döngülerin üst tabakalara doğru frekans içeriği azalmıştır ve bir noktadan sonra döngülerin birleşerek yeni pikler oluşturmuştur. Yeraltı su seviyesinin üstünde yer alan kret noktasında doygunluğun azalması nedeniyle bu noktada ivme değerleri harmonik harekete benzer hareket sergilemeye başlamıştır.



Şekil 6.11. Düzce depreminin ivme verileri



Şekil 6.12. Chichi depreminin ivme verileri

Chi-Chi Depreminin ana kaya ivmesi olarak etki ettirilmesiyle yapılan analiz sonucunda elde edilen ivme kayıtları Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

Analizin gerçekleştirilmesinde kullanılan ana kaya ivme değeri olan 0.469 g değeri en alt noktada piki oluşturmaktadır ve ilk zemin tabakasında 0.400 g, ikinci zemin tabakasında 0.487 g, üçüncü zemin tabakasında 0.454 g ve kret noktasında ise 0.280 g değerine sahip olduğu görülmektedir. Tabaka değişiminde yansıma etkisi nedeniyle bazı tabakalardaki pik değerlerinde artışlar olmuştur.

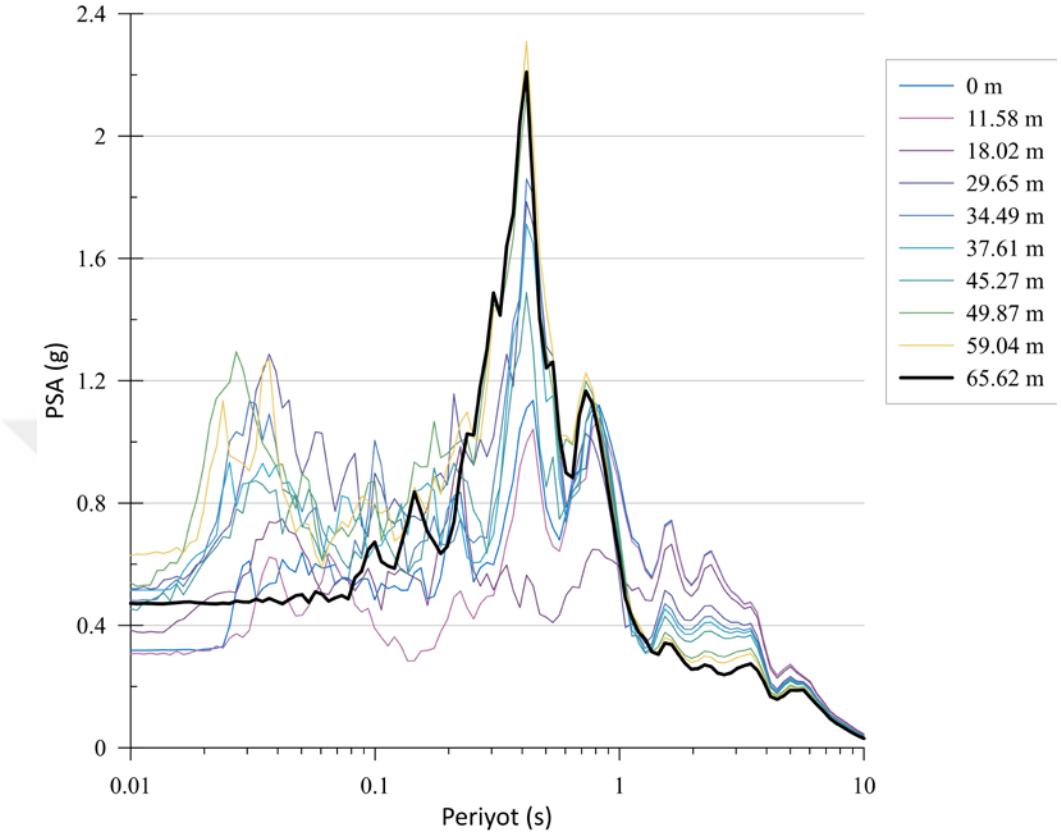
Ana kayaya ait ivme verisinde ilk pik 38. saniyede oluşmuşken bu pik değeri bir üst noktada 38. saniyede gözlemlenmiştir ve incelenen pik değerinin diğer tabakalarda da aynı saniye değerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu verilerin ışığında sismik Düzce ve Chi-Chi deprem kayıtlarının analizi sonucunda elde edilen sonuçlarda tabaklar benzer davranış göstermediği görülmektedir. Deepsoil programında elde edilen 11 deprem verisine ait ivme grafikleri EK D'de gösterilmiştir.

6.2.2. En büyük spektral ivme sonuçları

Sismik deprem yükleri altında yapılan analizler sonucunda Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Grafiklerde baskın siyah çizgi ile ifade edilen ivme verisi ana kaya kaydına aittir. Ana kayaya ait spektral ivme incelendiğinde, pikin ilk oluştuğu yer 2.2 g değerindeyken, zemin tabakaları ve göletin kil çekirdeğindeki noktalarda 2.2 g'den daha küçük olduğu görülmüştür. Ana kaya ivmesine ait periyot süresi 0.4 saniyede görülürken diğer noktalarda 0.02-0.03 saniye aralığında görülmüştür.

İkinci pik değerleri ana kayada 1.15 g ve periyot süresi 0.8 saniyede oluşmuştur. Zemin katmanları ve göletteki noktalar incelendiğinde 1.0-2.2 g ve periyot süresinin 0.4 saniyede oluştuğu görülmektedir. Rezonans halinden kaçınmak için spektral ivmelerin büyük olduğu bu aralıktan mümkün olduğunca uzak bir yapı periyodu seçilerek güvenli tasarım gerekmektedir. Grafikte başlangıç PSA değerinin artış gösterdiği periyot ile PSA değerinin başlangıç değerinden küçük olduğu periyot aralığı periyot genişliği olarak ifade edilmektedir ve baskın ana kaya ivmesinin ilk periyot genişliği geniş iken diğer noktalarda daha dardır.



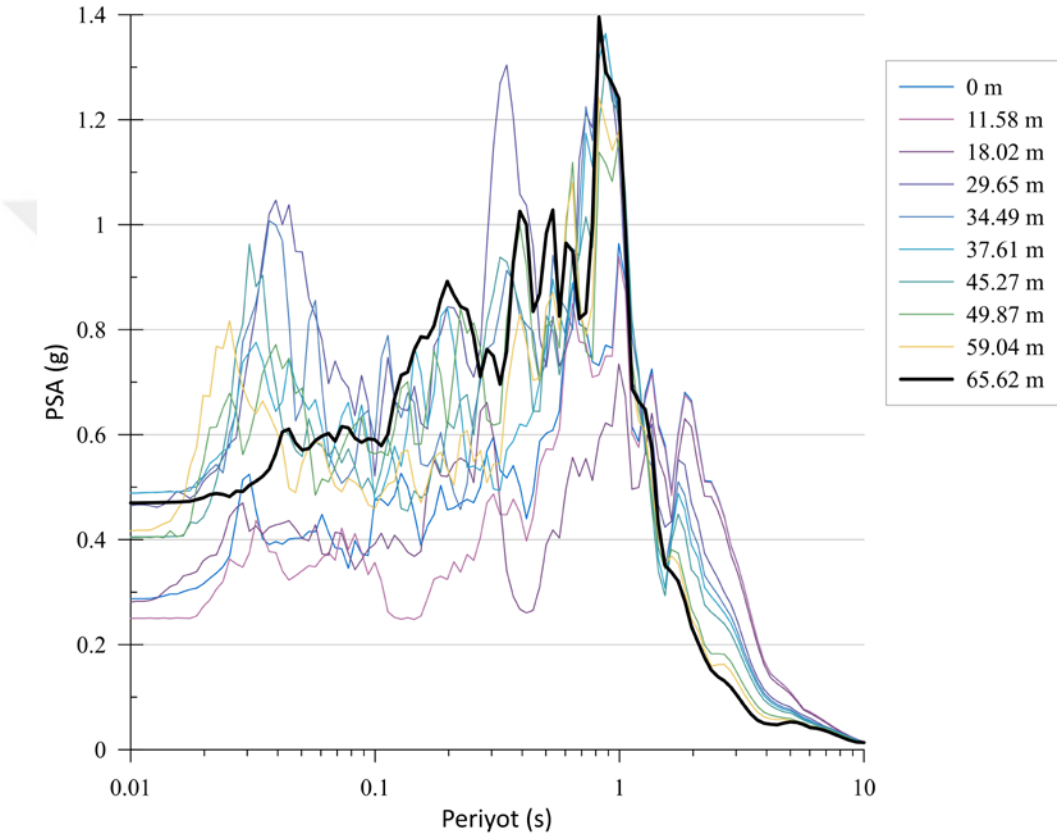
Şekil 6.13. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri

Şekil 6.14'te sismik Chi-Chi deprem kaydı ile yapılan analizin en büyük spektral ivme sonuçları gösterilmiştir.

Ana kaya ivmesinin oluştuğu maksimum pik değeri 1.4 g değerindeyken zemin tabakaları ve göletin kil çekirdeğindeki noktalarda 1.4 g'den daha küçük olduğu görülmüştür. Maksimum en büyük spektral ivme ana kayada 0.85 saniye periyodunda oluştuğu görülürken diğer noktalarında bu zamanda maksimum değerlere ulaştığını görülmektedir.

İlk pik değerleri ana kayada 0.9 g ve periyot süresi 0.2 saniyede oluşmuştur. Zemin katmanları ve göletteki noktalar incelendiğinde 0.70-1.05 g ve periyot süresinin 0.02-0.04 saniyesinde oluştuğu görülmektedir.

Grafikte periyot süresinin başlangıç ve bitiş süreleri periyot genişliğini ifade etmektedir ve baskın ana kaya ivmesinin ilk periyot genişliği geniş iken oluşan diğer piklerle birlikte periyot genişliği daralmıştır. Seçilen diğer noktalarda da ana kaya ivmesine benzer davranış göstermektedir. 11 deprem verisine ait en büyük spektral ivme grafikleri EK E'de gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri

6.2.3. Deformasyon sonuçları

Şekil 6.15'te Düzce depreminin baraj modelinde oluşturmuş olduğu deformasyon miktarını gösteren kayıtlar yer almaktadır.

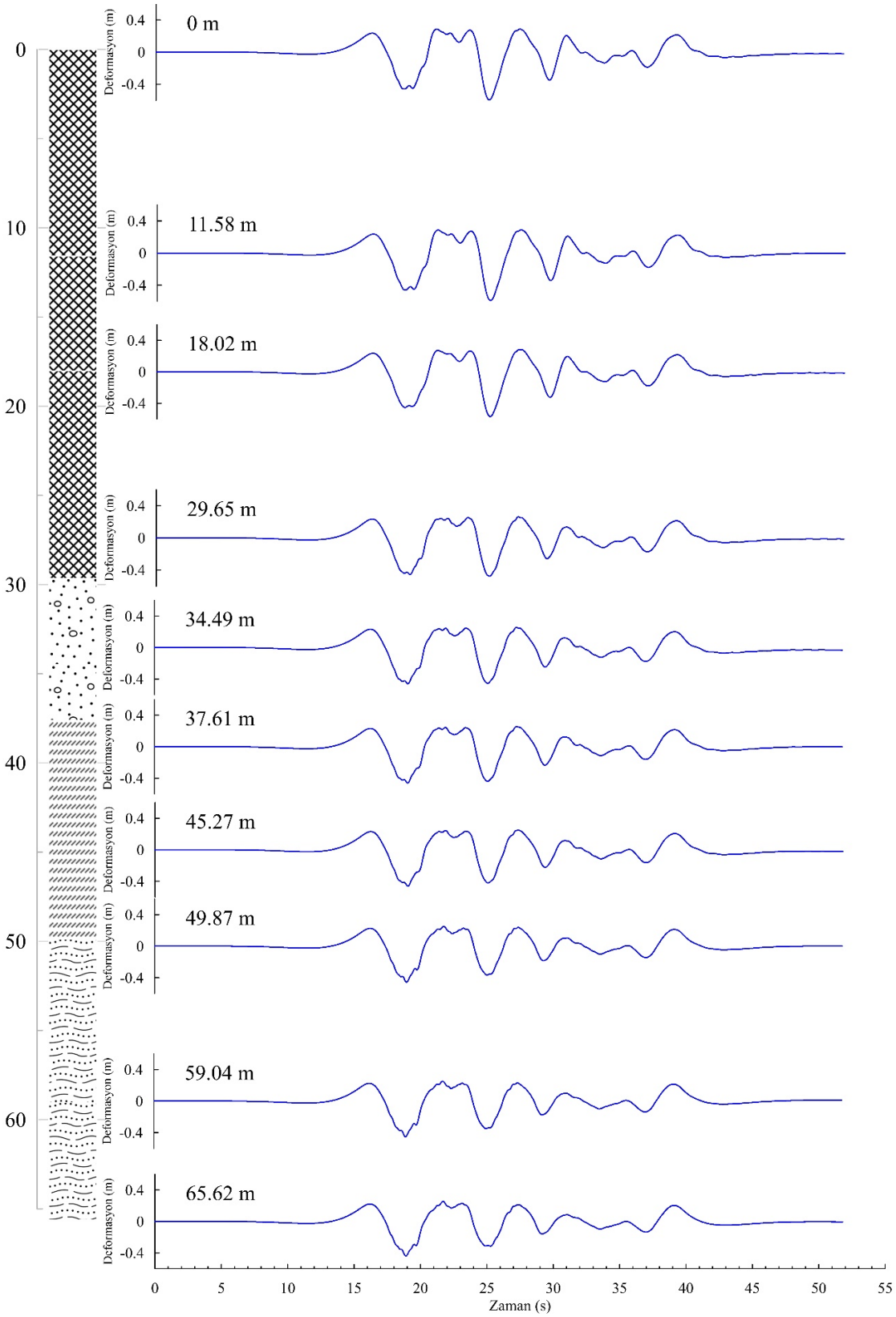
İvme verilerinde en fazla frekans değerine sahip olan ivme grafiklerinin integrasyondan kaynaklı olarak en büyük deformasyon değerlerini göstermektedir. Deformasyon verileri incelendiğinde 25.11 saniyesinde en büyük deformasyon miktarı 0.59 m olarak barajın kretinde görülmektedir ve bu noktada

oluşan deformasyon piki kısa süre içerisinde 19.34 saniyesinde maksimum pikten önce bir deformasyon piki oluşmuştur.

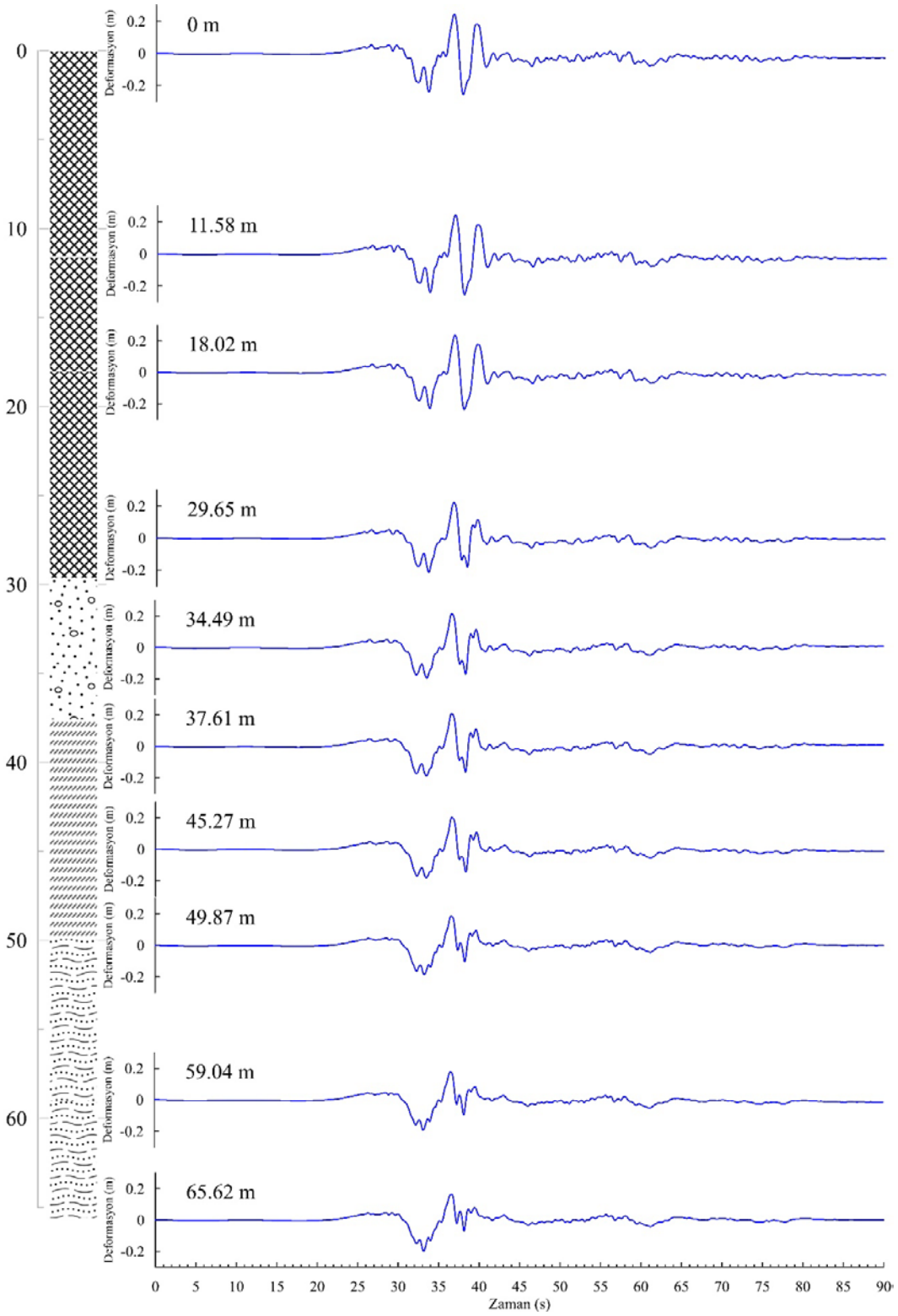
Ana kayadaki maksimum deformasyonun oluşumu 18.90 saniyesinde görülmektedir, bu noktanın en büyük deformasyon değeri 0.43 m değerine ulaştığı görülmektedir. En büyük deformasyon değeri anakayadan barajın kretine kadar deformasyonun arttığı görülmektedir. Profilin tümü beraber düşünüldüğünde, iki boyutlu analizin aksine tabakarların hissettiği deformasyon davranışında bir sekronizasyon olduğu görülmüştür. Genlik ve frekans içeriği bakımında anakaya davranışı çok değişmemiştir.

Chi-Chi sismik deprem kaydı altında model de oluşan deformasyon değerleri Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Chi-Chi sismik deprem kaydının oluşturduğu deformasyon verilerine bakıldığında en büyük deformasyon değerinin barajın kret noktasında 37.91. saniyede oluştuğu görülmektedir. Chi-Chi deprem kayıtlarında ilk pik değerinin 36.81 saniyesinde oluştuğu görülmüştür.

Ana kayada oluşan en büyük deformasyonu 33.14 saniyesinde görülmektedir ve 0.19m değerindedir. Ana kayada oluşan deformasyon değerinin barajın kret noktasına kadar artış göstererek 0.25 m değerine ulaştığı görülmüştür. Düzce depremine kıyasen, anakaya ivmesinin frekans içeriği değişmişken benzer davranış bu analizde de gerçeklelmiştir. Fakat hatırlanacağı üzere, iki boyutlu analizlerde davranış farklılık göstermişti. Deepsoil programında elde edilen 11 adet deprem verisinin deformasyon grafikleri EK F'de gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Düzce depreminin deformasyon verileri



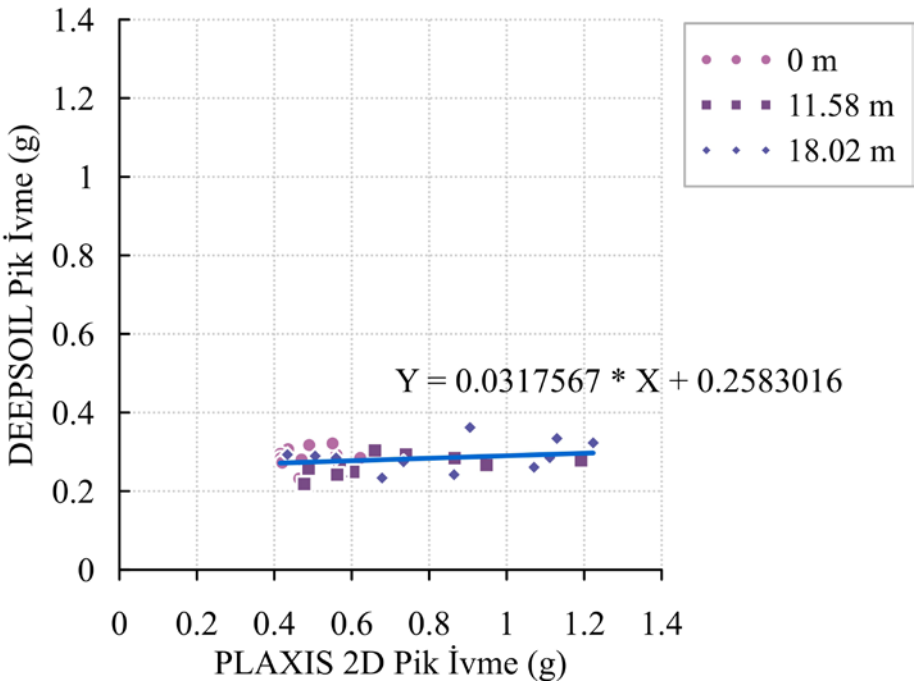
Şekil 6.16. Chichi depreminin deformasyon verileri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

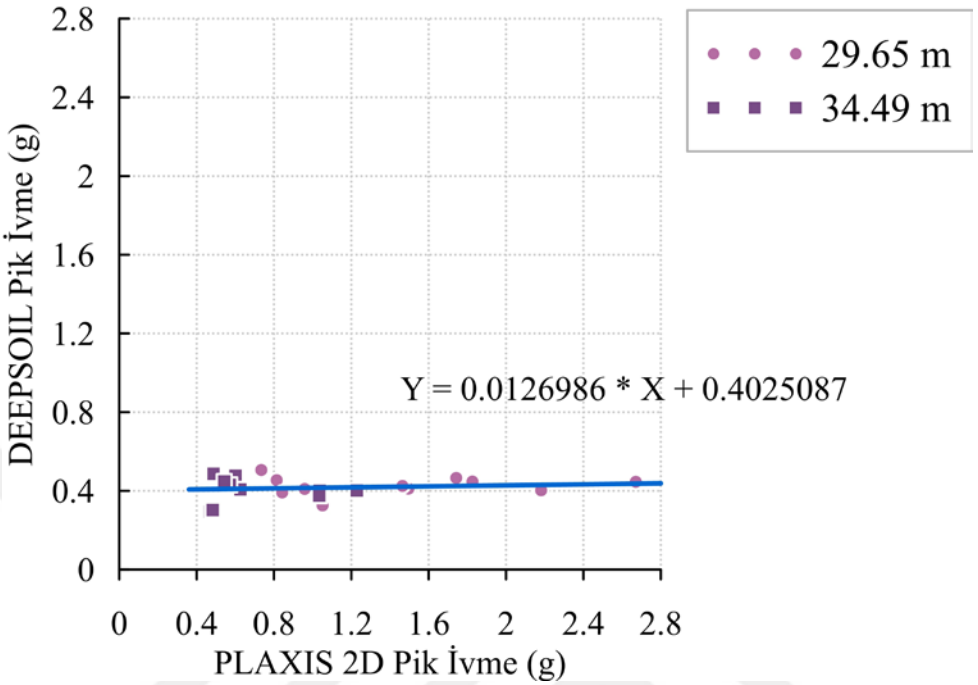
Bu bölümde bulgular ve tartışma bölümü ile ekler bölümünde gösterilen grafiklerin özet grafikleri tartışılmıştır. Analiz sonuçları 4 ana başlıkta incelenmiş, bu başlıklar her tabaka için ivme grafikleri, deformasyon grafikleri, spektral ivme grafiği ve periyodun 1. saniyedeki spektral ivme grafikleridir.

7.1 İvme Grafikleri

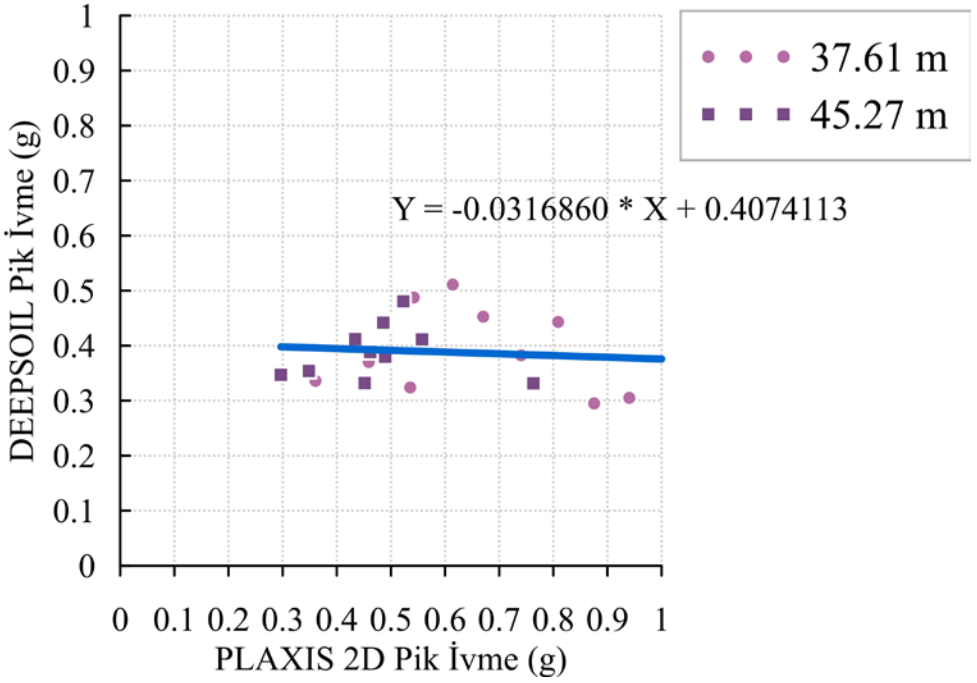
Deepsoil ve PLAXIS 2D programlarında yapılan analizlerde elde edilen pik ivme değerleri için Şekil 7.1'de baraj gövdesi ve tabakalar için ayrı ayrı özet grafikler oluşturulmuştur. Modelde tanımlanmış olan her bir noktanın iki programdaki sonuç verileri karşılaştırılmıştır.



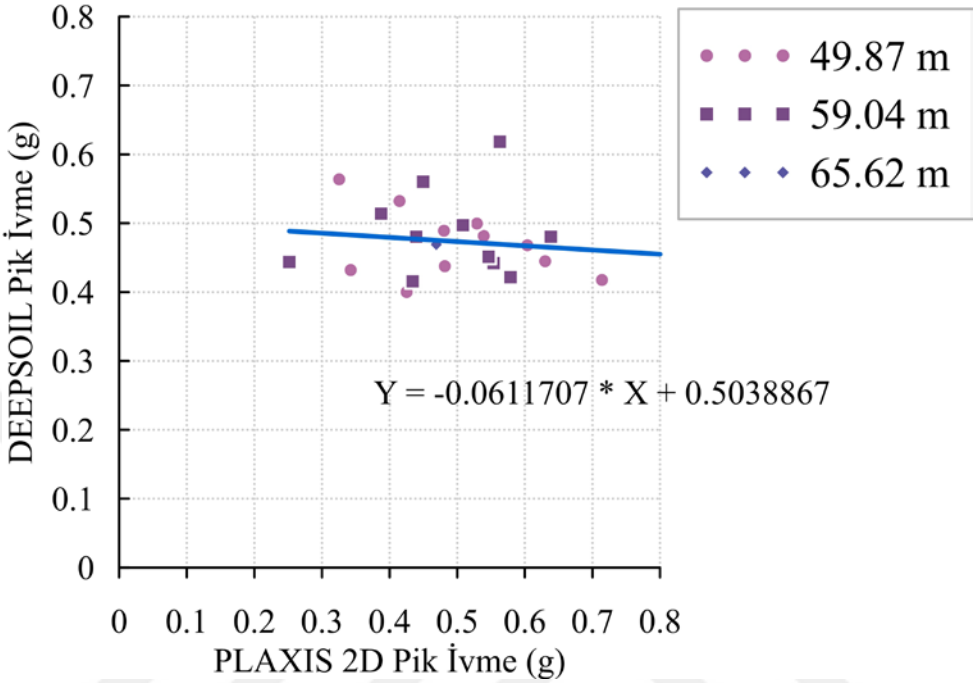
(a) Kil çekirdeğe ait ivme verileri



(b) Kil 1 isimli tabakaya ait ivme verileri



(c) Kil 2 isimli tabakaya ait ivme verileri



(d) Kil 3 isimli tabakaya ait ivme verileri

Şekil 7.1. (a) Kil çekirdeğe ait ivme verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait ivme verileri, (c) Kil 2 isimli tabakaya ait ivme verileri, (d) Kil 3 isimli tabakaya ait ivme verileri

İvme grafikleri ana kayadan başlanarak inceleyecek olursak deprem kayıtlarına ait maksimum değerlerin 3 numaralı kil tabakasında DEEPSOIL programında 65.62 m'deki noktada neredeyse değişim göstermemiştir, fakat 59.04 m ve 49.87 m'deki noktalarda bütün ivmelerin zemin tarafından büyütüldüğü görülmüştür. PLAXIS 2D programında ise 65.62 m'deki ana kaya ivmeleri 0.469 g değerinde iken 59.04 m ve 49.87 m'de ivme değerlerinde çeşitlilik göstermektedir bazı deprem kayıtlarına ait ivme değerlerini zemin büyütmüşken bazı depremler kayıtlarına ait ivmeler değerleri sönümlenmiştir.

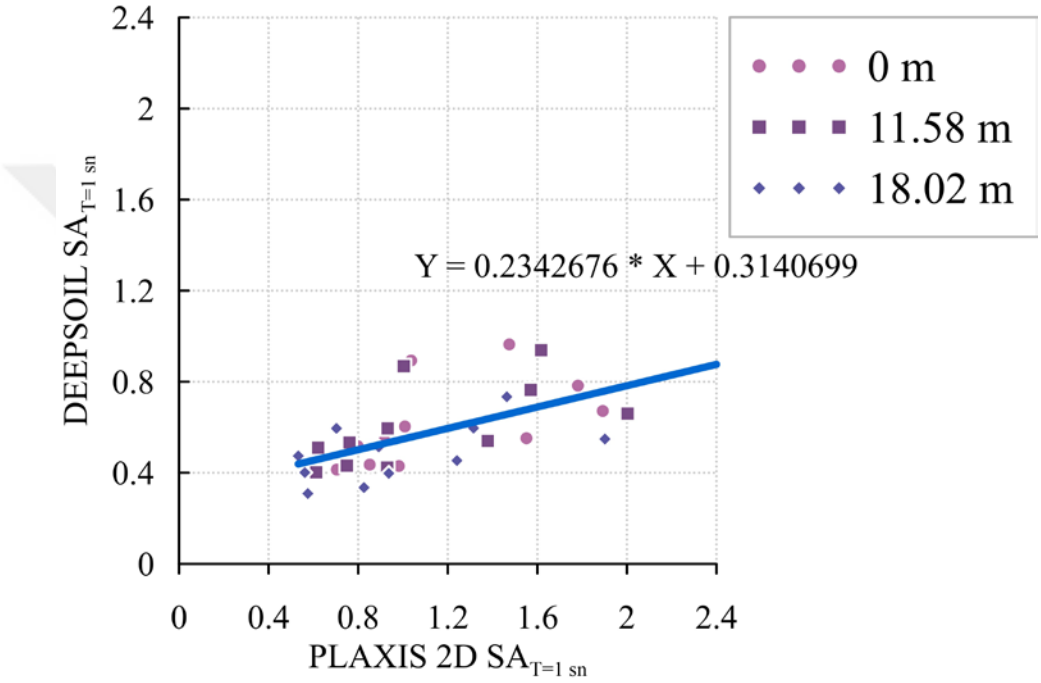
PLAXIS verileri için 3 numaralı kil tabasında davranışın benzeri 2 numaralı kil tabakasında devam etmekte iken DEEPSOIL programına ait verilerin 37.61 m ve 45.27 m'deki değerlerinde zeminin davranışının değiştiği ivme büyütmesinin bazı deprem verileri için sönümleme davranışı gösterdiği görülmüştür.

1 numaralı tabakaya ait grafik incelendiğinde DEEPSOIL programındaki ivme verilerinin 0.469 g değerinin altında kaldığı ve zeminin sönümleme etkisi olduğu görülmektedir. PLAXIS programı için bu yorum yapılamamaktadır çünkü ivmelerin büyük çoğunluğunda zemin ivme değerlerini büyütmeye devam etmekteyken 0.469 g değerinin altında ivmelerinde olduğu görülmektedir.

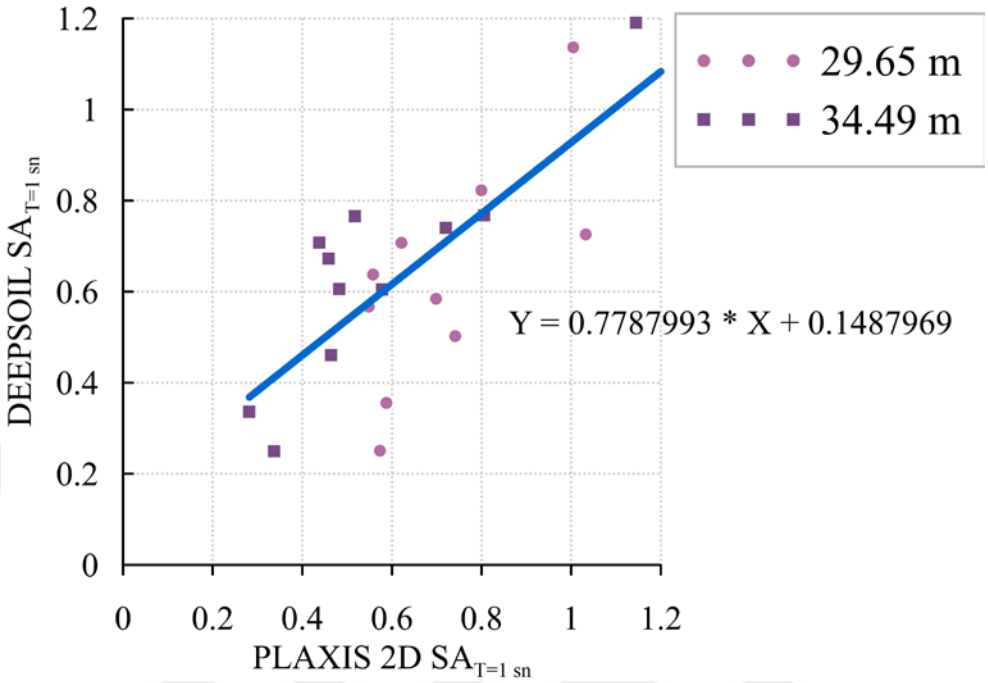
En son tabaka olan göletin kil çekirdeğine bakıldığında PLAXIS'in 1 numaralı kil tabakası ile benzer bir eğilim göstermektedir. DEEPSOIL verilerinde ise maksimum ivme değerlerinin hepsinin 0.469 g değerinin altında kaldığı ve zemini sönümleme davranışı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla 11 farklı süre ve frekans içeriğine sahip deprem kayıtlarının uygulandığı bir zemin kolonu yüzeyinde tahmin edilen davranış DEEPSOIL modeli için çok farklılık göstermemesine rağmen, PLAXIS modeli farklı kayıtlar için farklı sonuçlar tahmin etmiştir. Boyut etkisinin yanında, elemanların birbirlerine aktardıkları gerilme ve dolayısıyla dalga hareketi değişmiş ve pik ivme bakımından büyük farklılık göstermiştir.

7.2. Periyodun 1. Saniyedeki SA Grafikleri

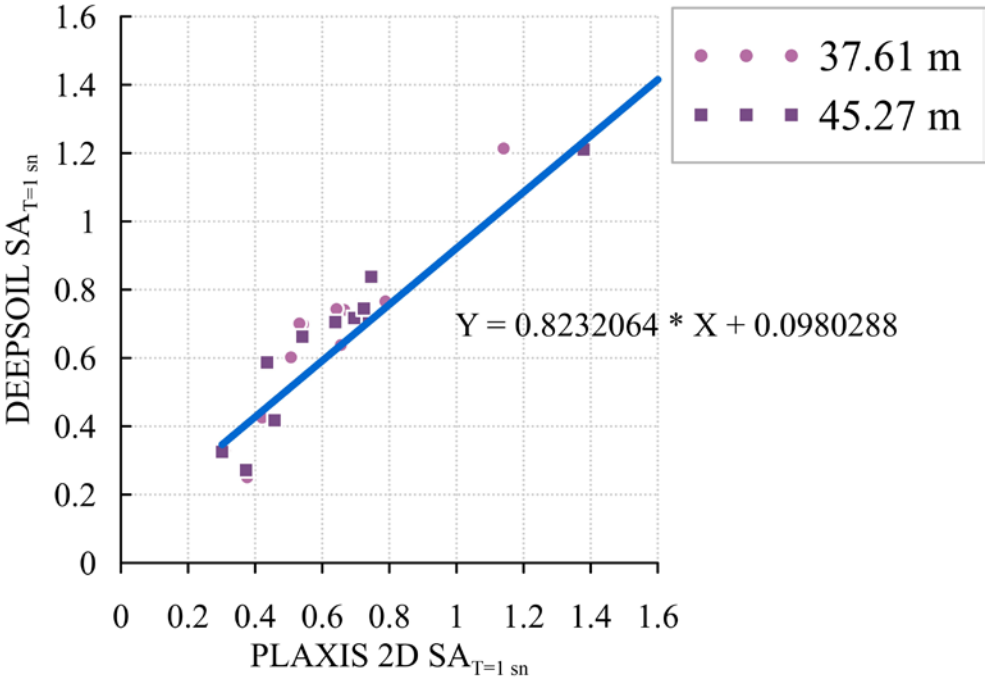
Yapılan dinamik analizler sonucunda spektral ivme verileri elde edilmiştir. Periyot değerinin 1 saniye olduğundaki SA değerleri çekilerek Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



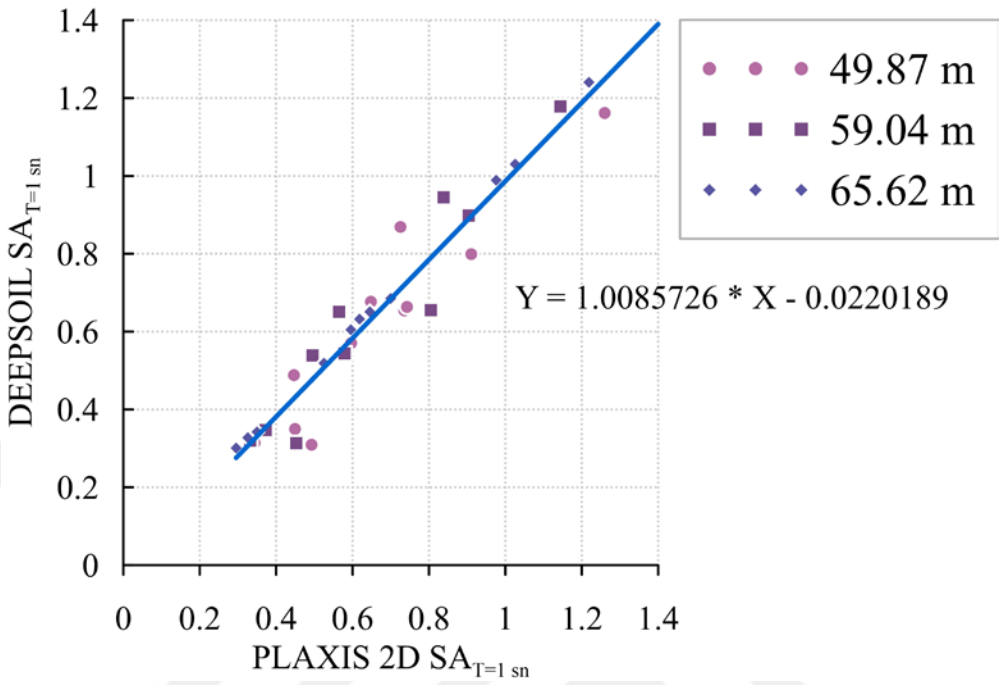
(a) Kil çekirdeğe ait 1. saniye periyodun SA verileri



(b) Kil 1 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri



(c) Kil 2 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri



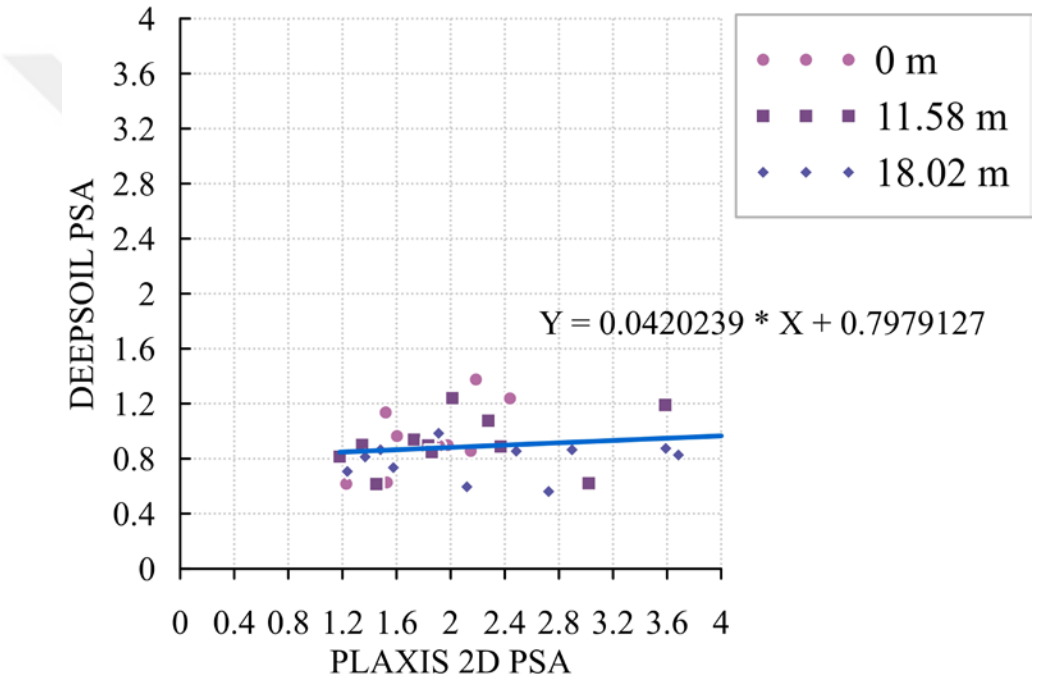
(d) Kil 3 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri

Şekil 7.2. (a) Kil çekirdeğe ait 1. saniye periyodun SA verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri, Kil 2 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri, Kil 3 isimli tabakaya ait 1. saniye periyodun SA verileri

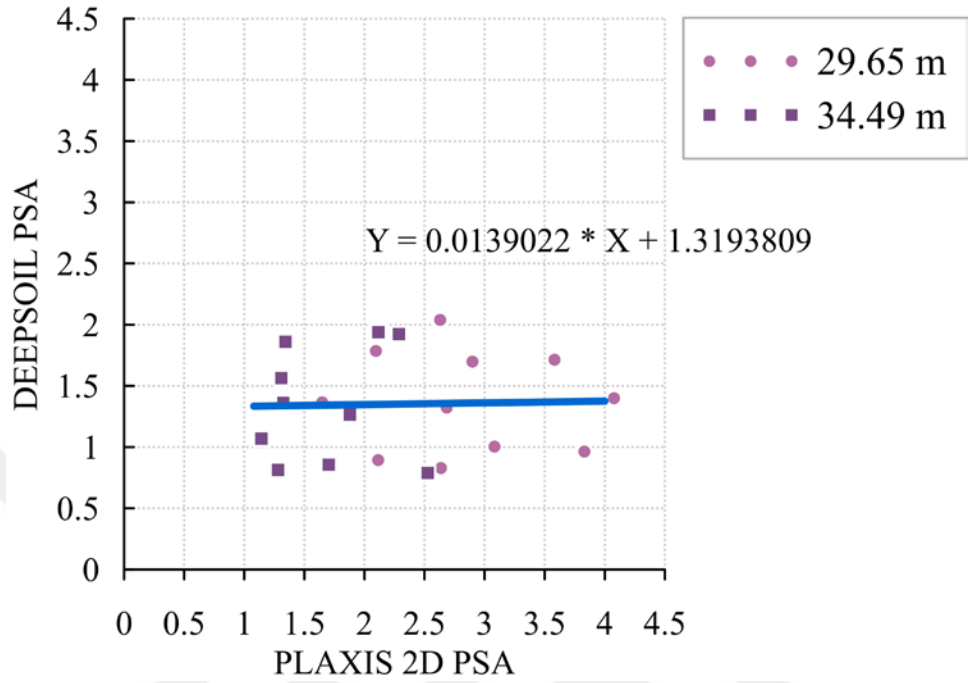
En büyük psüdo-spektral ivmelerin T=1 sn'deki değerlerinin grafikleri incelendiğinde 1,2 ve 3 numaralı kil tabakaları için olan grafiklerde 40-45 °'lik bir eğilim çizgisi olduğu görülmektedir. Bu eğilim çizgileri dikkate alındığında DEEPSOIL ve PLAXIS 2D programlarından elde edilen verilerin aynı deprem kayıtları için benzer spektral ivme değerlerine sahip olduğunu anlaşılmaktadır fakat göletin kil çekirdeğine ait eğilim eğrisi incelendiğinde PLAXIS 2D programında elde edilen verilerin DEEPSOIL programından elde edilen verilerden büyük olduğu görülmektedir. Zeminin bu tabakada yarı doygun olması ve gövdenin arkasındaki suyun varlığı sebebiyle böyle bir farkın ortaya çıkıldığı düşünülmektedir. Fakat aralarındaki koleratif ilişkinin çok kötü olduğu söylenemez.

7.3. PSA Grafikleri

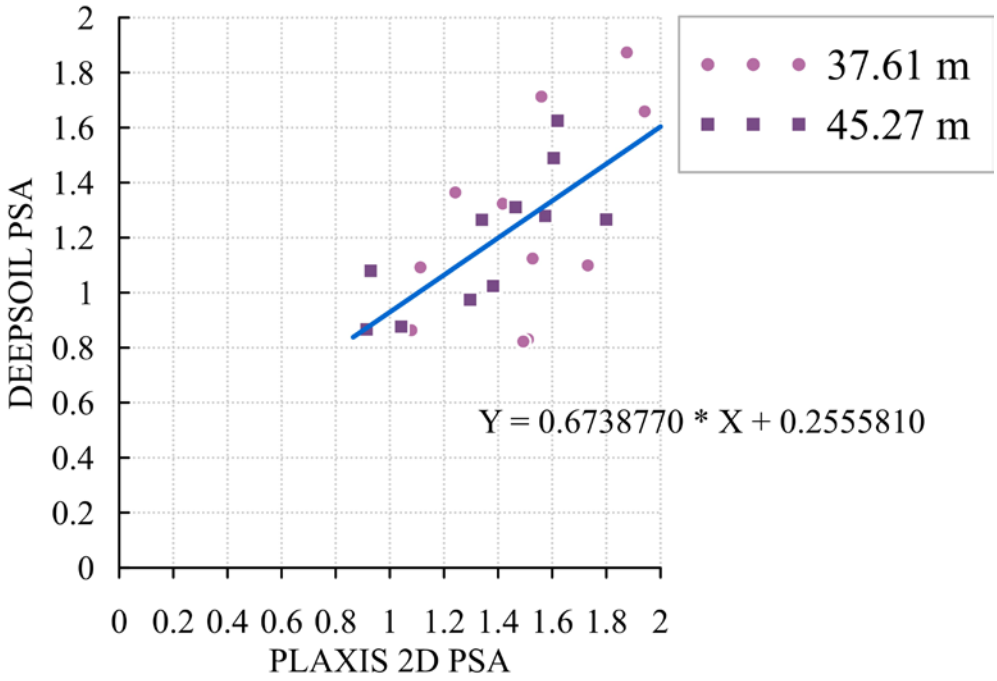
Deepsoil ve PLAXIS 2D'de yapıla dinamik analiz sonucunda PSA grafikleri elde edilmiştir. 11 deprem için elde edilen PSA grafiklerinden her nokta için maksimum değere sahip olan veriler alınarak Şekil 7.3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



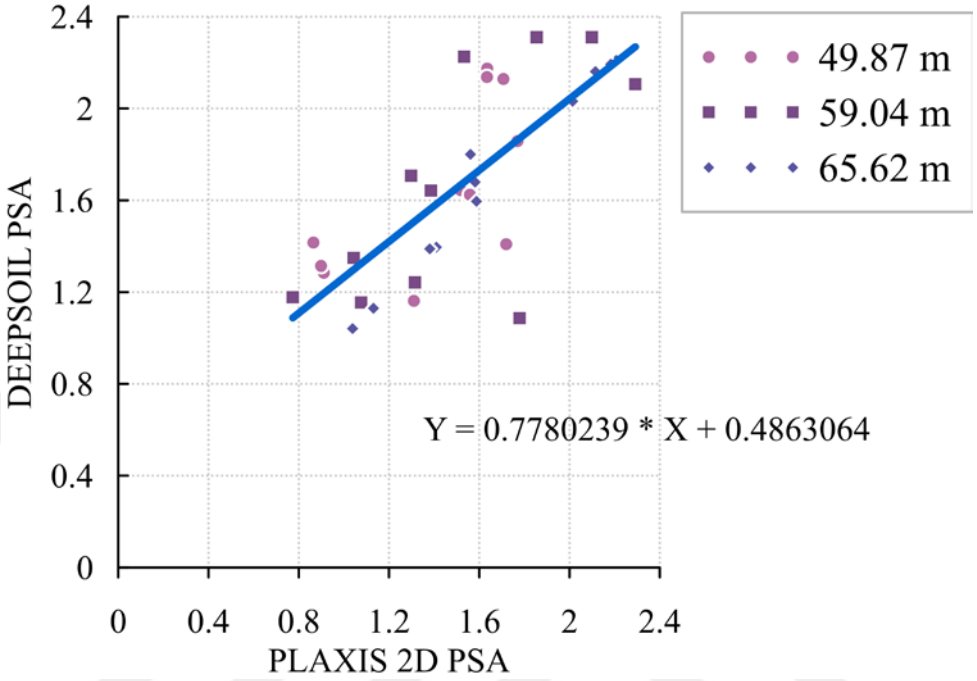
(a) Kil çekirdeğe ait PSA verileri



(b) Kil 1 isimli tabakaya ait PSA verileri



(c) Kil 2 isimli tabakaya ait PSA verileri



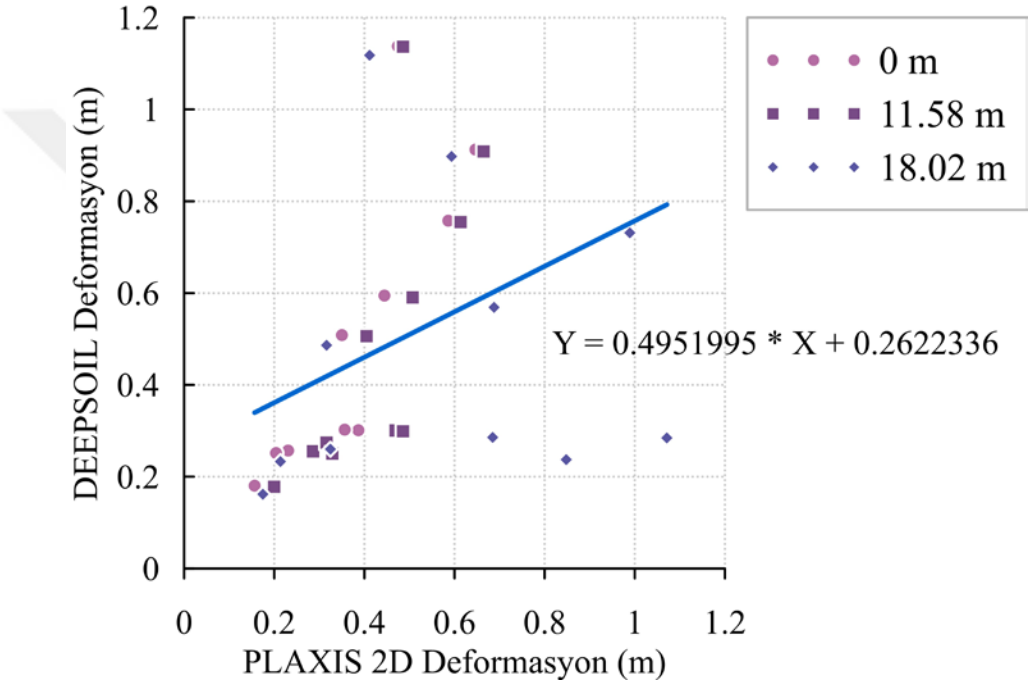
(d) Kil 3 isimli tabakaya ait PSA verileri

Şekil 7.3. (a) Kil çekirdeğe ait PSA verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait PSA verileri, (c) Kil 2 isimli tabakaya ait PSA verileri, (d) Kil 3 isimli tabakaya ait PSA verileri

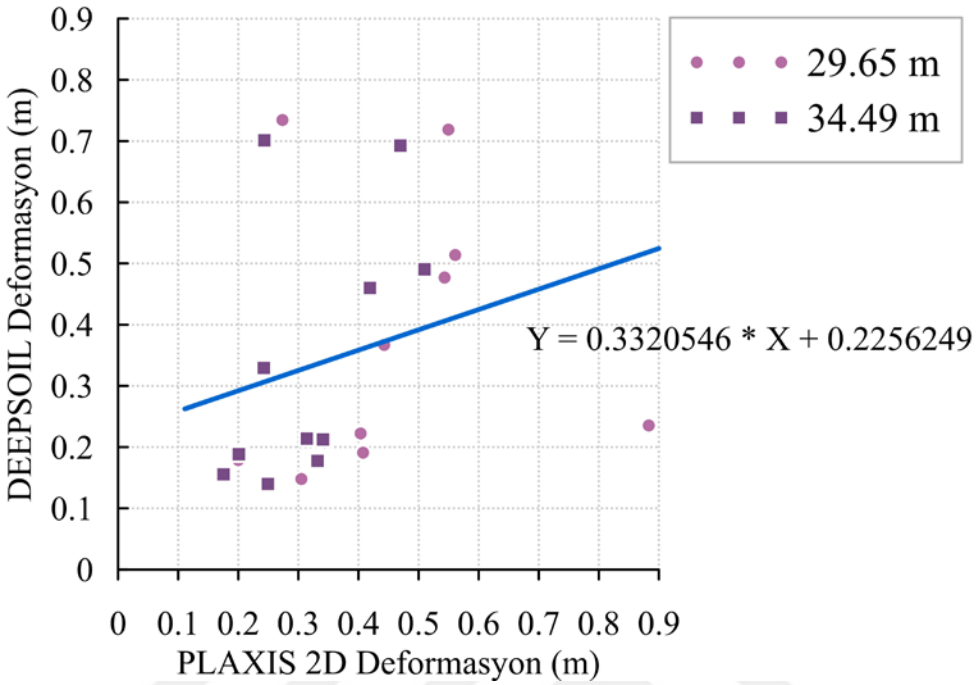
Bu bölümde en büyük psüdo-spektral ivme değerleri değerlendirildiğinde 2 ve 3 numaralı kil tabaklarında yaklaşık 40˚'lik bir eğilim çizgisine sahip olduğu için DEEPSOIL ve PLAXIS 2D programlarından elde edilmiş olan sonuçların benzer olduğu anlaşılmaktadır. 1 numaralı kil tabakasına ait grafiğin eğilim eğrisi incelendiğinde DEEPSOIL verilerinin değişiminin azaldığı fakat PLAXIS 2D program verilerinin arttığı görülmektedir. 1 numaralı kil tabakasındaki eğilim eğrisinin göletin kil çekirdeğinde de benzerlik gösterdiği görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere maksimum spektral ivmeler için anakayaya yakın derin tabakalarda programlar yakın bir davranış tahmininde bulunurken, çekirdek bölgesine yaklaştıkça bulunan değerler birbirlerinden ayrılmaktadır.

7.4. Deformasyon Grafikleri

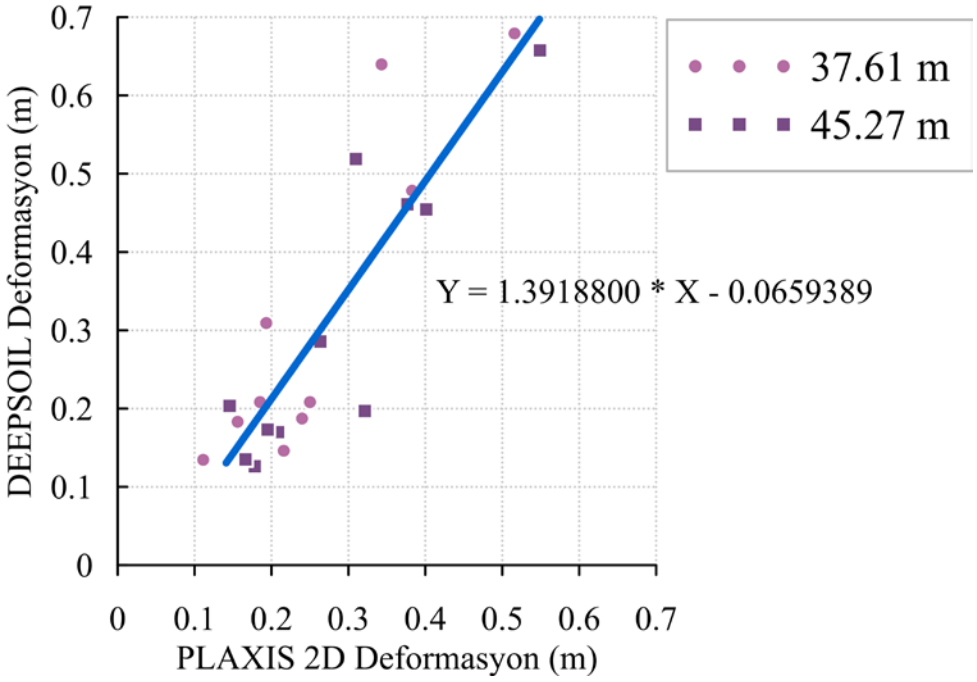
11 farklı deprem için yapılan analizler sonucunda her bir nokta için deformasyon değerleri elde edilmiştir. Modelde analizi gerçekleştirilen her nokta için maksimum deformasyon miktarının tespit edildiği değerler alınarak analizin yapıldığı iki program verileri karşılaştırılmıştır.



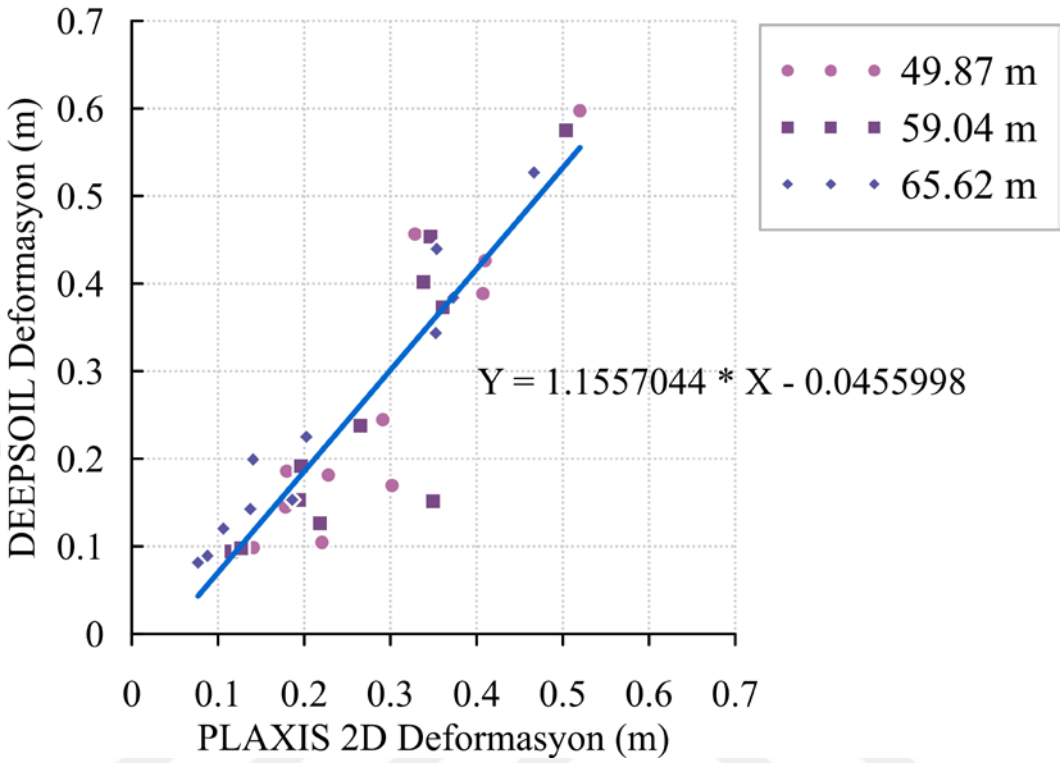
(a) Kil çekirdeğe ait deformasyon verileri



(b) Kil 1 isimli tabakaya ait deformasyon verileri



(c) Kil 2 isimli tabakaya ait deformasyon verileri



(d) Kil 3 isimli tabakaya ait deformasyon verileri

Şekil 7.4. (a) Kil çekirdeğe ait deformasyon verileri, (b) Kil 1 isimli tabakaya ait deformasyon verileri, (c) Kil 2 isimli tabakaya ait deformasyon verileri, (d) Kil 3 isimli tabakaya ait deformasyon verileri

Seyitgazi Gökbahçe Göletinin sismik etkiler altındaki deformasyon değerleri incelendiğinde 2 ve 3 numaralı kil tabakalarında grafiklerin eğilim eğrilerinin 55 °'lik bir eğime sahip olduğu görülmektedir. 1 numaralı kil tabakasına ve göletin kil çekirdeğine ait deformasyon grafiğinin eğilim eğrisinin açısı 55 °'den daha düşük olduğu için bu tabakada PLAXIS 2D programına ait deformasyon değerlerinin DEEPSOIL programına göre daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu bölgedeki suyun akış halinde olmasından kaynaklı olarak değişim gösterdiği söylenebilir.

7.5 Öneriler

DEEPSOIL ve PLAXIS 2D sonlu eleman programlarına ait göletin kil çekirdeğinde ve 1 numaralı kil tabakasında grafiklerdeki verilerin farklı olmasının nedeni DEEPSOIL programında bir boyutlu tasarım yapıldığı için zeminin modelin her iki yan yüzeyinde devam ettiği varsayılmaktayken PLAXIS 2D programında barajın kesitinin ve rezervuar bölgesindeki suyun etkisinin program tarafından dikkate alınmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bir boyutlu model ile iki boyutlu model arasında modelin sahip olduğu kesitin sonuçlara doğrudan etkisinin olduğu söylenebilir. PLAXIS 2D modelinin 2 ve 3 numaralı kil tabakalarında yan yüzeylerde zeminin sürekliliğinin DEEPSOIL modeli ile benzerlik gösterdiği ve bu bölgelerde yer altı seviyesindeki akımın nispeten durağın olduğu için iki program arasındaki sonuçlar arasında benzerlik görülmektedir.

Bu grafiklerde PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında deprem kaydının modelin solundan sağına doğru verildiğinde elde edilen sonuçları göstermektedir fakat deprem modelin sağdan sola doğru verildiğinde farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu farklı sonuçların elde edilmesindeki en önemli nedeni göletin rezervuar bölgesindeki suyun etkisi olması ve memba ile mansap şev eğim açılarının farklı olmasındır. Bu farklılık DEEPSOIL programında görülmemektedir. Bu durum modelleme yapılırken kesinlikle dikkate alınmalıdır. Göletin sismik davranışı incelenecek olursa göletin sahip olduğu kesit ve rezervuar bölgesinde su dikkate alınması gerektiği için PLAXIS 2D programının kullanılması tavsiye edilmektedir ancak baraj inşasından önce şantiye sahasının sismik davranışı incelenecek olursa PLAXIS 2D ve DEEPSOIL programlarından herhangi birinin kullanılmasında bir sakınca bulunmamaktadır.

Dinamik analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının süre ve frekans içeriklerinin de baraj gövde davranışını değiştirdiği gözlenmiştir. PLAXIS modeli bu farklılaşma barzi bir şekilde ortaya çıkarken DEEPSOIL modeli daha stabil yüzey hareketi/davranışı tahmininde bulunmuştur. Davranışın doğru yorumlanamabilmesi için farklı özelliklere sahip deprem kayıtları tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Hayta, Ö., 2005, Finite element analysis of tieback wall using plaxis: A case study, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 123p.

Öztürk, T.E., 2005, Influence of a parametric study of seismic response analysis of reinforced soil retaining structures with plaxis, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 37p.

Osmanoğlu, D., 2007, Tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar yöntemi ile plaxis programında analiz edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 137s.

Özsoy, K., 2007, Kemer barajların deprem etkisi altındaki davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 132s.

Wu, C., Ni, C., Ko, H., 2009, Seismic response of an earth dam: finite element coupling analysis and validation from centrifuge tests, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 1.1: 56-70.

Dikmen, M., 2013, Kil zemine oturan temellerin oturma ve taşıma gücü davranışına geotekstil takviyesinin etkisinin deneysel ve plaxis 3D programıyla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 118s.

Yücel, A.R., 2013, Seismic analysis of concrete gravity dams including dam-foundation-reservoir interaction, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 98p.

Soysal, B.F., 2014, Performance of concrete gravity dams under earthquake effects, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99p.

Charatpangoon, B., Kiyono, J., Furukawa, A., Hansapinyo, C., 2014, Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 64, 50-62.

Ibrahim, K. M. H. I., 2015, Seismic displacement of gravity retaining walls, HBRC Journal, 11(2), 224-230.

Fragiadakis, M., Loukidis, D., Papanastasiou, P., 2014, Seısmıc Capacıty Assessment Of Kourıs Earth Dam, Second European Conference On Earthquake Engineering And Seismology, İstanbul, 1-11p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Duygu, M.B., 2014, Ground motion scaling for the prediction of the seismic response of concrete gravity dams, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 140p.

Uysal Akın, G., 2015, Üçkuyular ve Poligon metro istasyonu inşaatında diyafram duvar uygulamasının incelenerek plaxis programında analiz edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 84s.

Taha, A., El Naggar, M. H., Turan, A., 2015, Numerical modeling of the dynamic lateral behavior of geosynthetics-reinforced pile foundation system, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 77, 254-266.

Shivamanth, A., Athani, S. S., Desai, M. K., Dodagoudar, G. R., 2015, Stability analysis of dyke using limit equilibrium and finite element methods, Aquatic Procedia, 4, 884-891.

Çavuşli, M., 2016, Atatürk Barajının üç boyutlu doğrusal olmayan davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, 85s.

Toromanovic, J., Mattsson, H., Knutsson, S., Sipola, J., 2016, Effects on an earth and rockfill dam undergoing dam safety measures, In Nordic Geotechnical Meeting: Challanges in Nordic Geotechnics, 25/05/2016-27/05/2016.

Toma, M.A., 2017, Earthquake Response Analysis of Pile Supported Structures-Correspondence of PLAXIS 2D with Eurocode 8, Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, 140p.

Kabakçı, İ., 2017, Zemin çivili duvarların tasarım ilkeleri ve snap-2, snailz, plaxıs, slıde programları ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 150s.

Puri, N., Jain, A., Mohanty, P., Bhattacharya, S., 2018, Earthquake response analysis of sites in state of Haryana using DEEPSOIL software, Procedia Computer Science, 125, 357-366.

Yıldırım, T.O., 2018, Kireç stabizasyonu ile zemin iyileştirilmesi ve plaxis ile yorumlanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96s.

Yılmaz, N., 2018, Independent comparison between Plaxis 2D and Deepxcav for the deep excavation project in a case study, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Beşli, B.K., 2018, Kaya dolgu ve kil çekirdekli kaya dolgu barajların sismik analizini etkileyen faktörlerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 146s.

Broojerdi, M. S., Behnia, M., Aghchai, M. H., 2018, Dynamic analysis of rock slopes using the distinct element method: A case study at the right abutment of the Upper Gotvand Dam, Iran, Journal of African Earth Sciences, 145, 53-67.

Yardımcı, E., 2019, Toprak dolgu barajların tasarım esasları – Boğazköy barajı örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisans Eğitim Enstitüsü, 184s.

Kılıç, H., 2019, Dolgu barajların stabilite analizleri ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 124s.

Arslan, G., 2019, Köprübaşı barajının oturma davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 109s.

Parıltan, T.Ç., 2019, Yakın ve uzak fay yer hareketine maruz çatlaklı beton ağırlık barajların dinamik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 205s.

Jadid, R., Montoya, B. M., Bennett, V., Gabr, M. A., 2020, Effect of repeated rise and fall of water level on seepage-induced deformation and related stability analysis of Princeville levee, Engineering Geology, 266, 105458.

Lin, H. D., Wang, W. C., Li, A. J., 2020, Investigation of dilatancy angle effects on slope stability using the 3D finite element method strength reduction technique, Computers and Geotechnics, 118, 103295.

Salem, A. N., Ezzeldine, O. Y., Amer, M. I., 2020, Seismic loading on cantilever retaining walls: Full-scale dynamic analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 130, 105962.

Darendeli, M. B., 2001, Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, The University of Texas, 394p.

DSİ Eskişehir-Seyitgazi Gökbahçe Göleti İhalesi 2018 s4.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Majedi, P., Ghalehjough, B. K., Akbulut, S., Çelik, S., 2017, Effect of Reinforcement on Stability and Settlement of Embankment: A Finite Element analysis of Different Kinds of Reinforcing and Construction Conditions. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, *4*(10), 759-764.

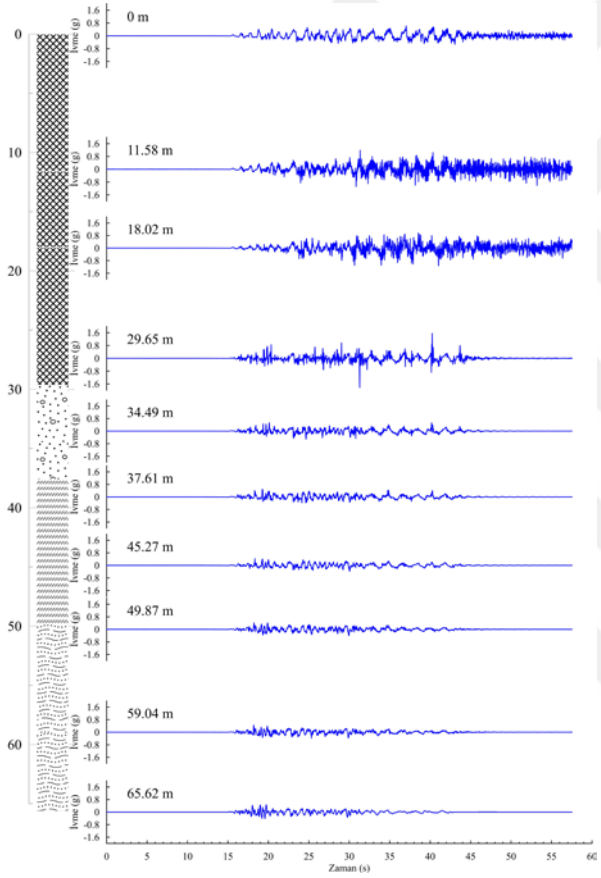
Vahdati, P., 2014, Identification of soil parameters in an embankment dam by mathematical optimization, Doctoral dissertation, Luleå University of Technology, 136p.

İNTERNET KAYNAKLARI

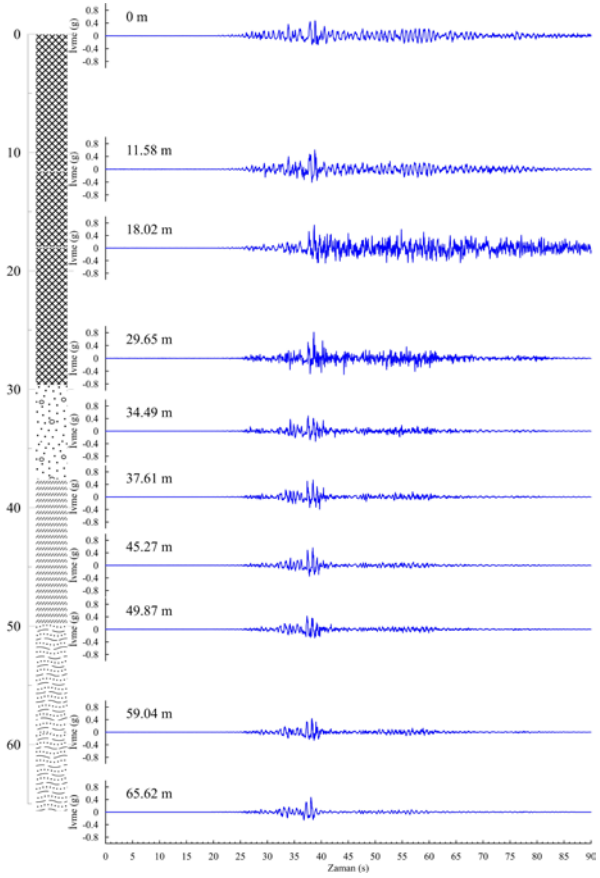
1. http://www.dsi.gov.tr (Erişim tarihi: 24.02.2020)
2. https://deprem.afad.gov.tr/ (Erişim tarihi: 29.09.2019)
3. http://deepsoil.cee.illinois.edu/Files/DEEPSOIL_User_Manual_v6.pdf (Erişim tarihi: 10.01.2020)
4. https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/ (Erişim tarihi: 29.09.2019)

EK AÇIKLAMALAR

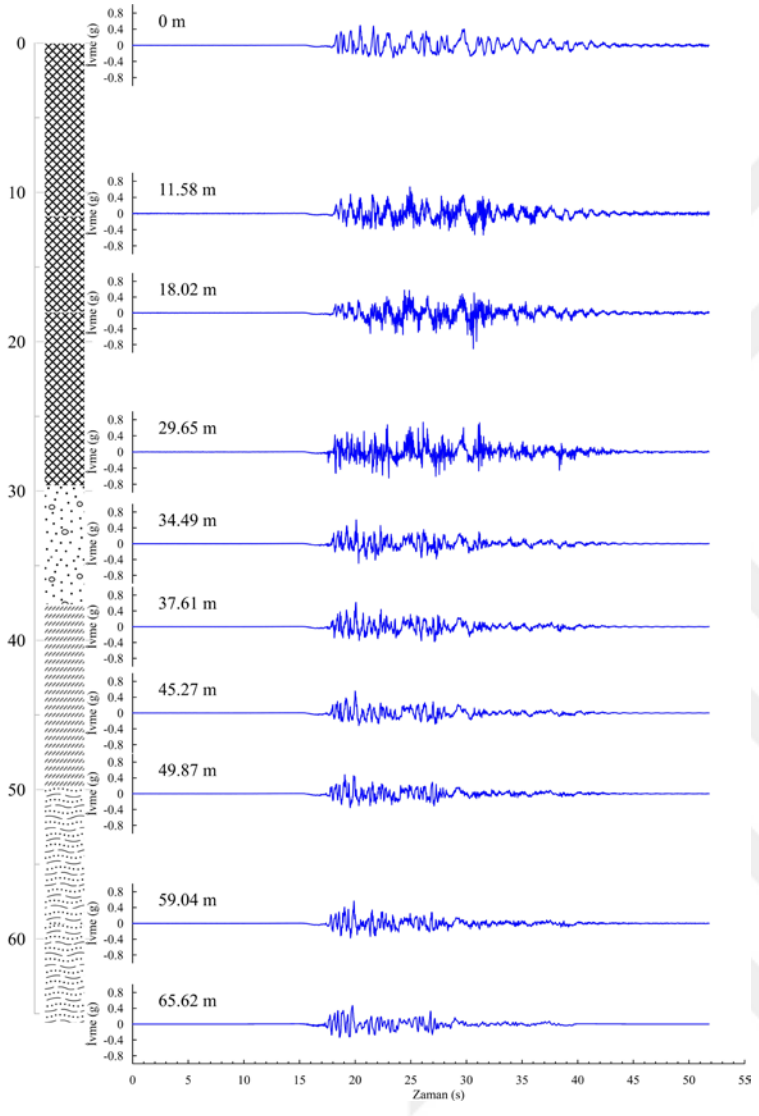
Ek Açıklamalar-A: PLAXIS 2D İvme Verileri



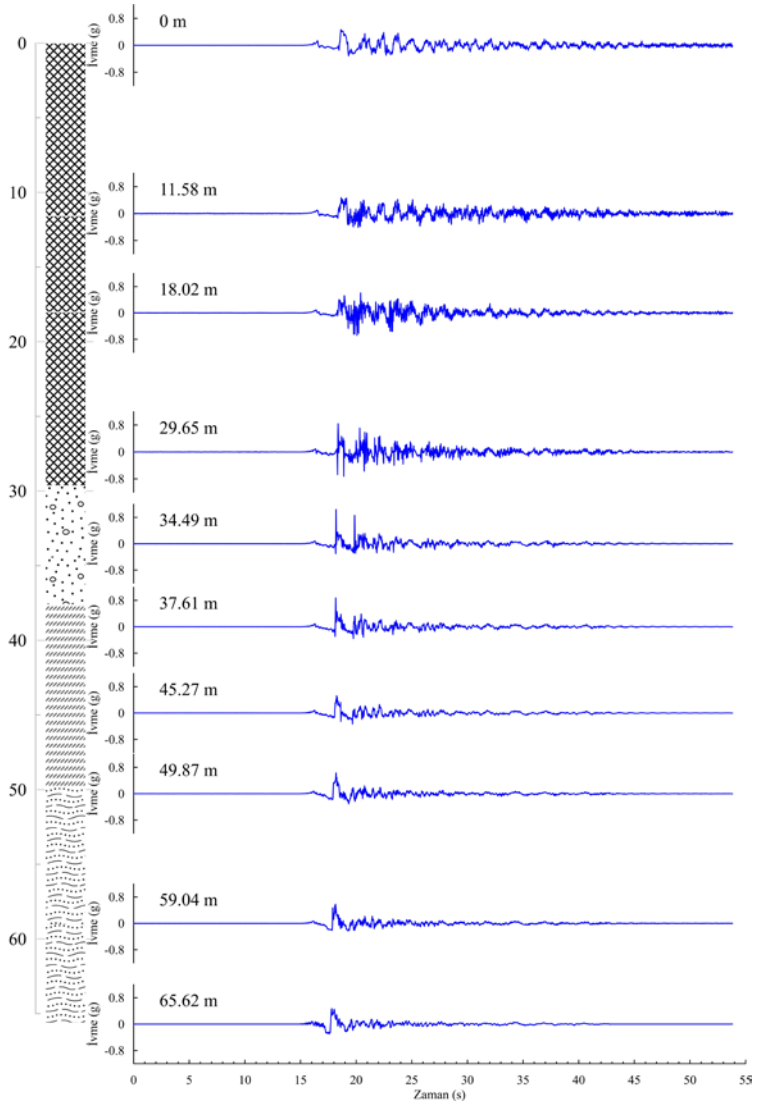
Şekil A.1. Afyon depreminin ivme verileri



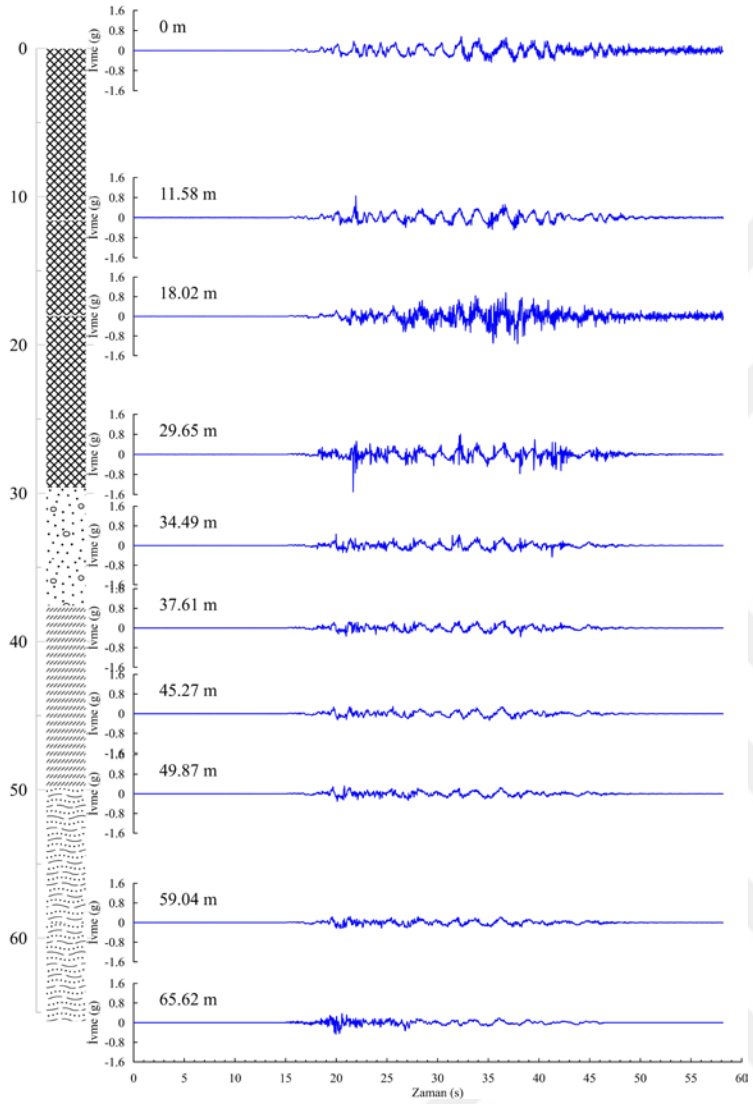
Şekil A.2. Chichi depreminin ivme verileri



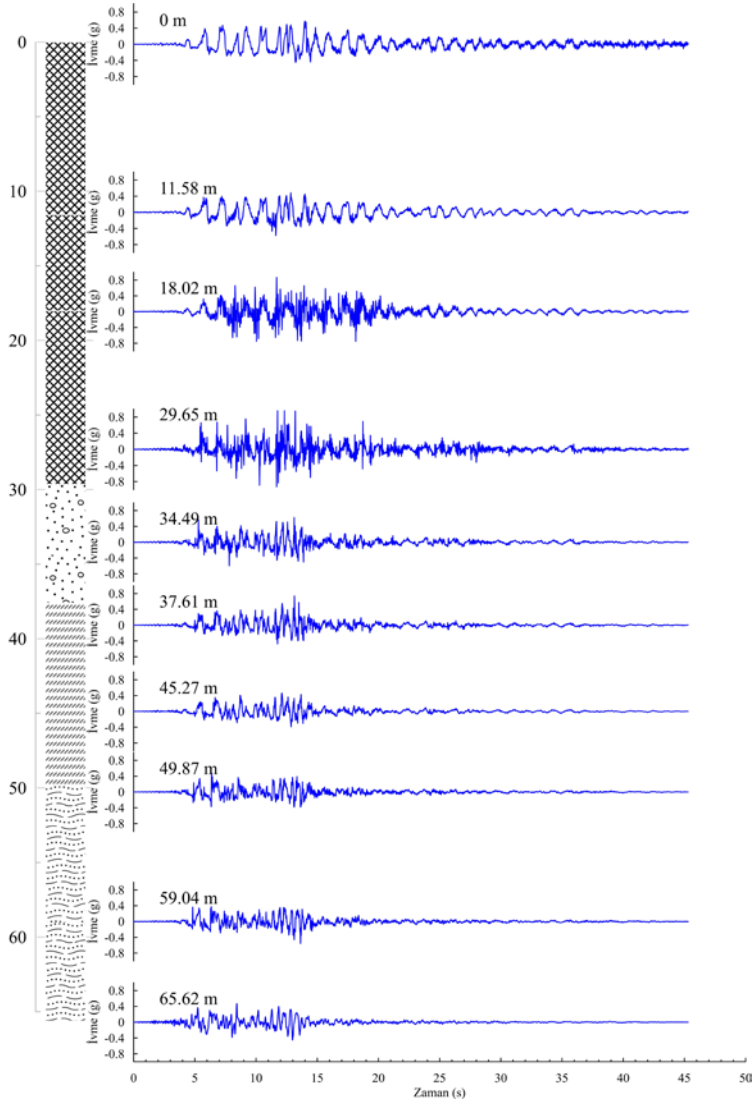
Şekil A.3. Düzce depreminin ivme verileri



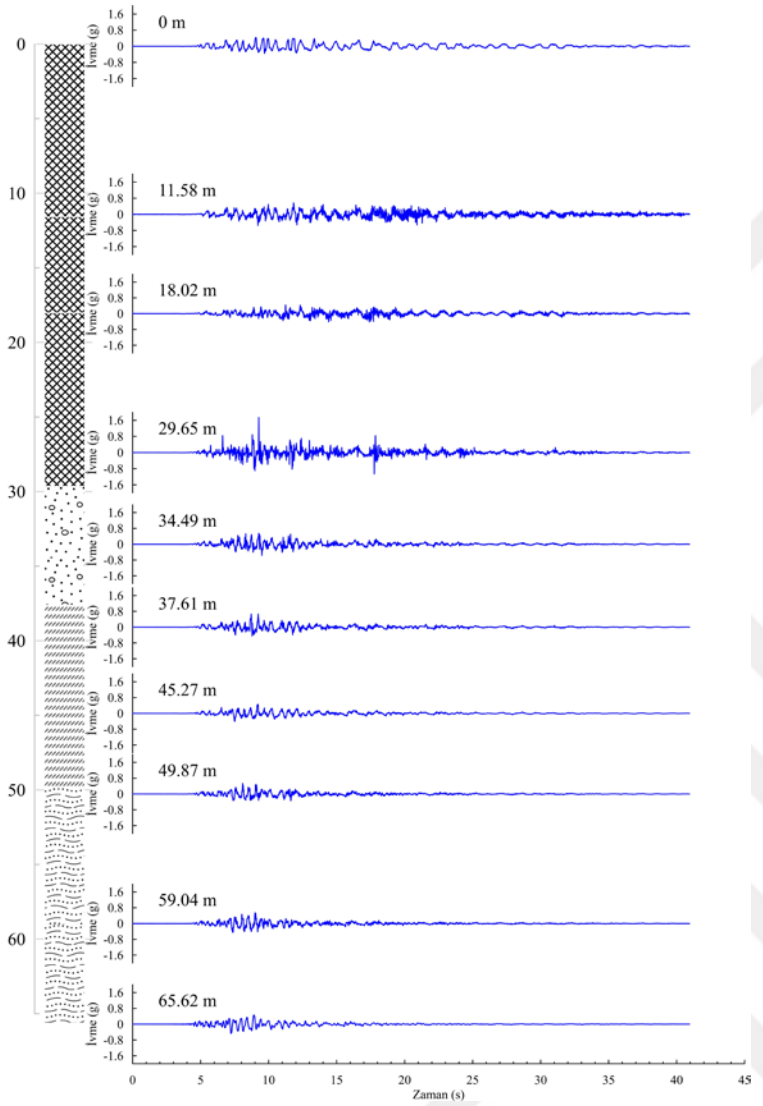
Şekil A.4. Erzincan depreminin ivme verileri



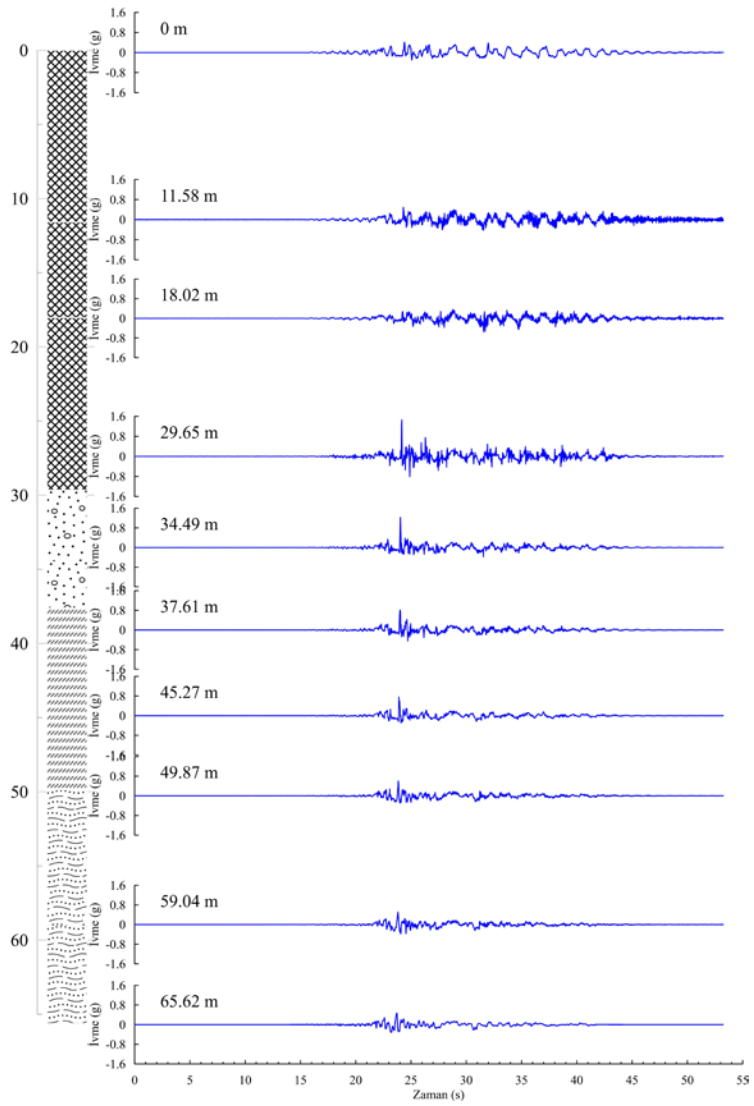
Şekil A.5. Erzurum depreminin ivme verileri



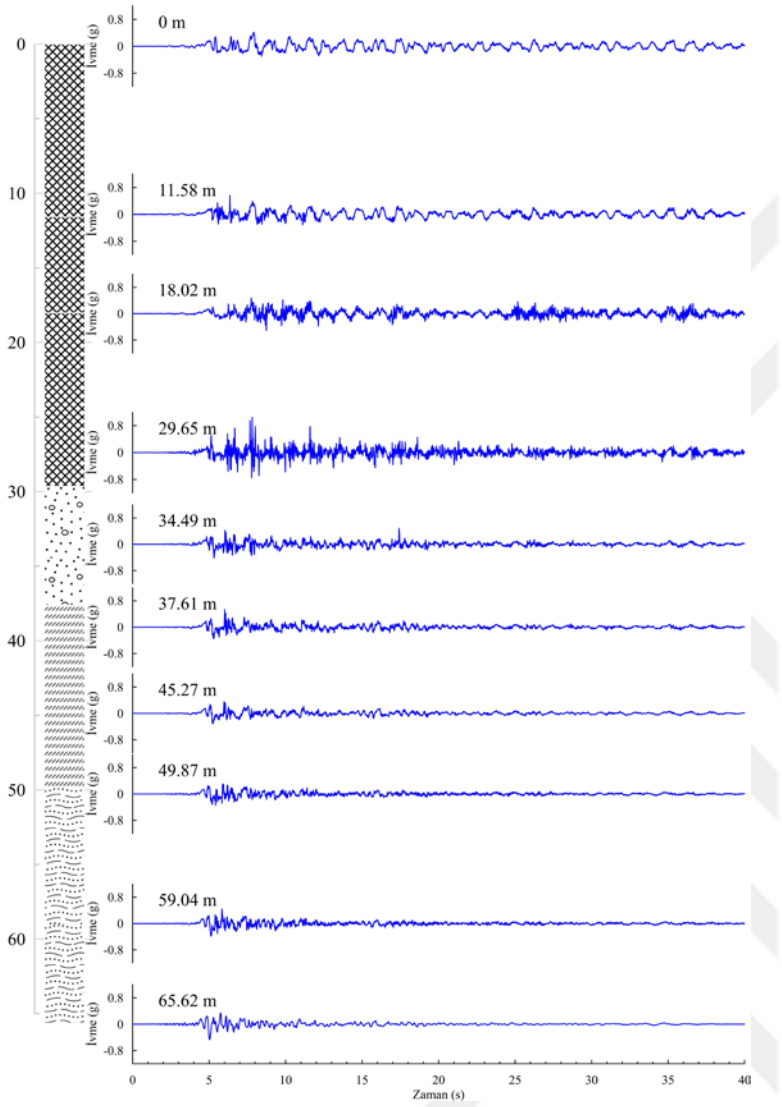
Şekil A.6. Hector mine depreminin ivme verileri



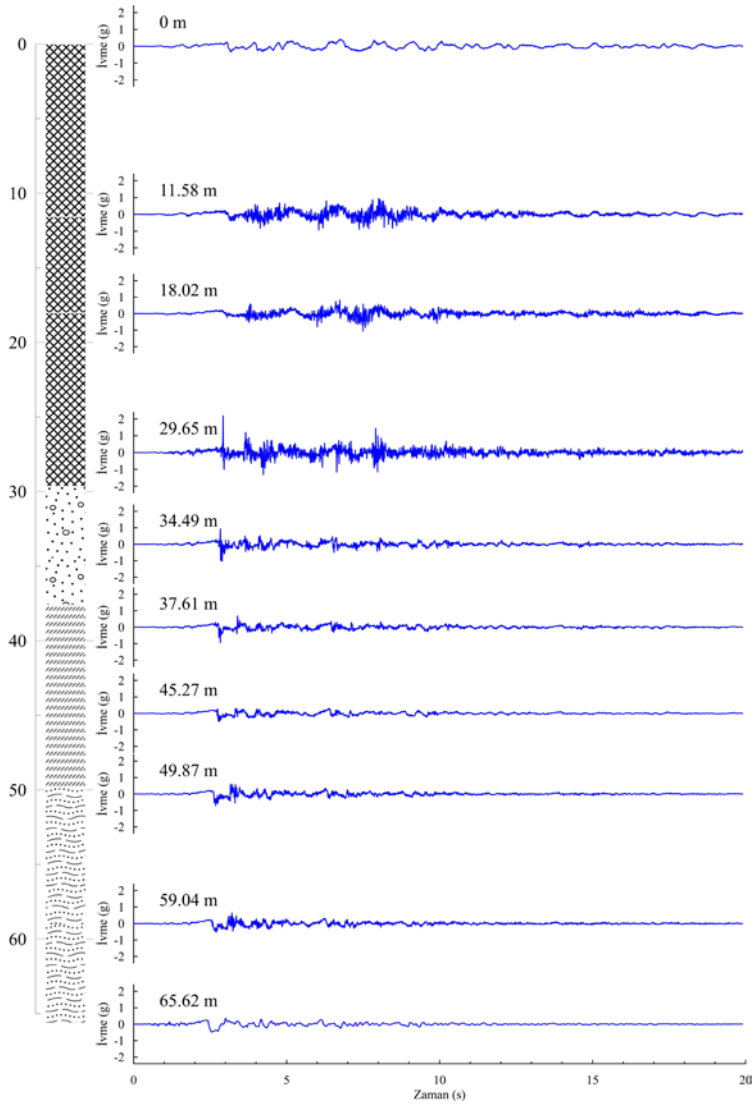
Şekil A.7. Kobe depreminin ivme verileri



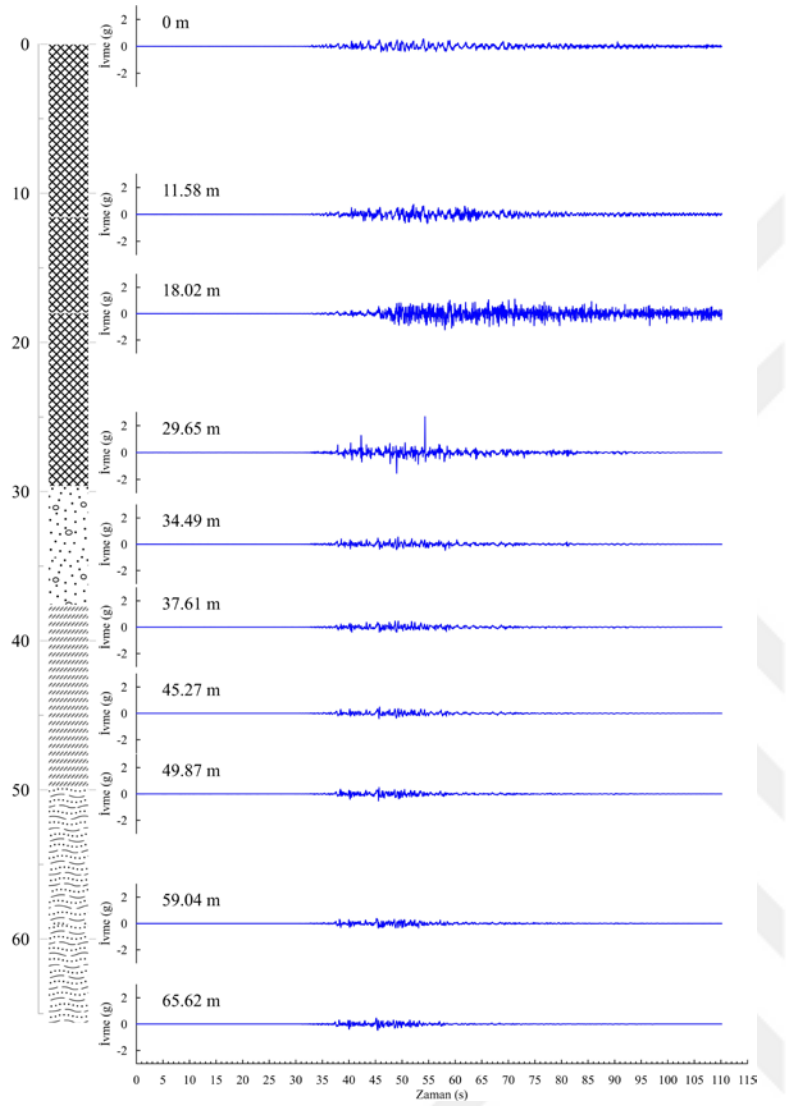
Şekil A.8. Kocaeli depreminin ivme verileri



Şekil A.9. Lomaprieta depreminin ivme verileri

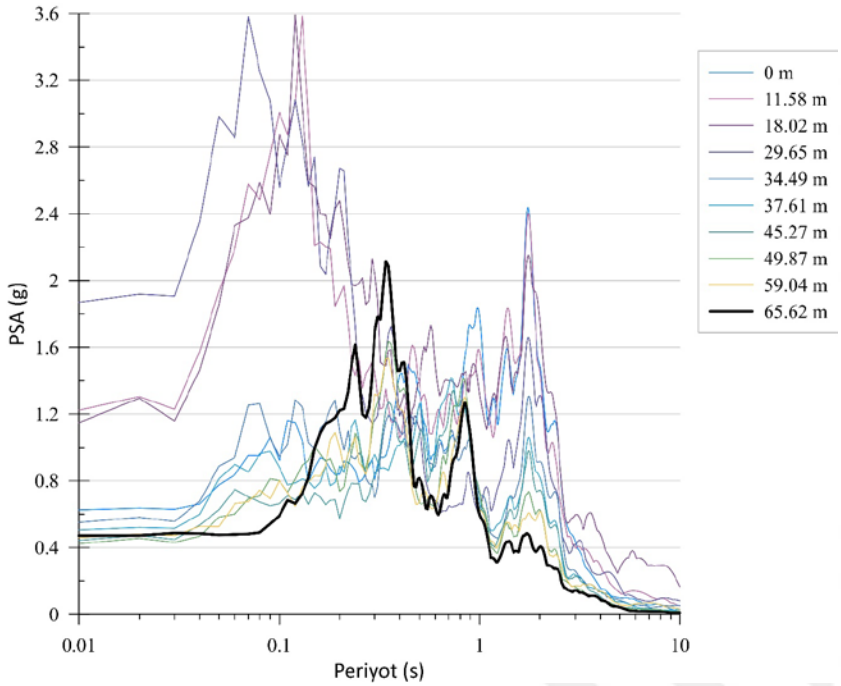


Şekil A.10. Northbridge depreminin ivme verileri

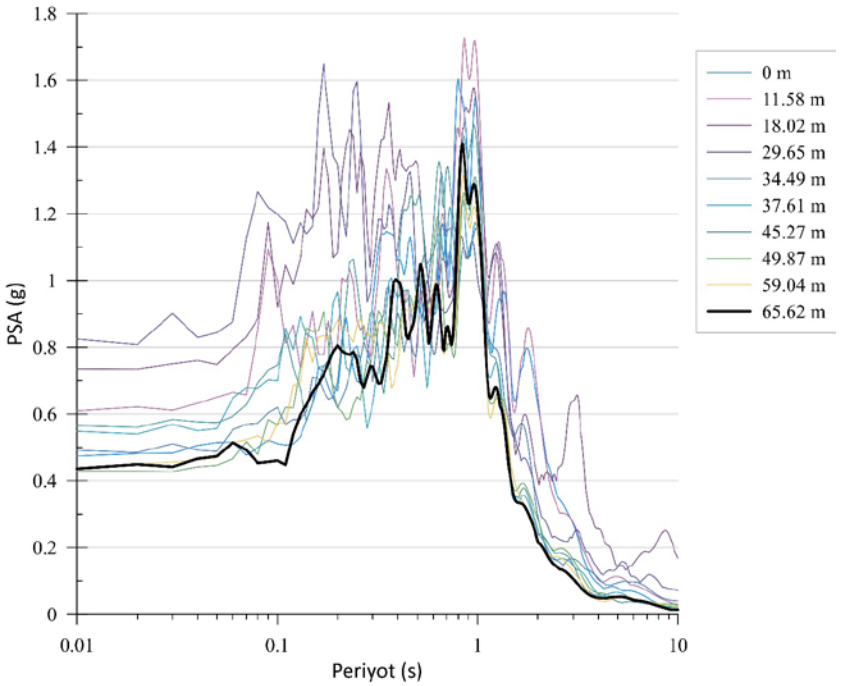


Şekil A.11. Van depreminin ivme verileri

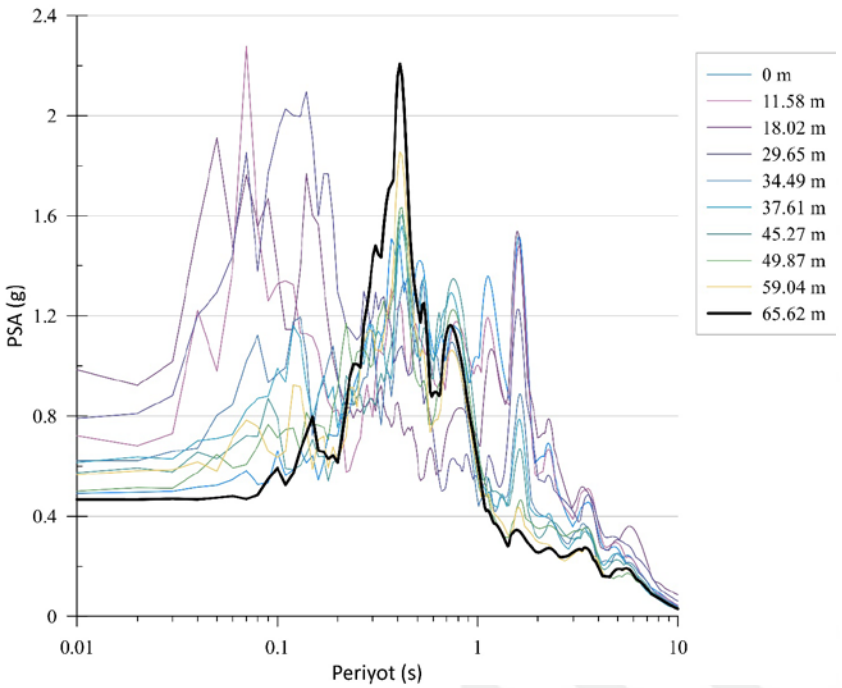
Ek Açıklamalar-B: PLAXIS 2D PSA Verileri



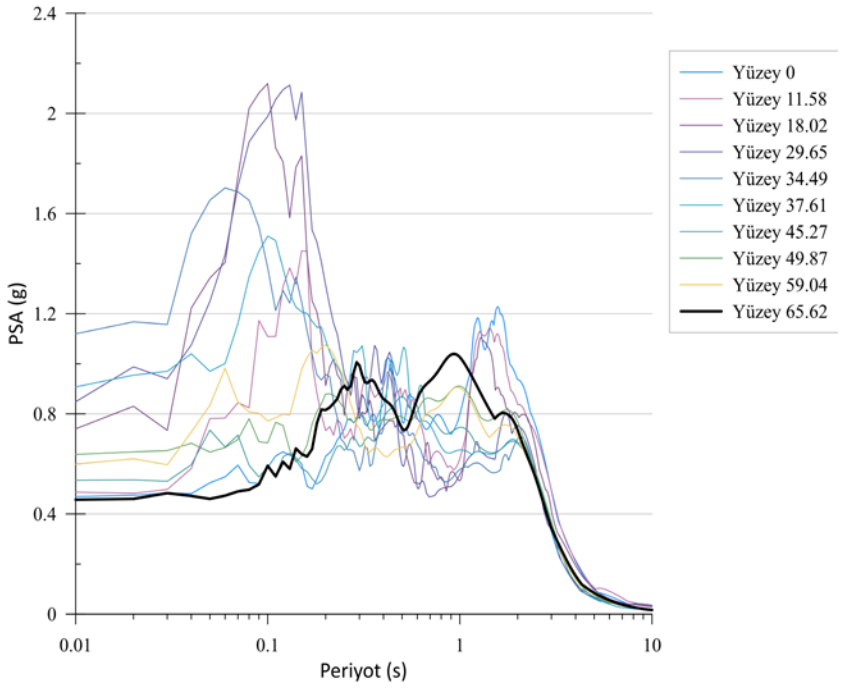
Şekil B.1. Ayfon depreminin en büyük spektral ivme verileri



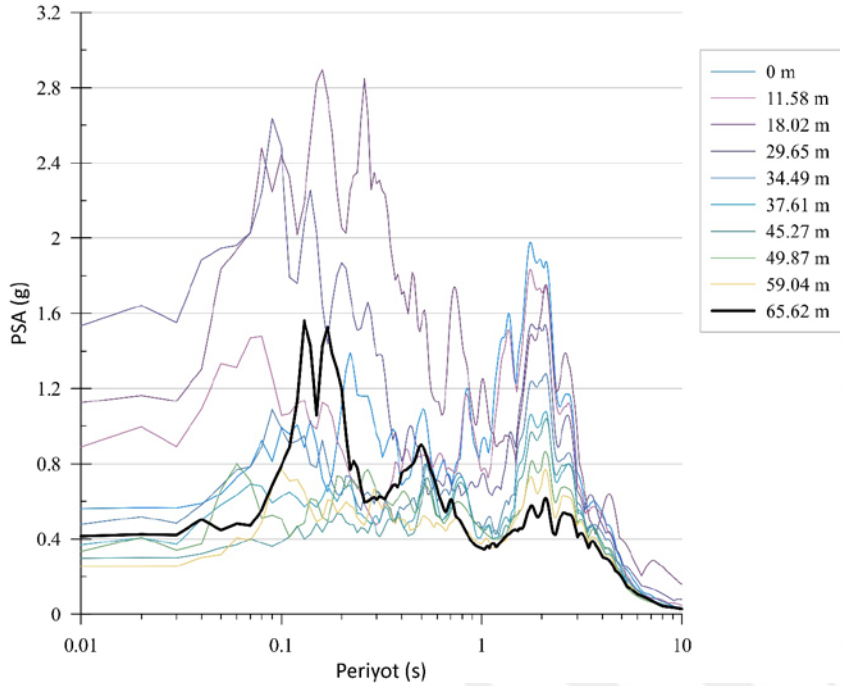
Şekil B.2. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri



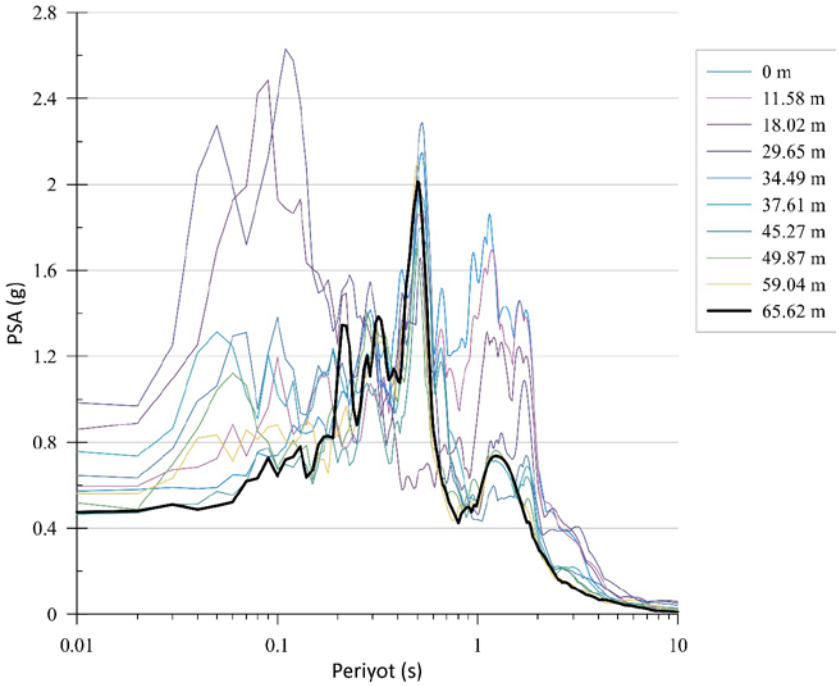
Şekil B.3. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri



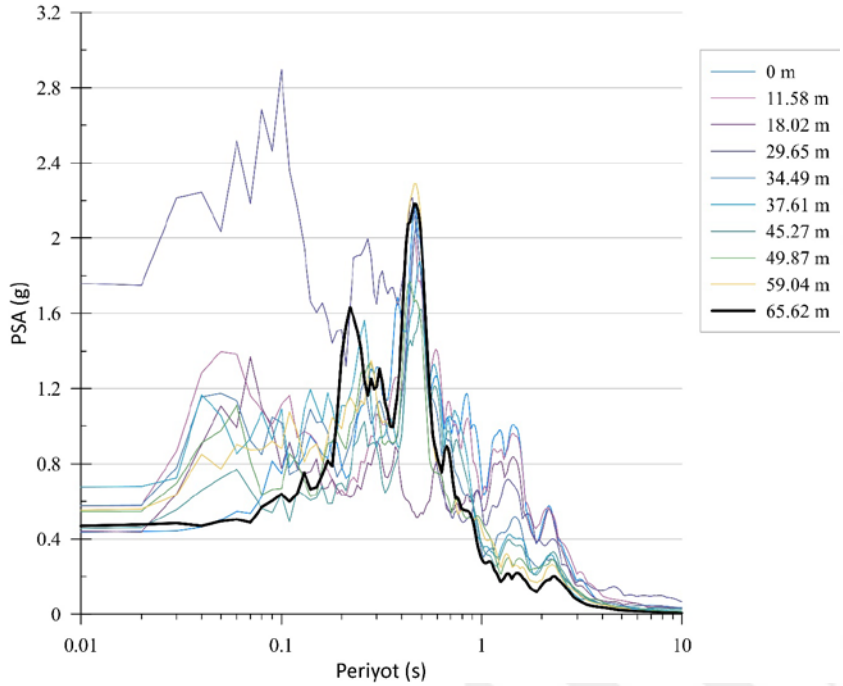
Şekil B.4. Erzincan depreminin en büyük spektral ivme verileri



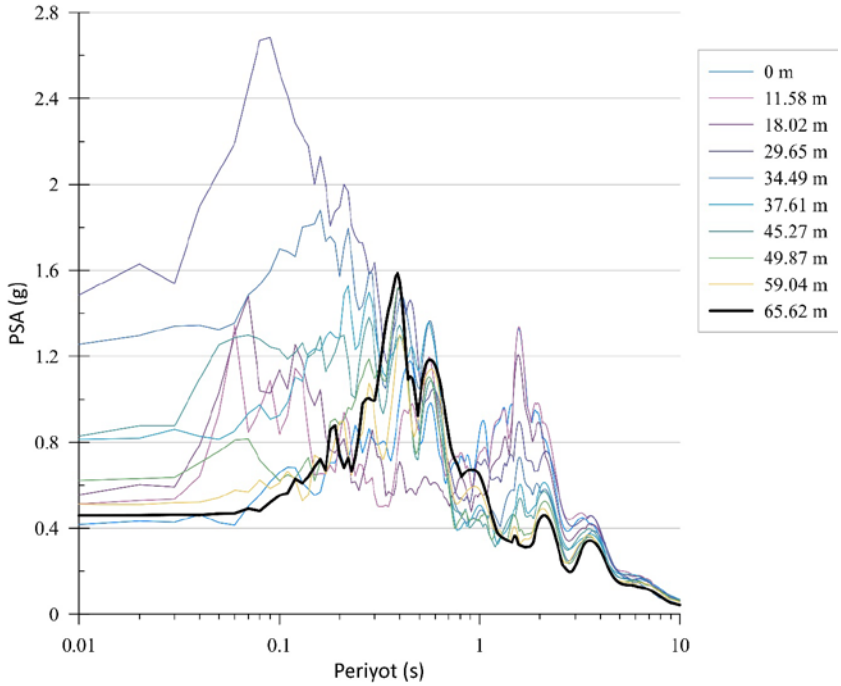
Şekil B.5. Erzurum depreminin en büyük spektral ivme verileri



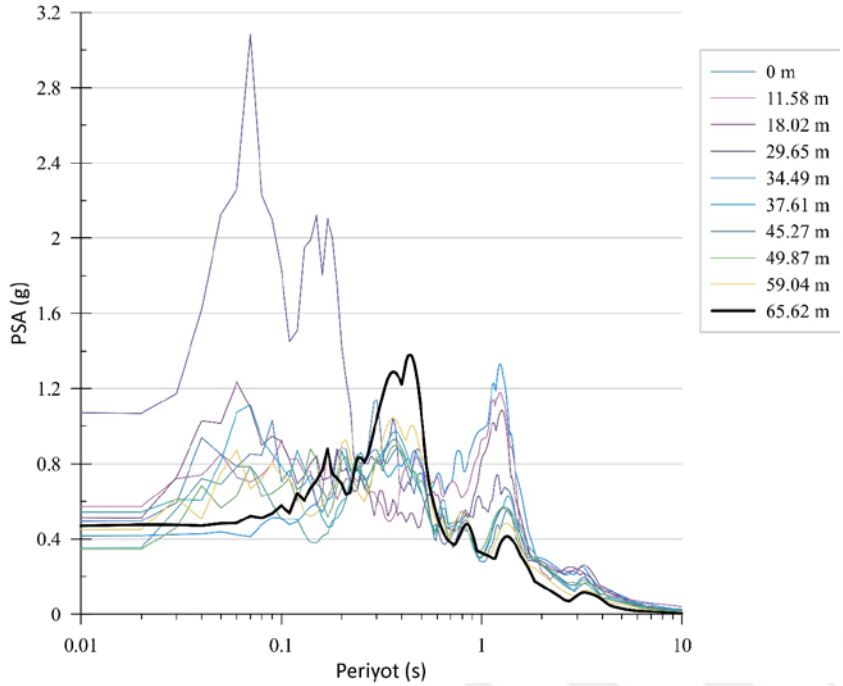
Şekil B.6. Hector mine depreminin en büyük spektral ivme verileri



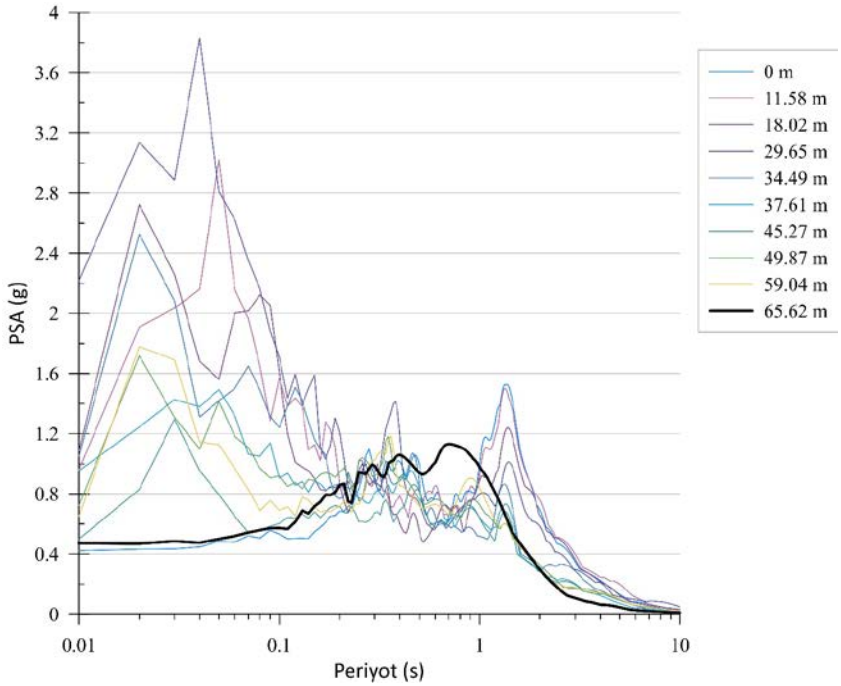
Şekil B.7. Kobe depreminin en büyük spektral ivme verileri



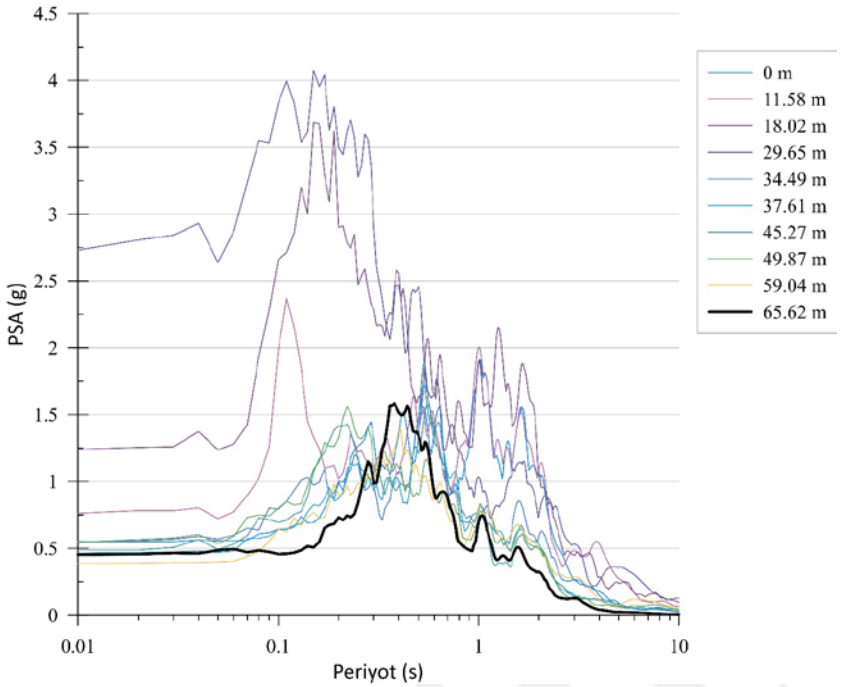
Şekil B.8. Kocaeli depreminin en büyük spektral ivme verileri



Şekil B.9. Lomaprieta depreminin en büyük spektral ivme verileri

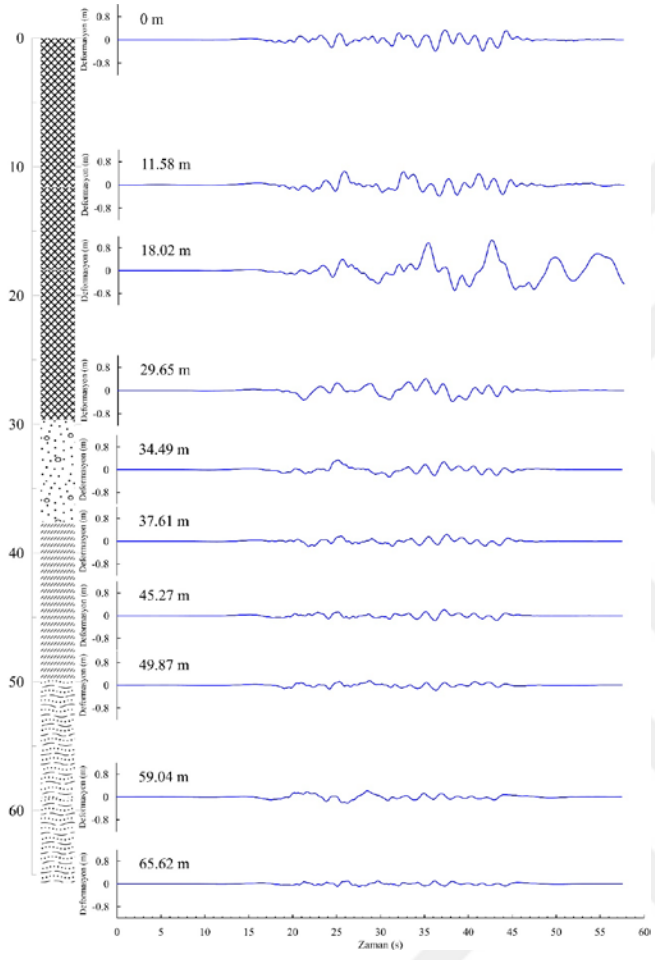


Şekil B.10. Northbridge depreminin en büyük spektral ivme verileri

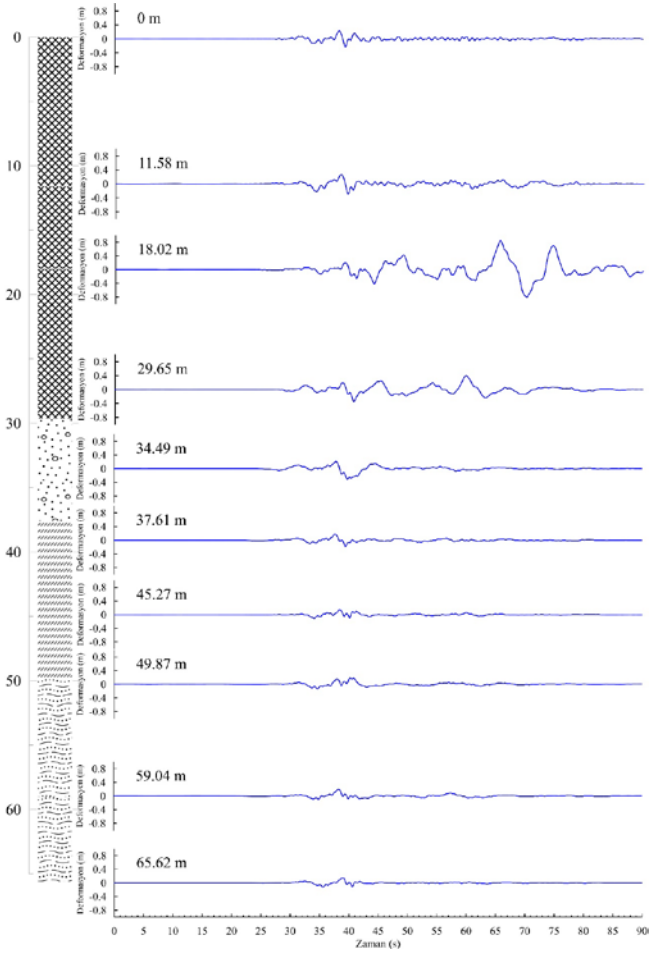


Şekil B.11. Van depreminin en büyük spektral ivme verileri

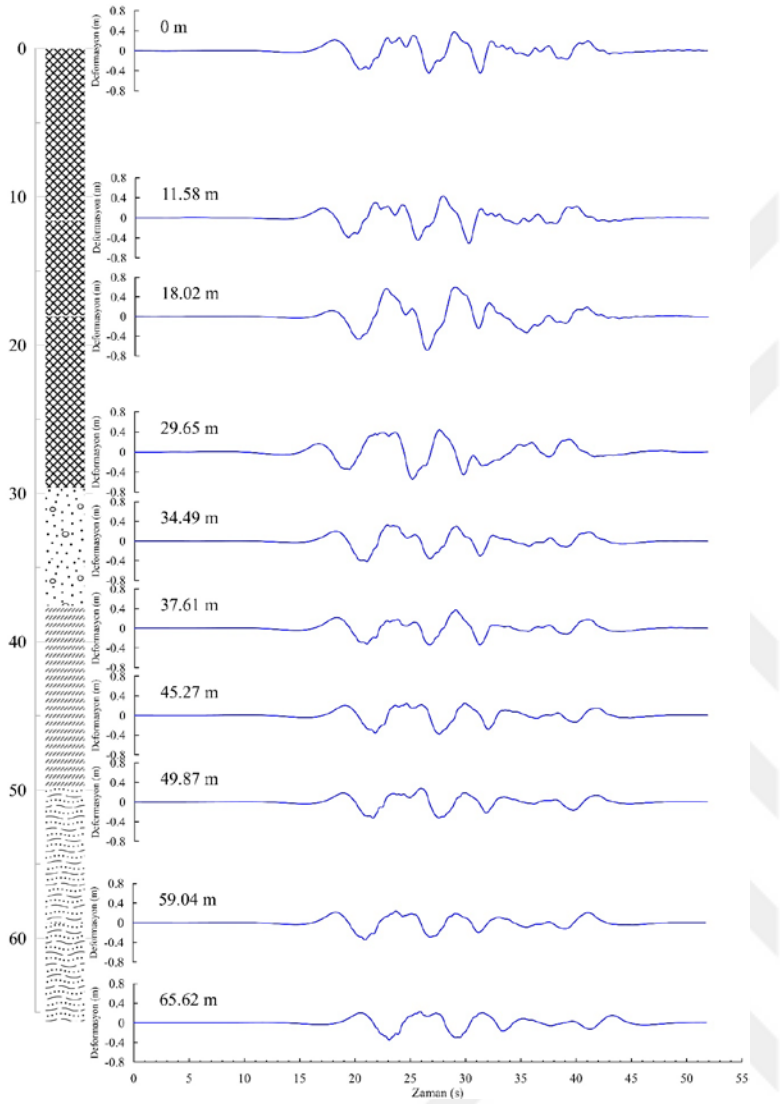
Ek Açıklamalar-C: PLAXIS 2D Deformasyon Verileri



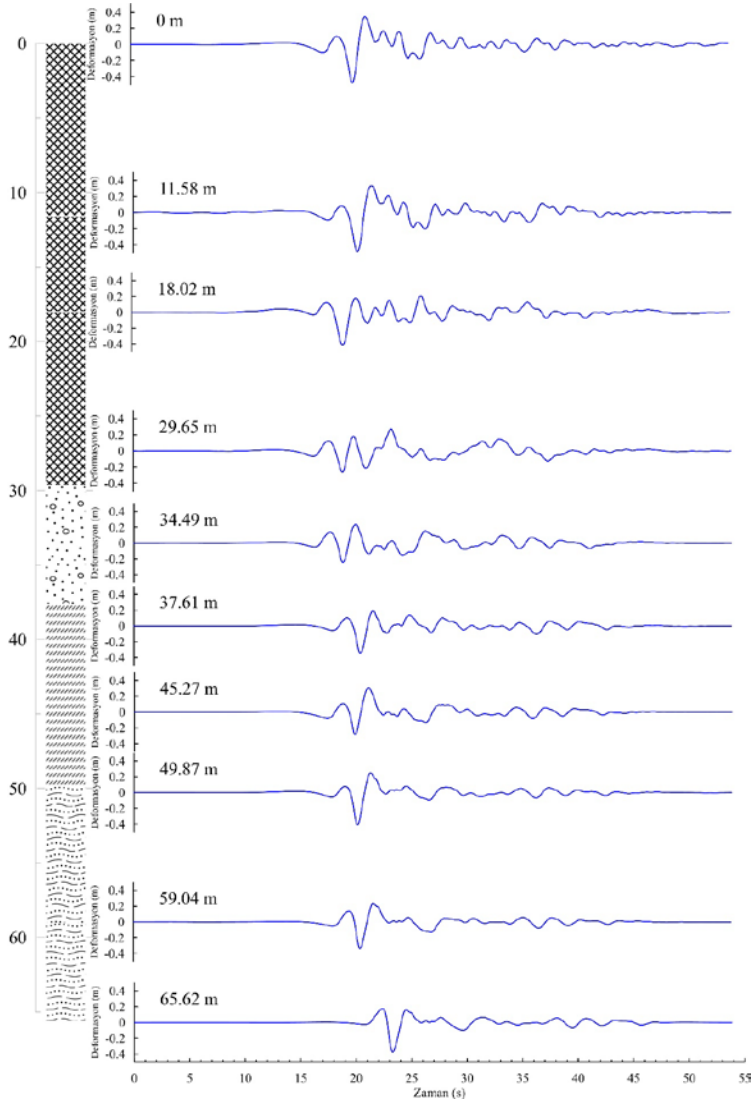
Şekil C.1. Afyon depreminin deformasyon verileri



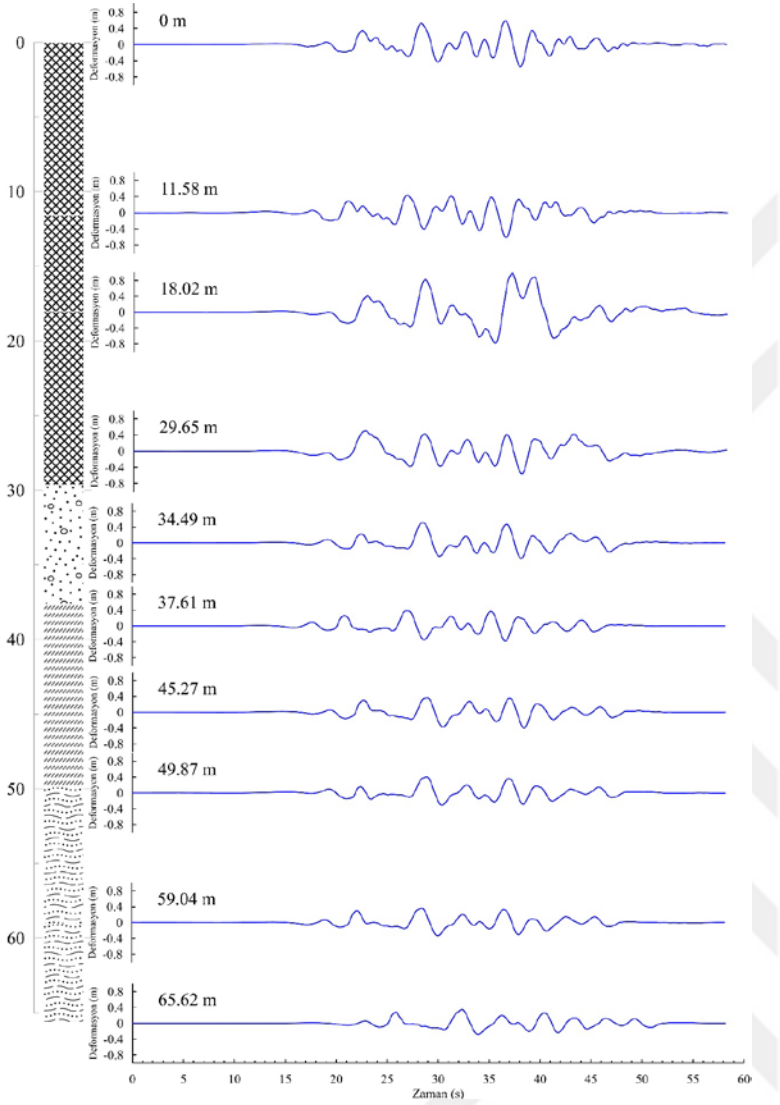
Şekil C.2. Chichi depreminin deformasyon verileri



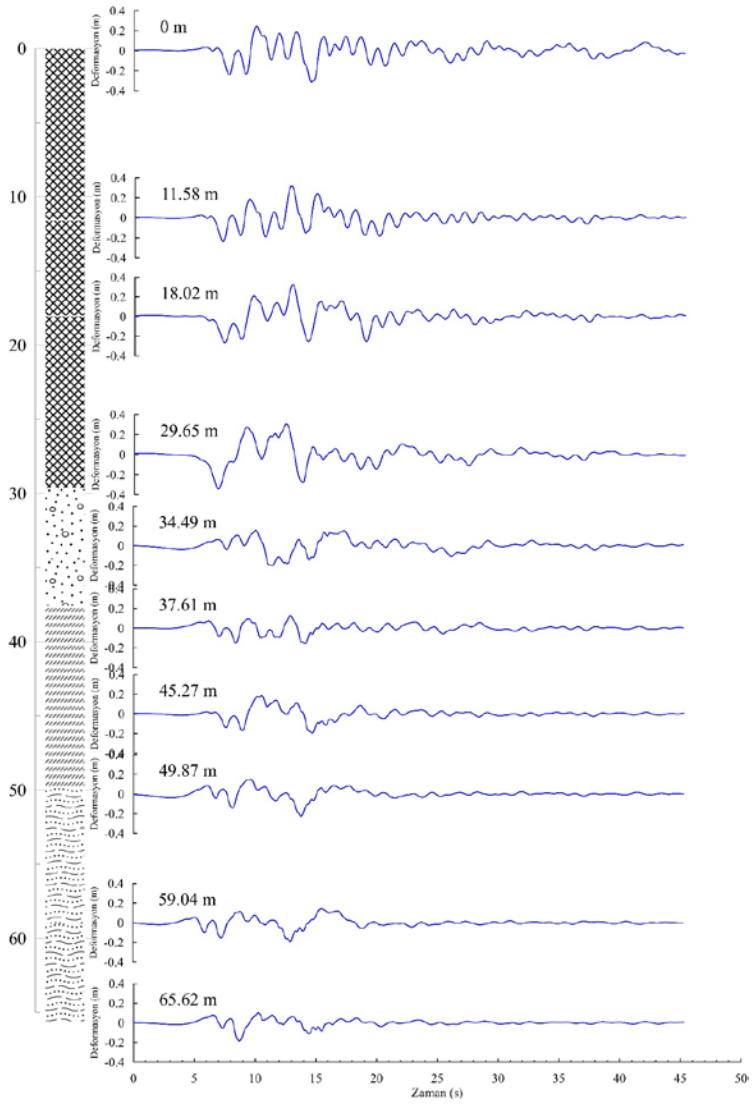
Şekil C.3. Düzce depreminin deformasyon verileri



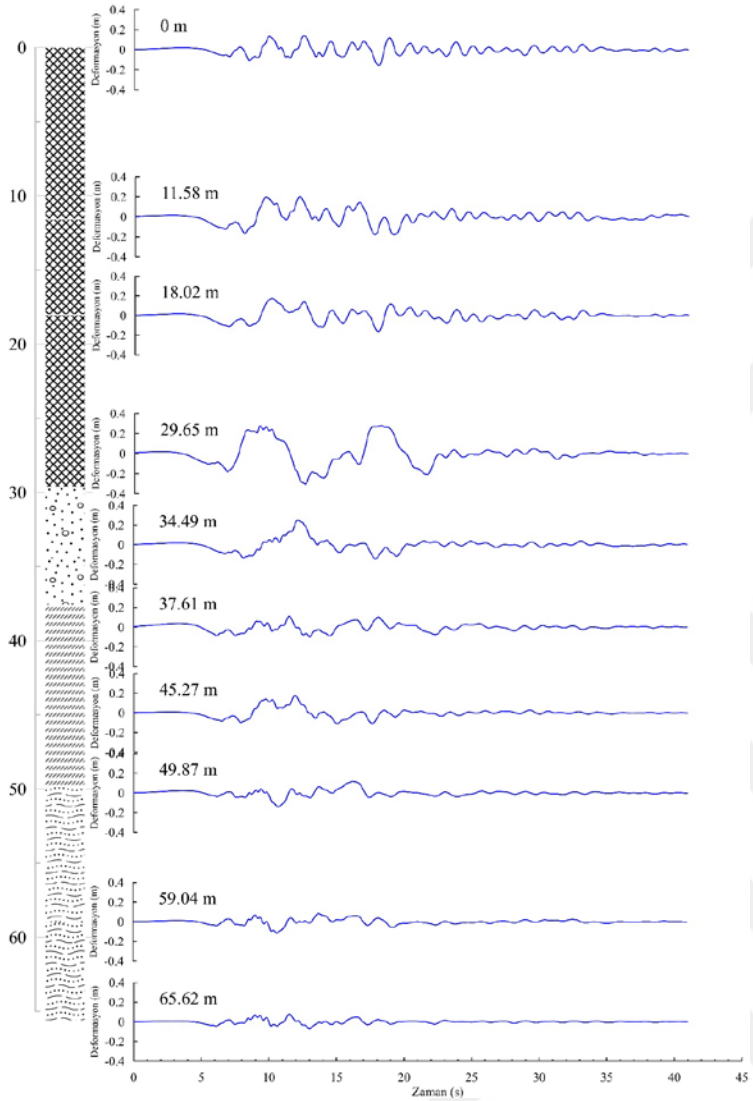
Şekil C.4. Erzincan depreminin deformasyon verileri



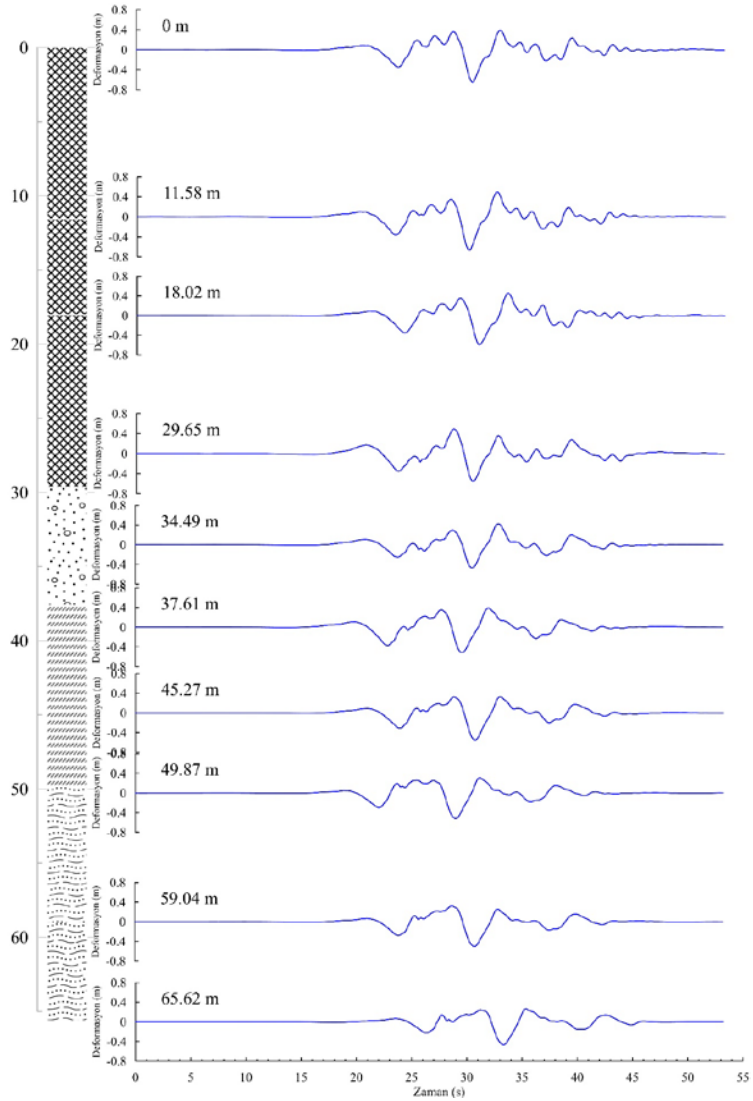
Şekil C.5. Erzurum depreminin deformasyon verileri



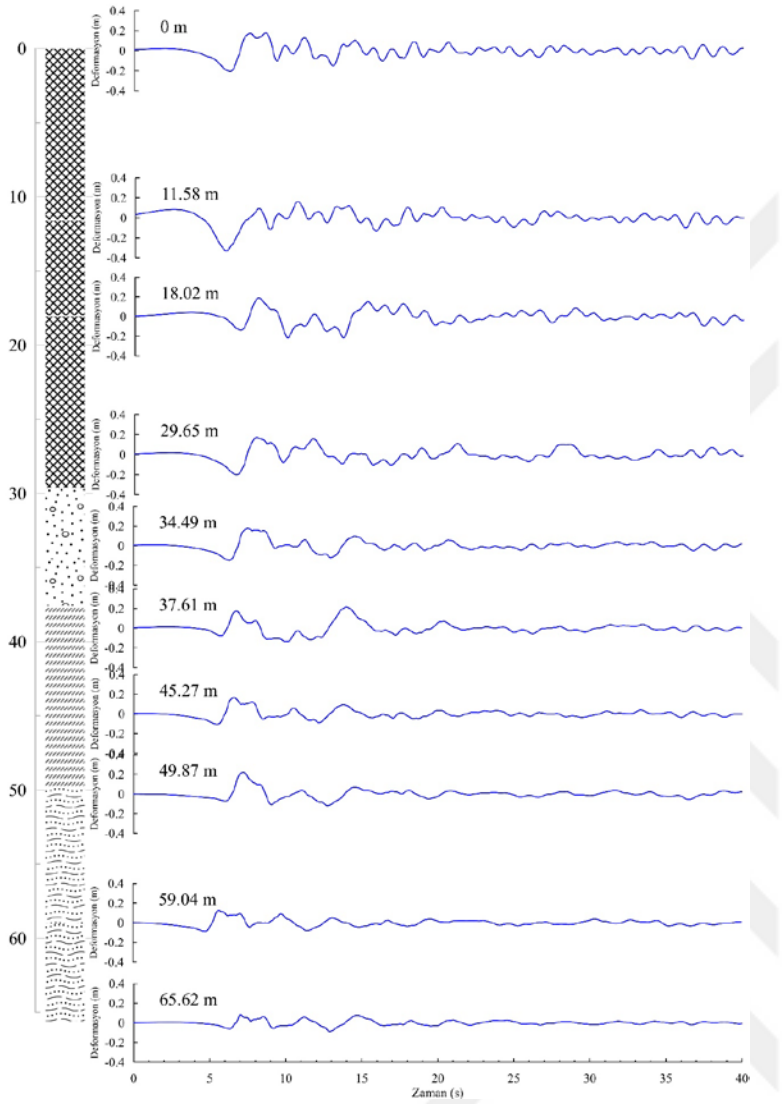
Şekil C.6. Hector mine depreminin deformasyon verileri



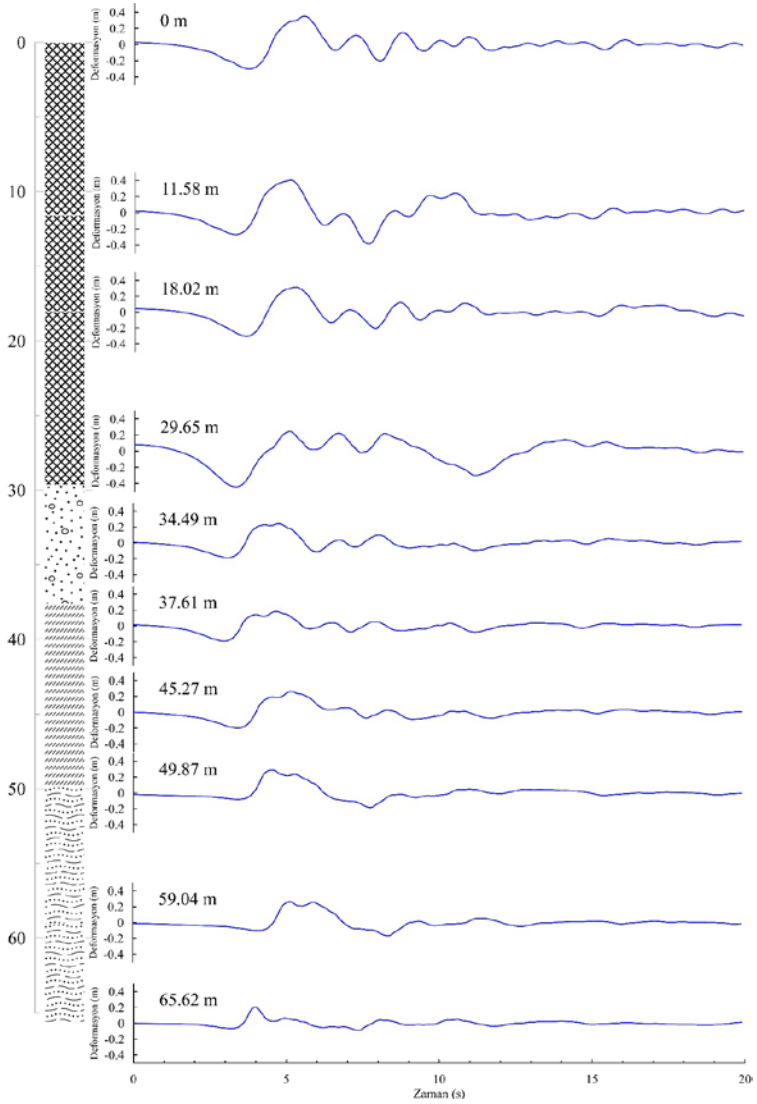
Şekil C.7. Kobe depreminin deformasyon verileri



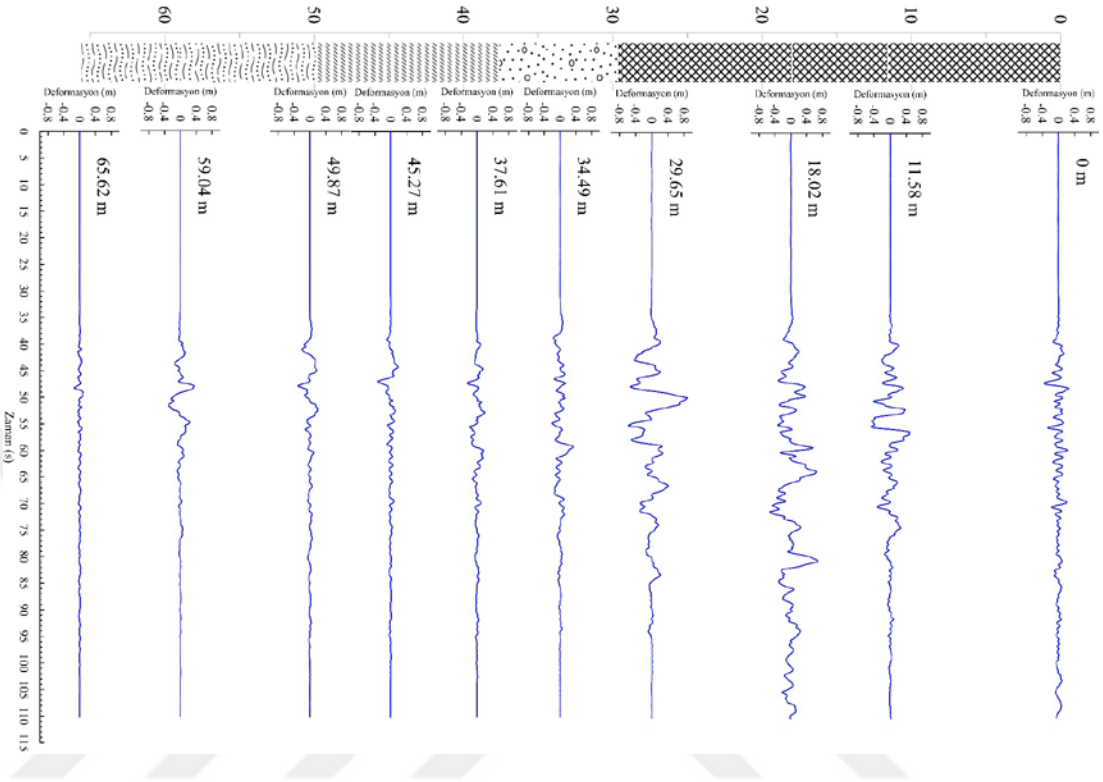
Şekil C.8. Kocaeli depreminin deformasyon verileri



Şekil C.9. Lomaprieta depreminin deformasyon verileri

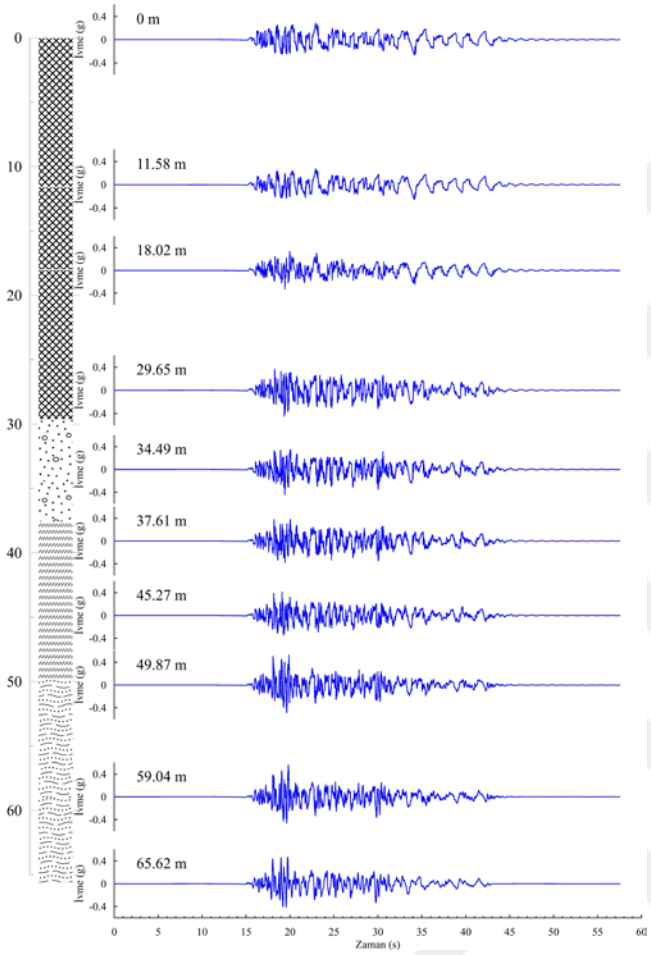


Şekil C.10. Northbridge depreminin deformasyon verileri

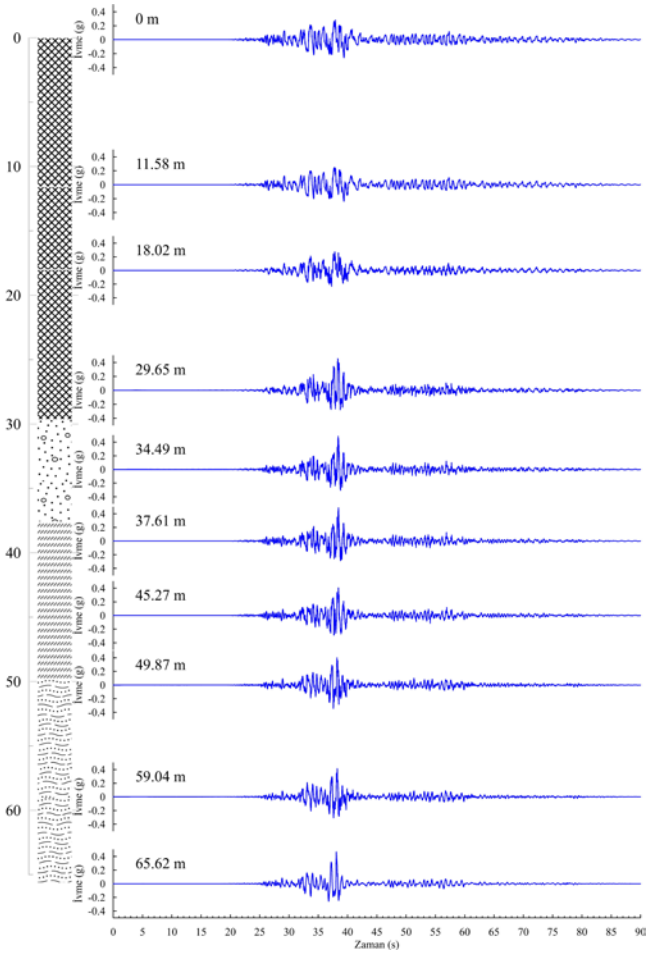


Şekil C.11. Van depreminin deformasyon verileri

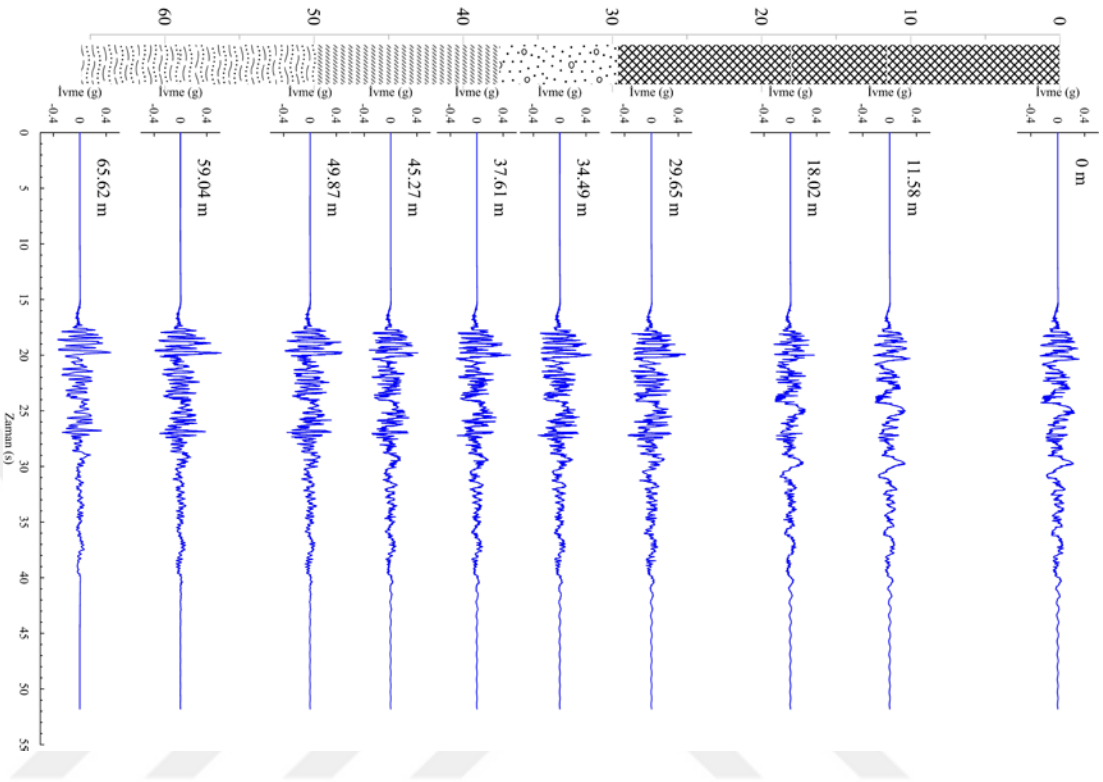
Ek Açıklamalar-D: DEEPSOIL İvme Verileri



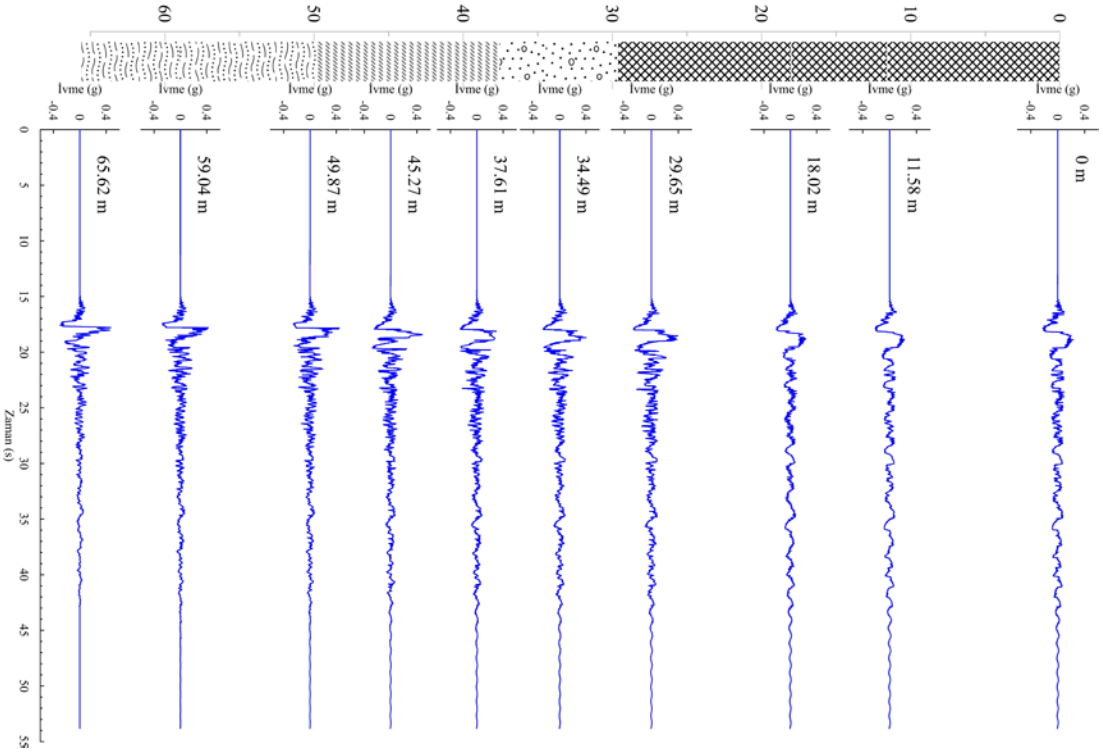
Şekil D.1. Afyon depreminin ivme verileri



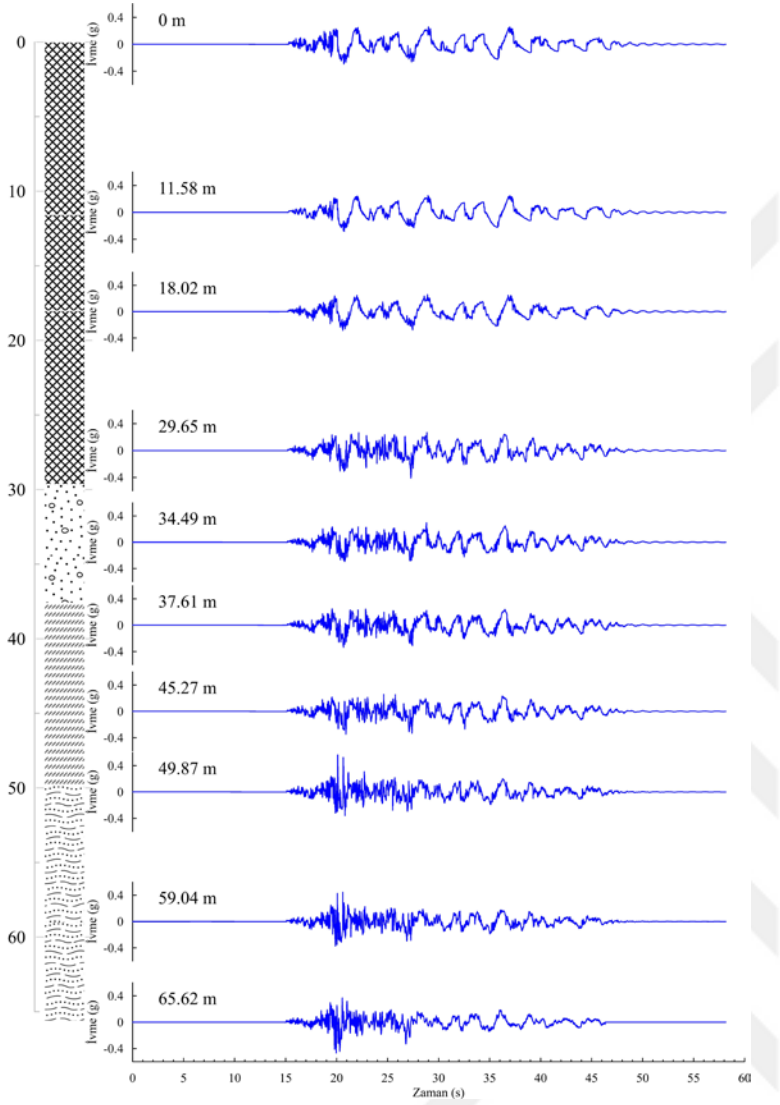
Şekil D.2. Chichi depreminin ivme verileri



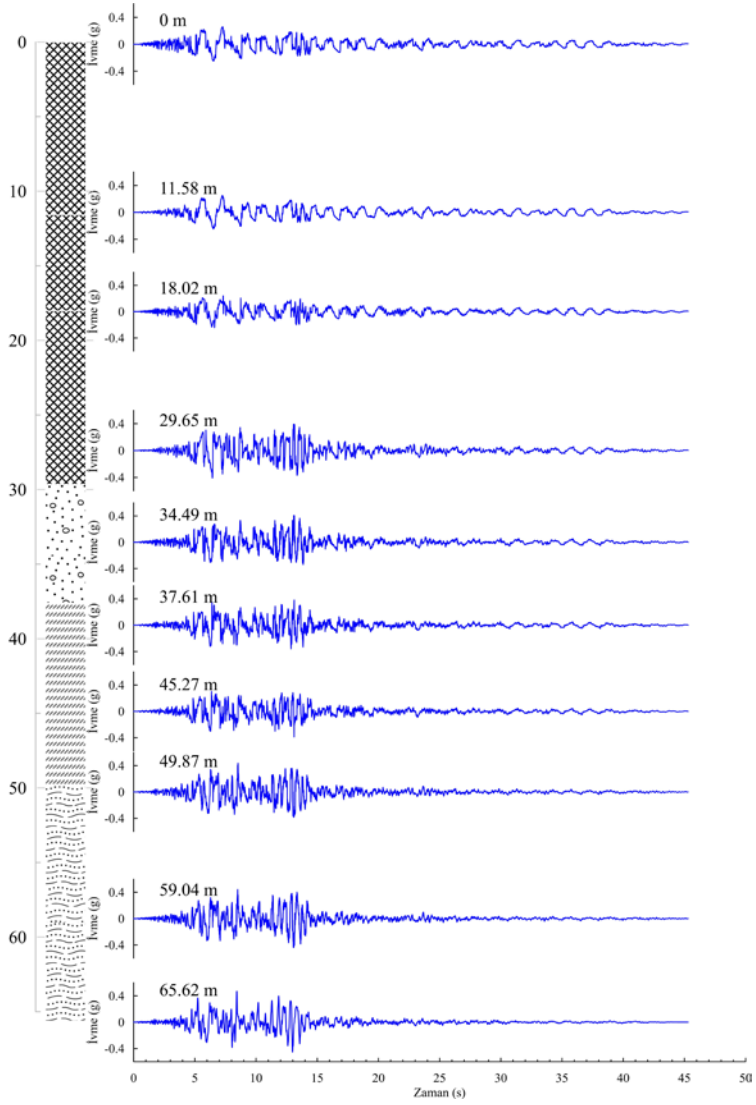
Şekil D.3. Düzce depreminin ivme verileri



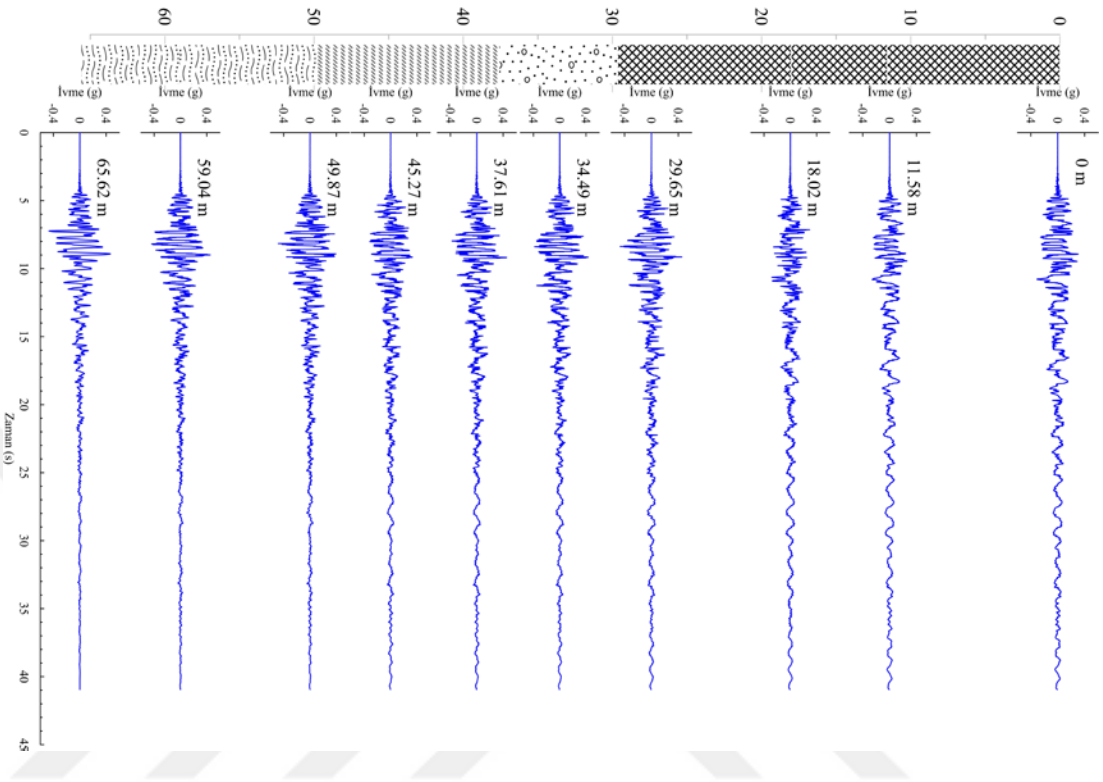
Şekil D.4. Erzincan depreminin ivme verileri



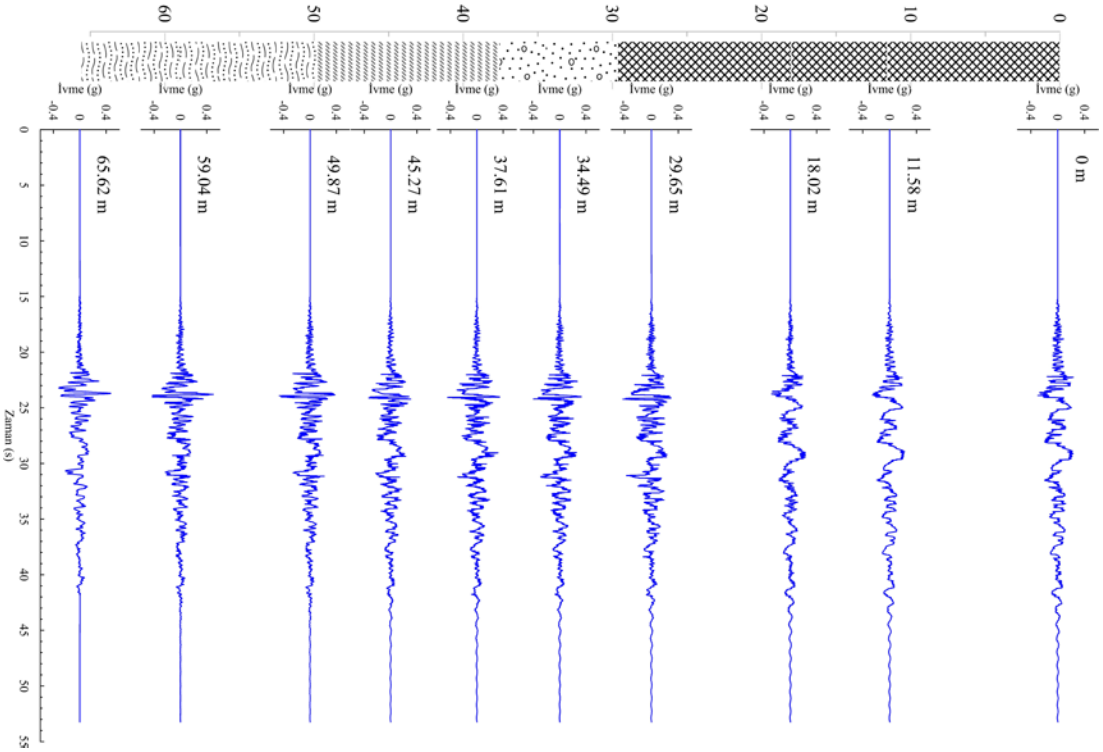
Şekil D.5. Erzurum depreminin ivme verileri



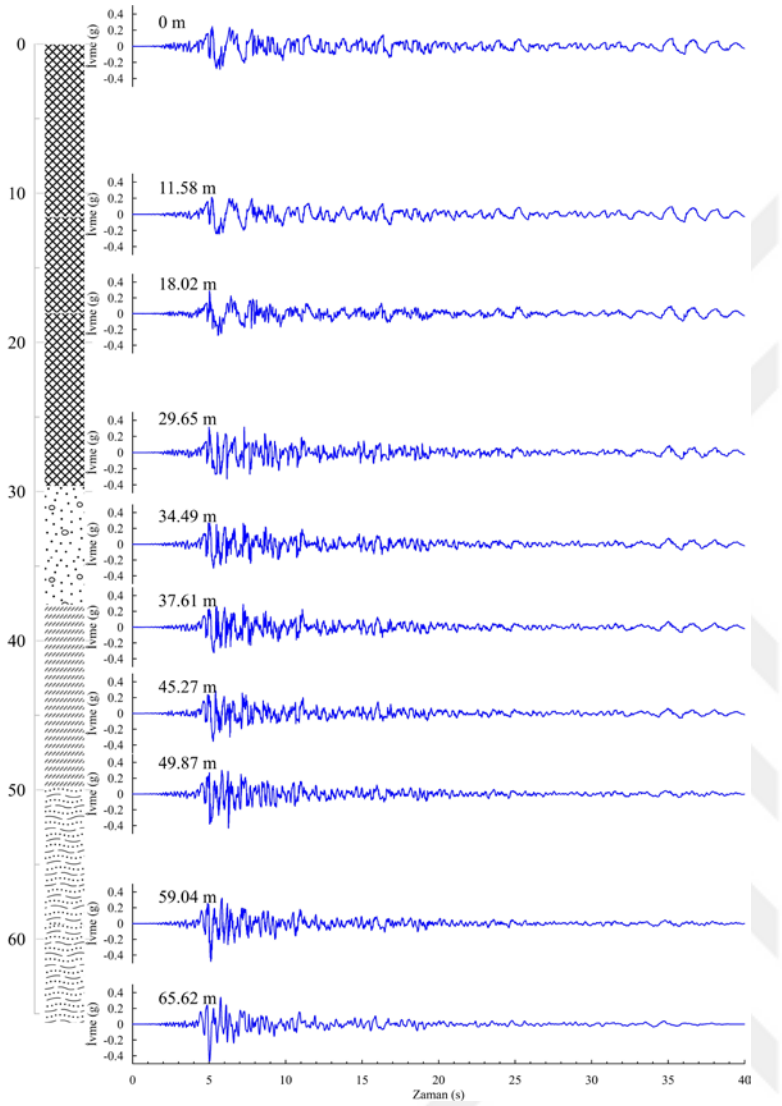
Şekil D.6. Hector mine depreminin ivme verileri



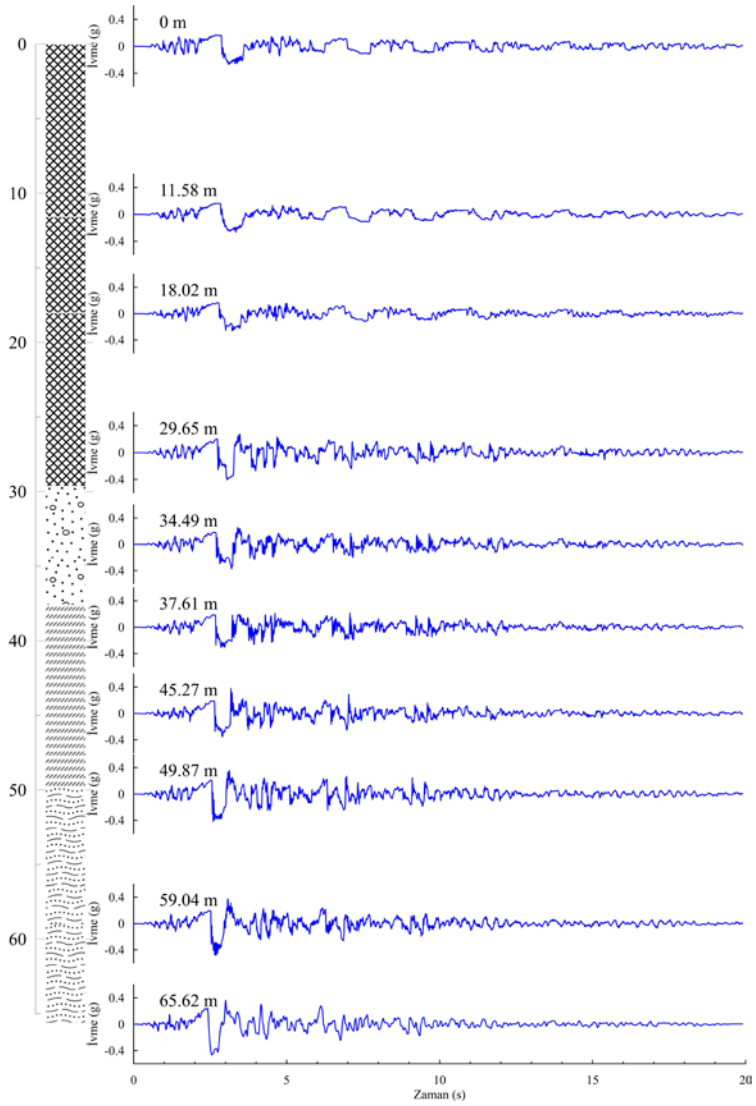
Şekil D.7. Kobe depreminin ivme verileri



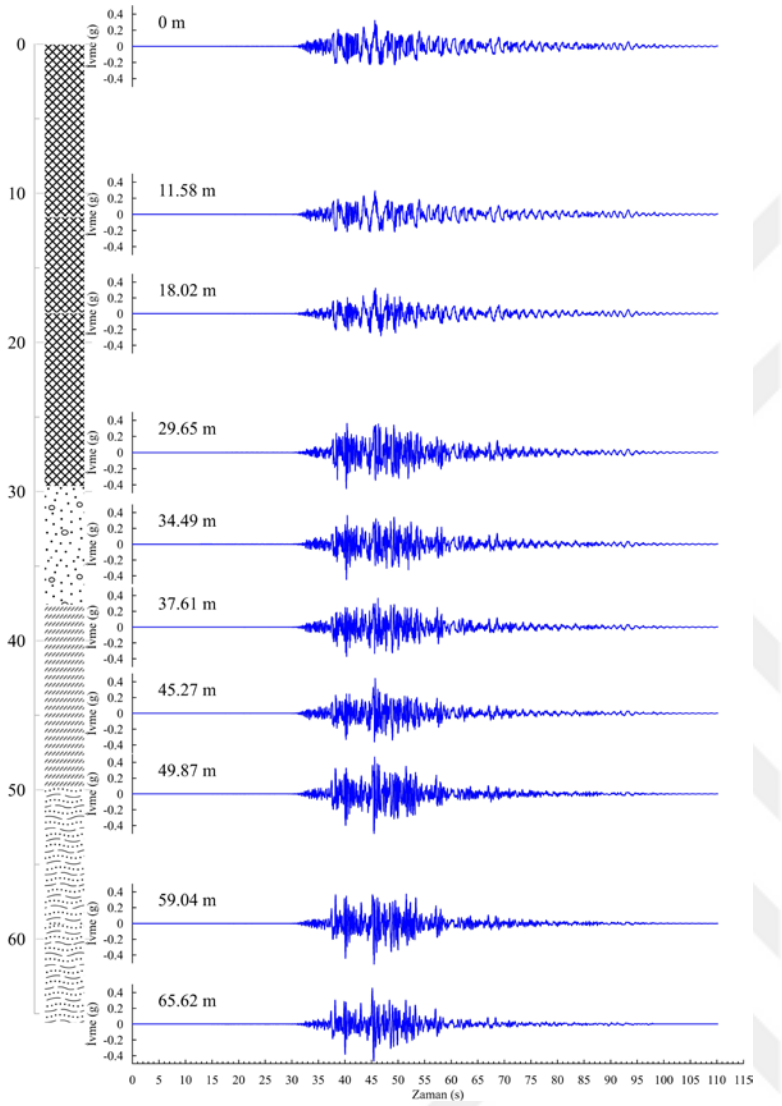
Şekil D.8. Kocaeli depreminin ivme verileri



Şekil D.9. Lomaprieta depreminin ivme verileri

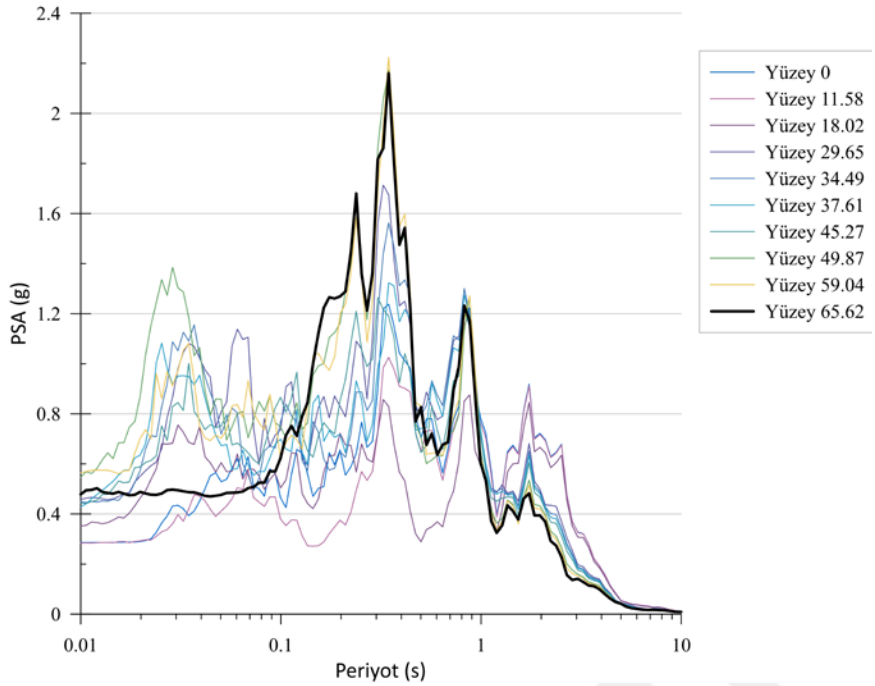


Şekil D.10. Northbridge depreminin ivme verileri

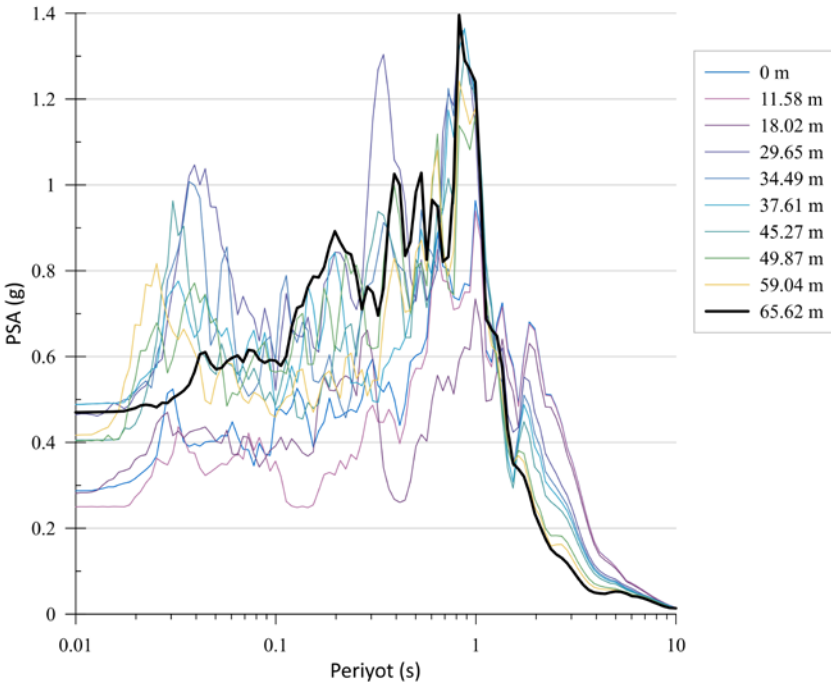


Şekil D.11. Van depreminin ivme verileri

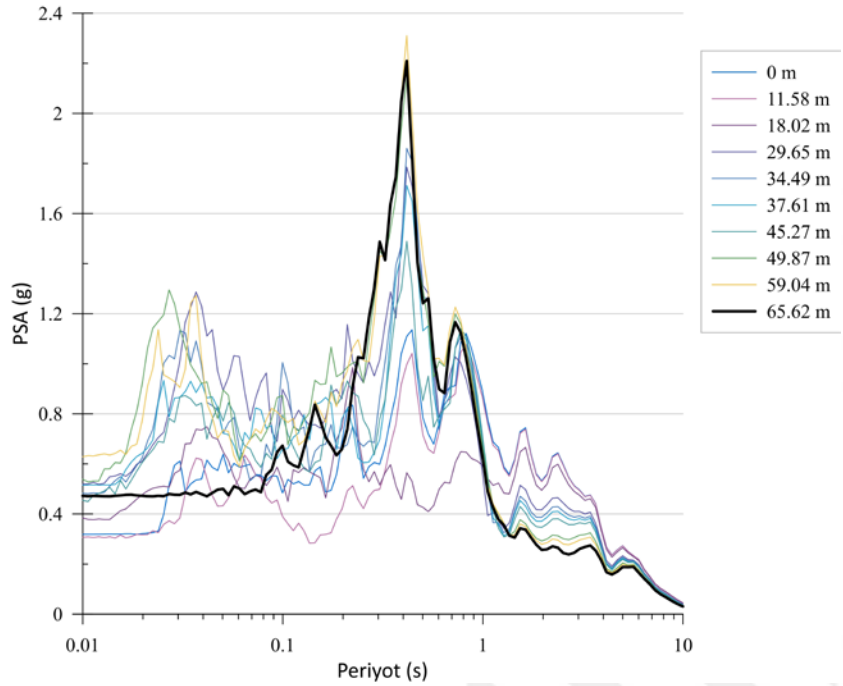
Ek Açıklamalar-E: DEEPSOIL PSA Verileri



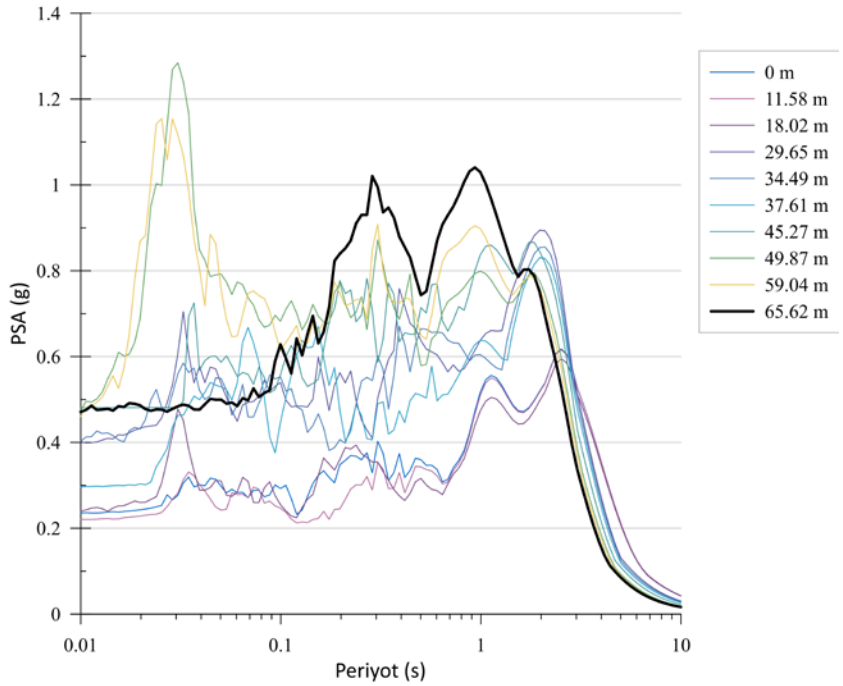
Şekil E.1. Ayfon depreminin en büyük spektral ivme verileri



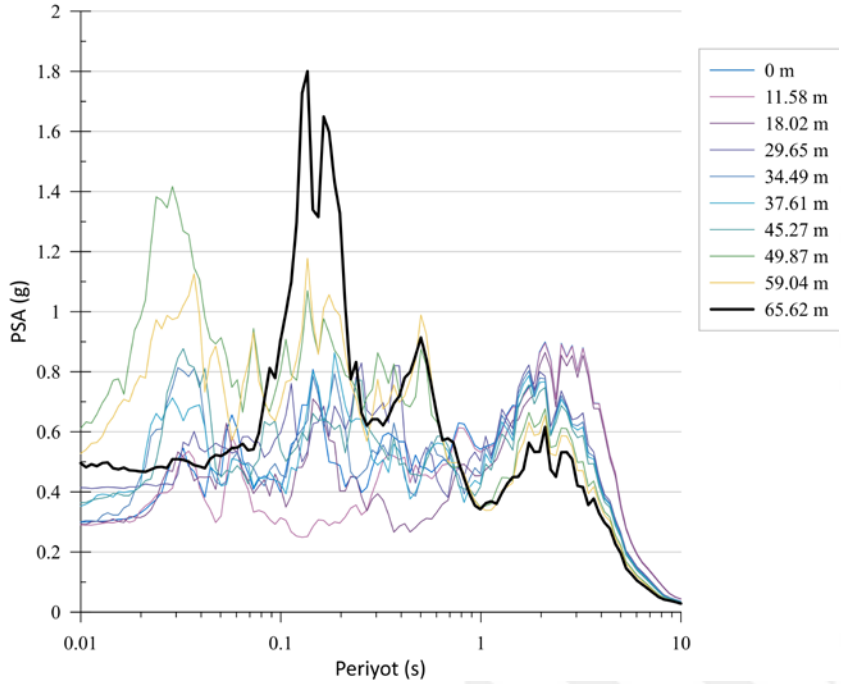
Şekil E.2. Chichi depreminin en büyük spektral ivme verileri



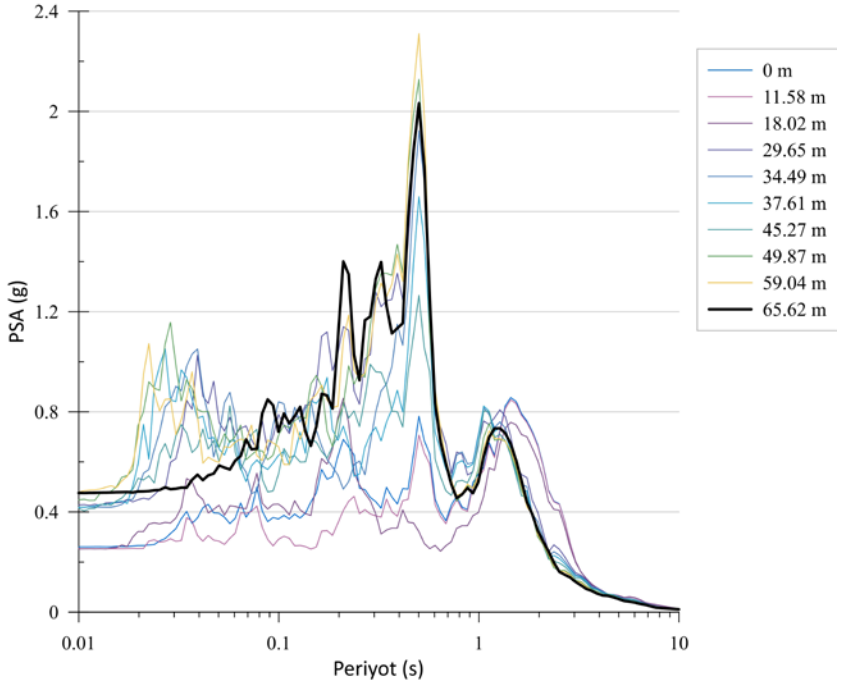
Şekil E.3. Düzce depreminin en büyük spektral ivme verileri



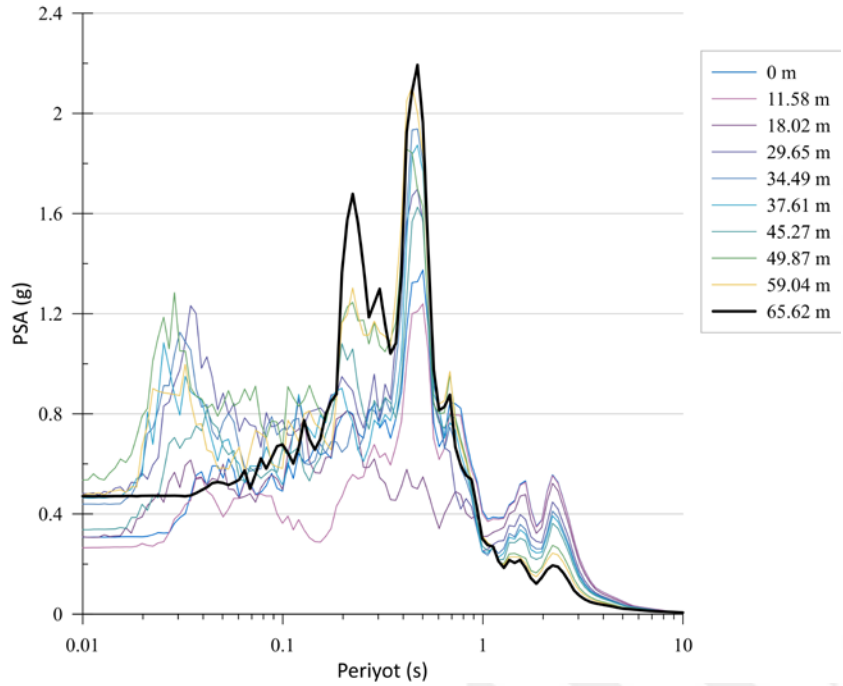
Şekil E.4. Erzincan depreminin en büyük spektral ivme verileri



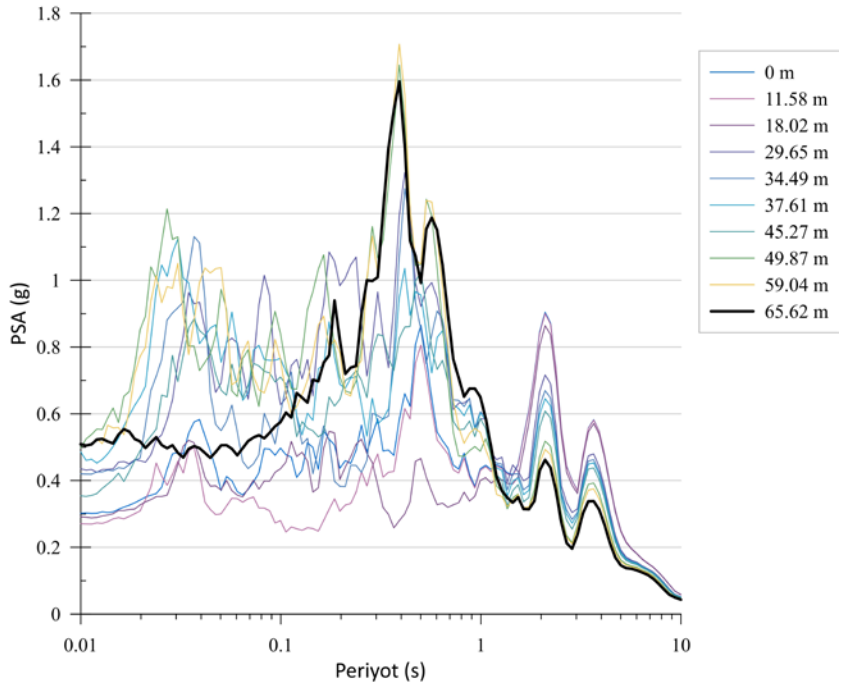
Şekil E.5. Erzurum depreminin en büyük spektral ivme verileri



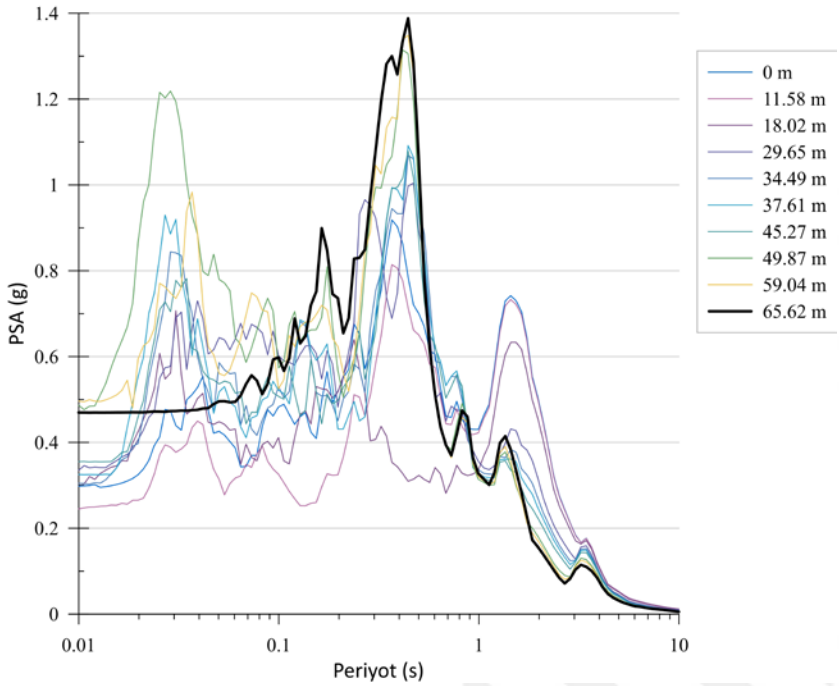
Şekil E.6. Hector mine depreminin en büyük spektral ivme verileri



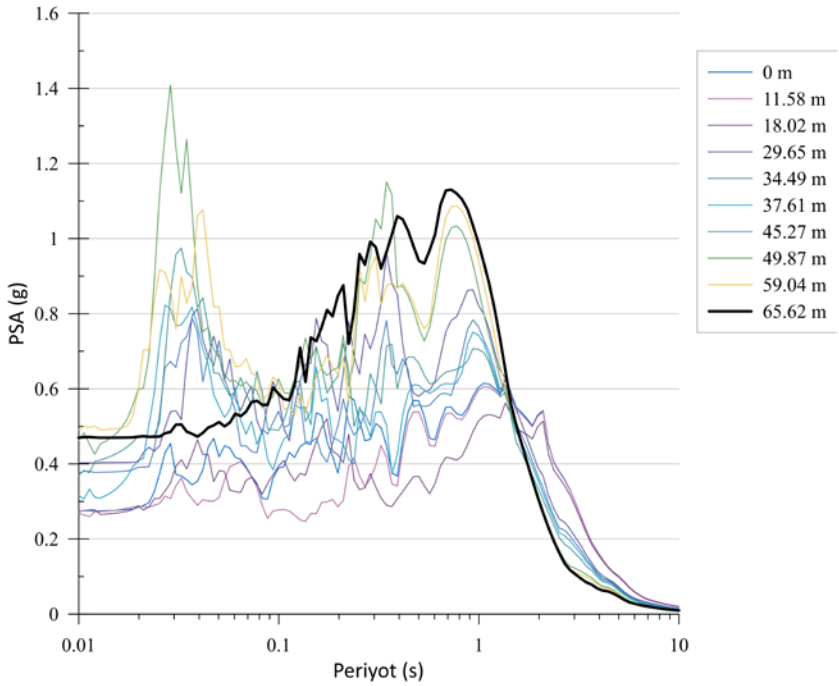
Şekil E.7. Kobe depreminin en büyük spektral ivme verileri



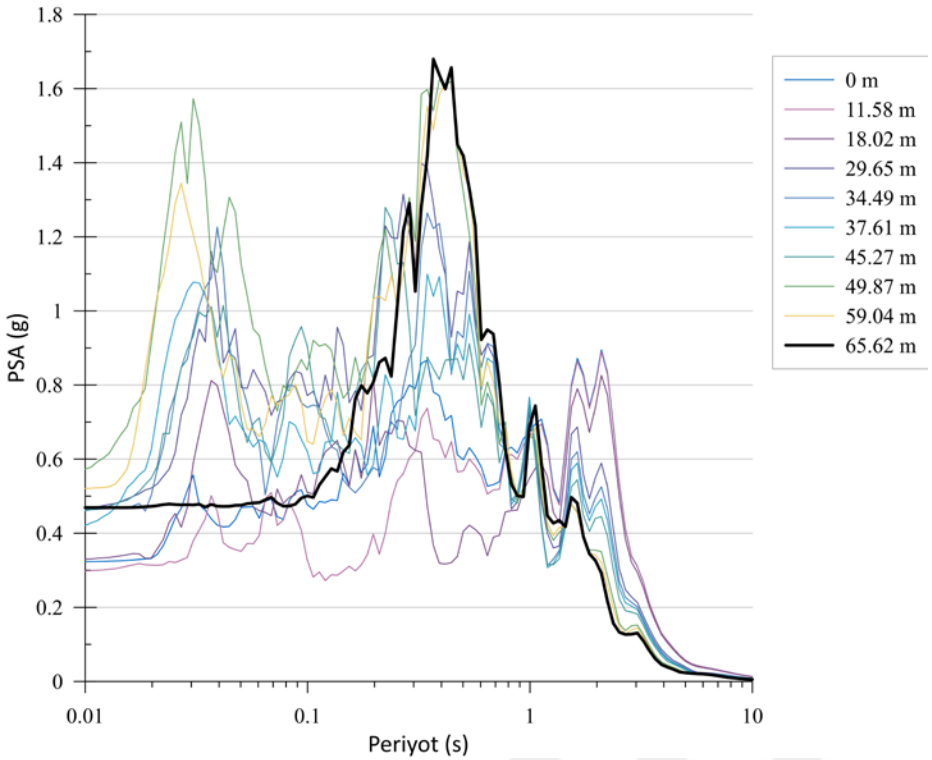
Şekil E.8. Kocaeli depreminin en büyük spektral ivme verileri



Şekil E.9. Lomapriate depreminin en büyük spektral ivme verileri

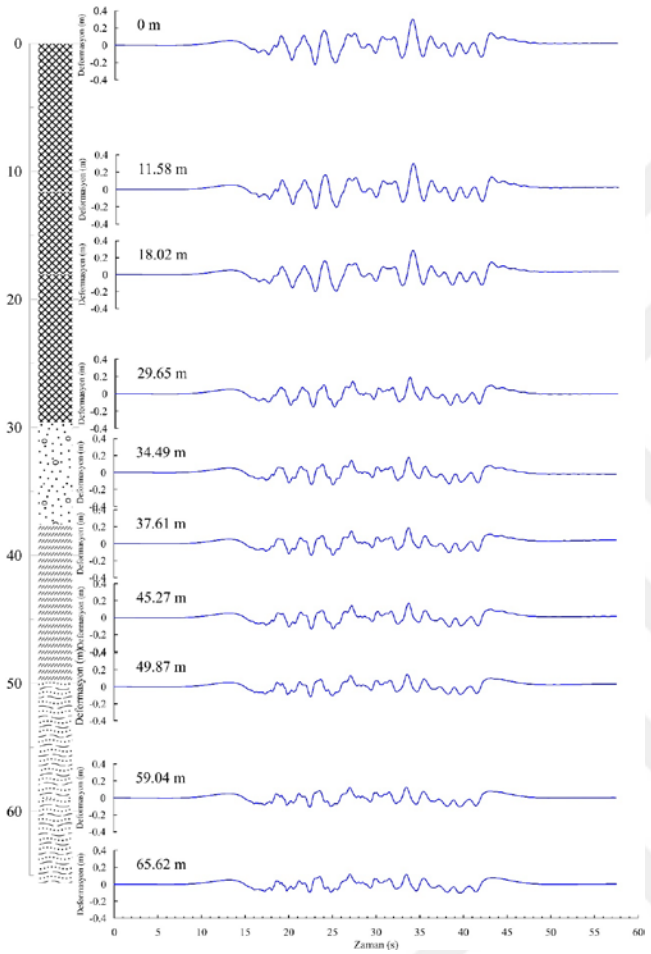


Şekil E.10. Northbridge depreminin en büyük spektral ivme verileri

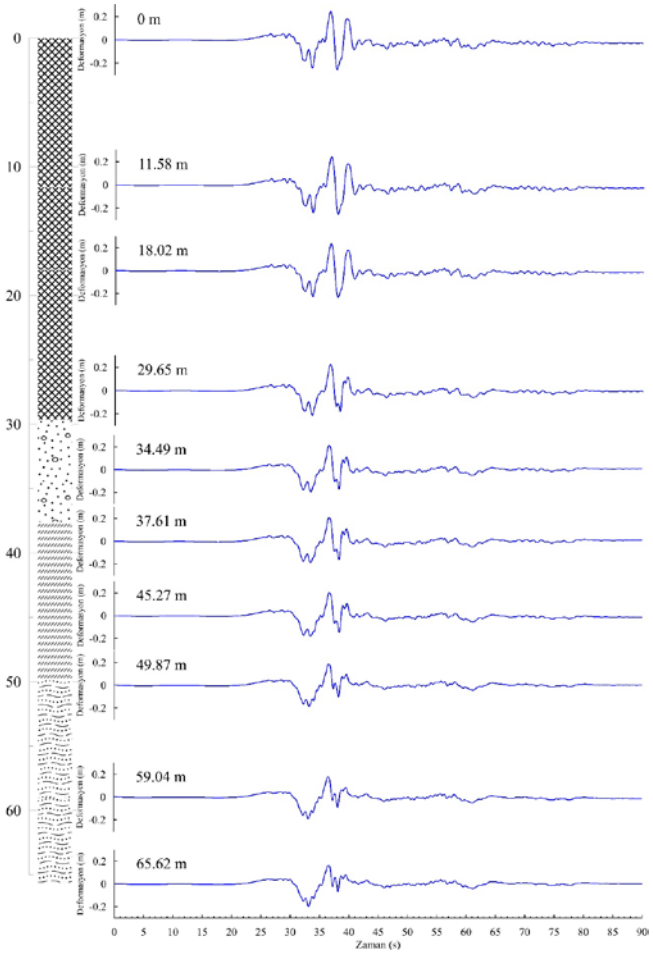


Şekil E.11. Van depreminin en büyük spektral ivme verileri

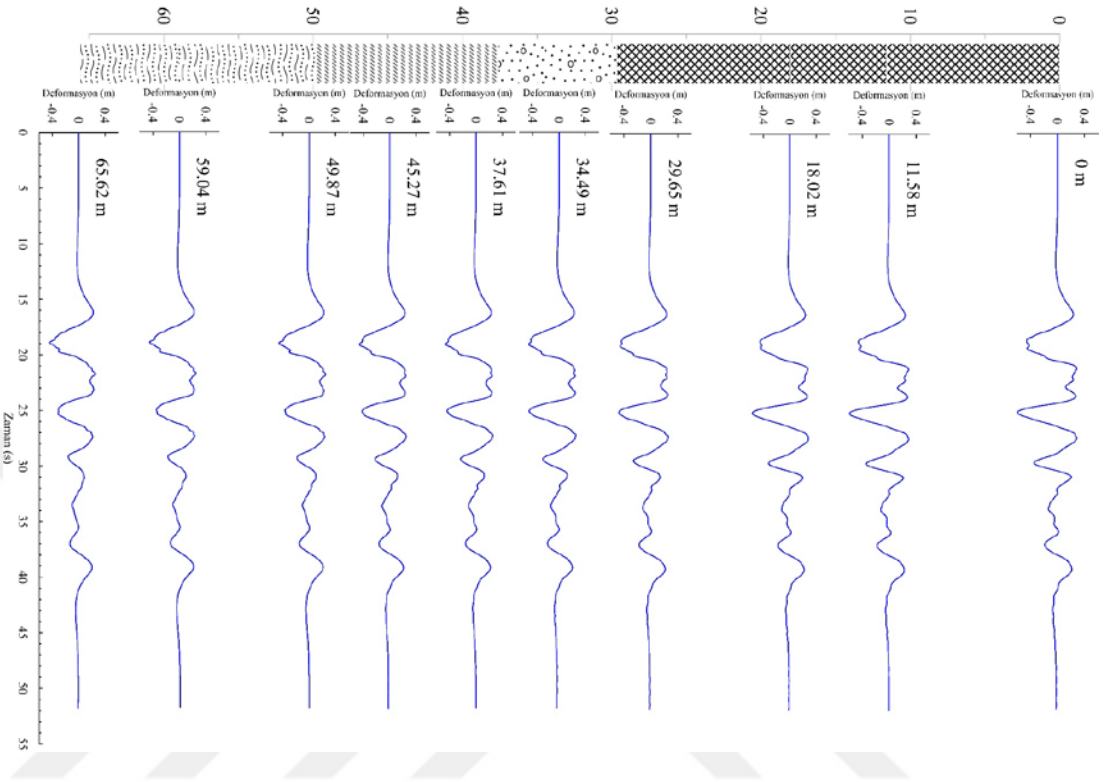
Ek Açıklamalar-F: DEEPSOIL Deformasyon Verileri



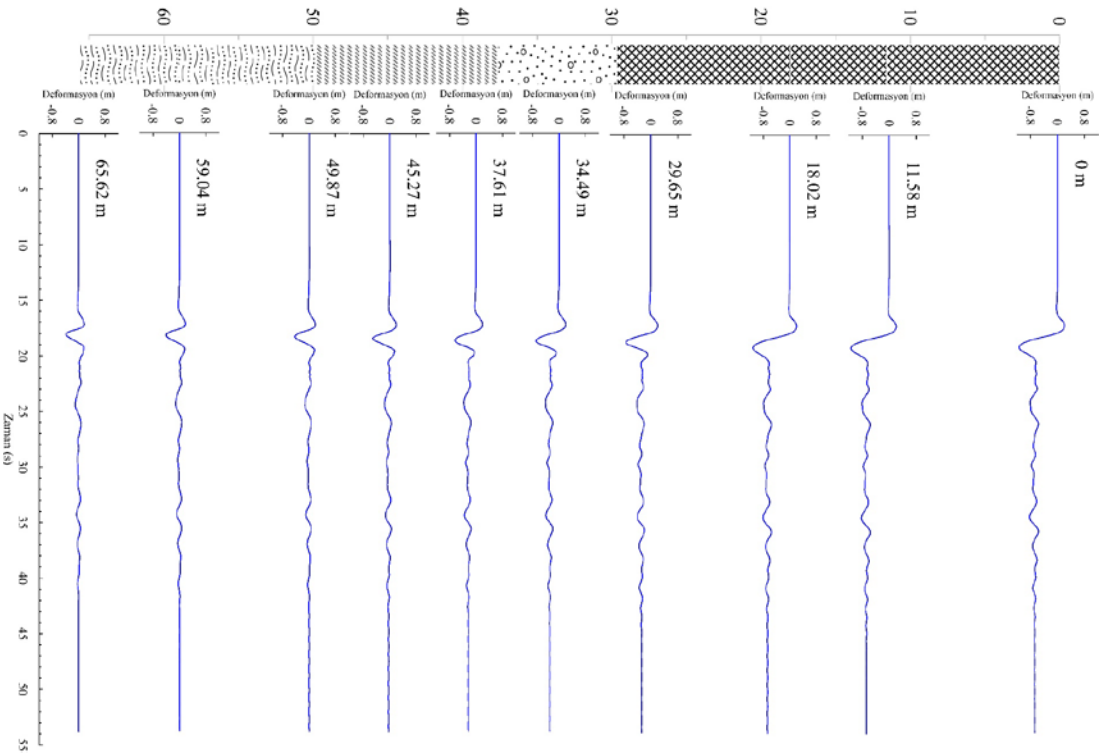
Şekil F.1. Afyon depreminin deformasyon verileri



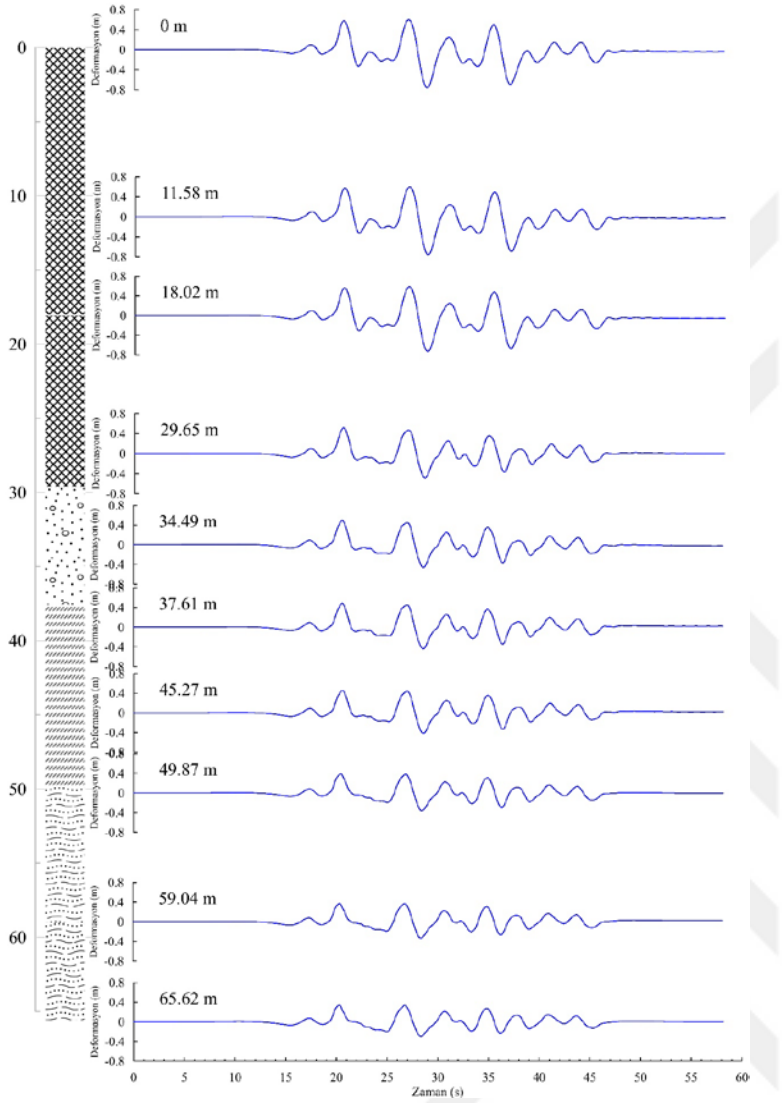
Şekil F.2. Chichi depreminin deformasyon verileri



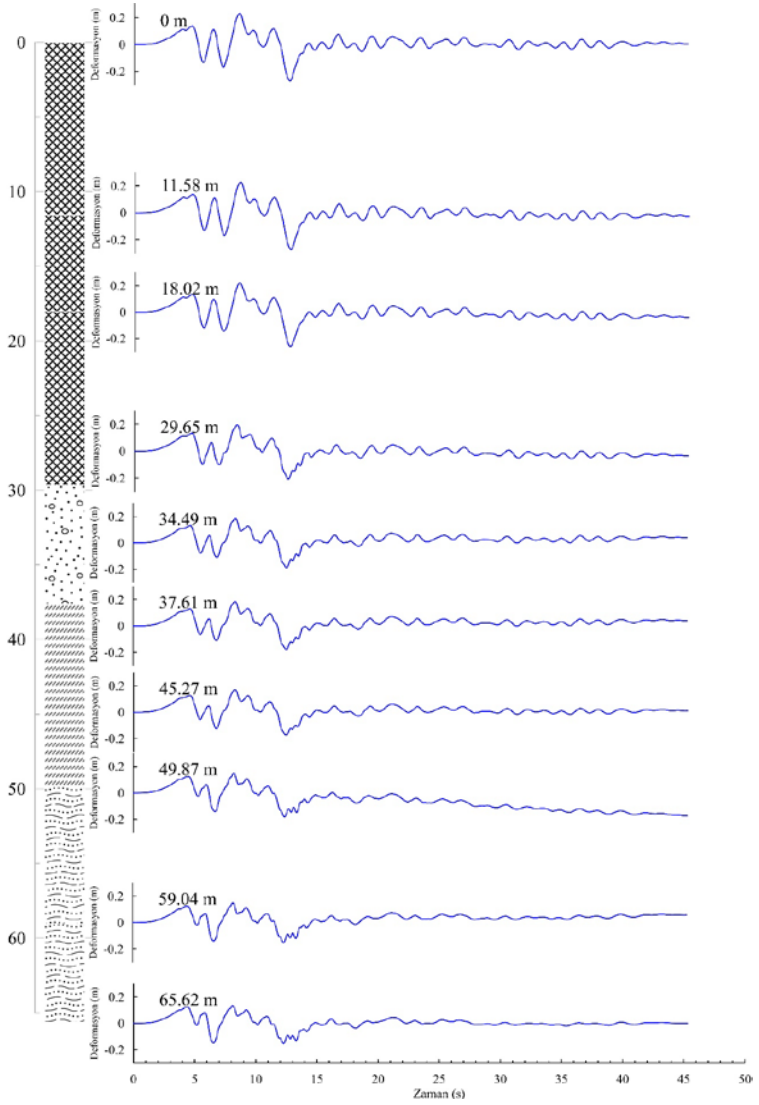
Şekil F.3. Düzce depreminin deformasyon verileri



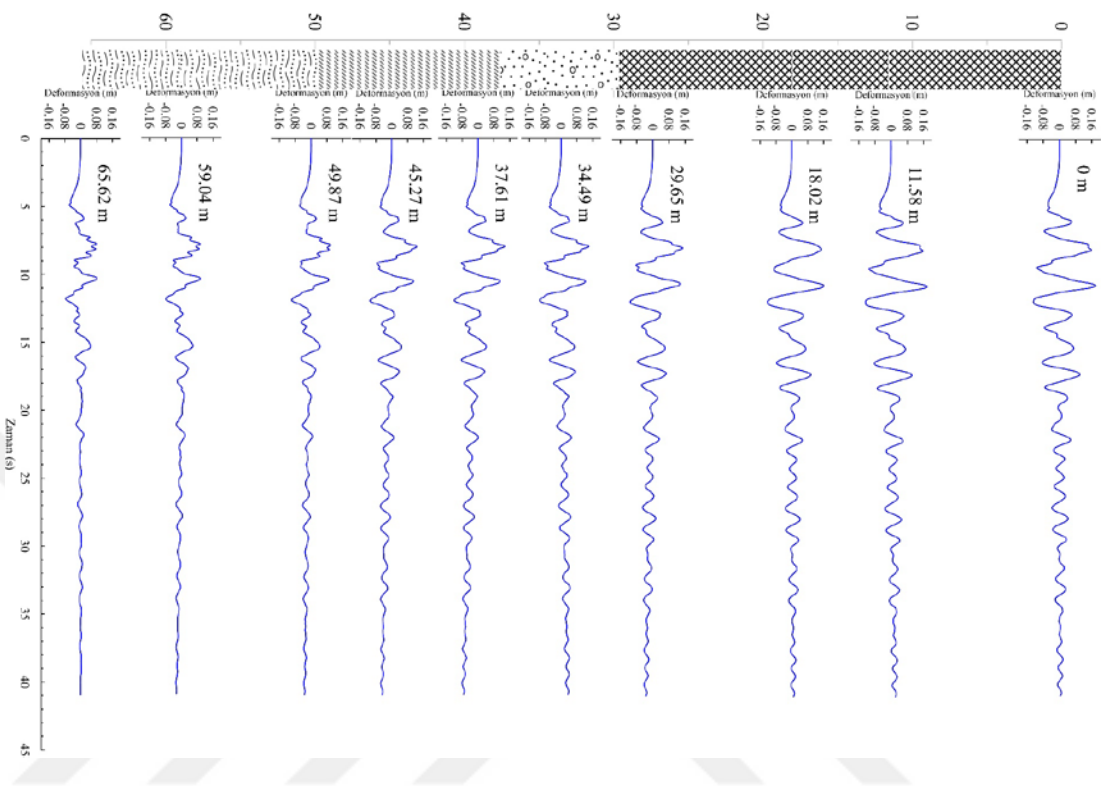
Şekil F.4. Erzincan depreminin deformasyon verileri



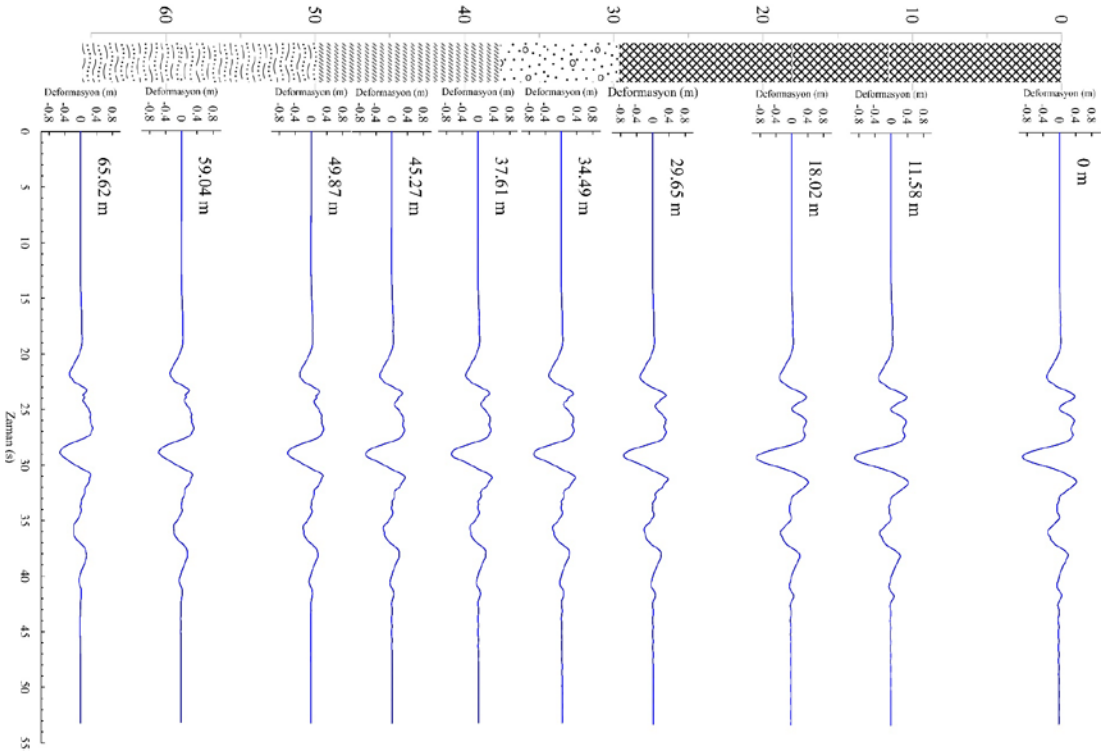
Şekil F.5. Erzurum depreminin deformasyon verileri



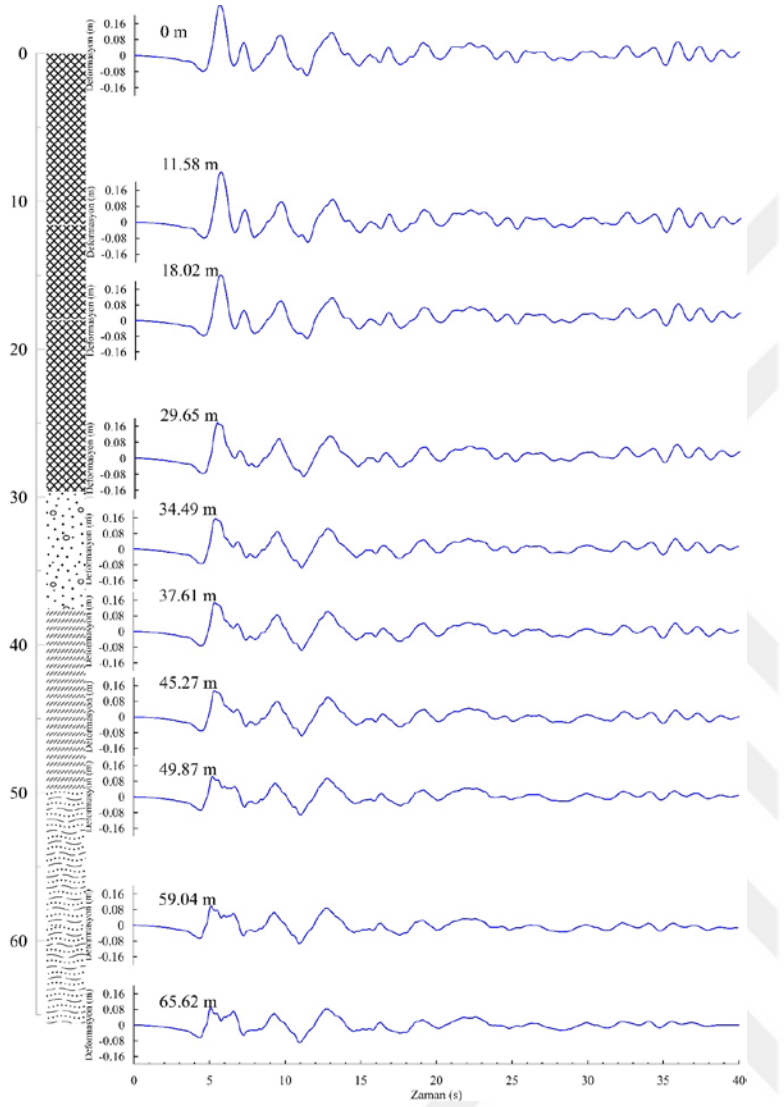
Şekil F.6. Hector mine depreminin deformasyon verileri



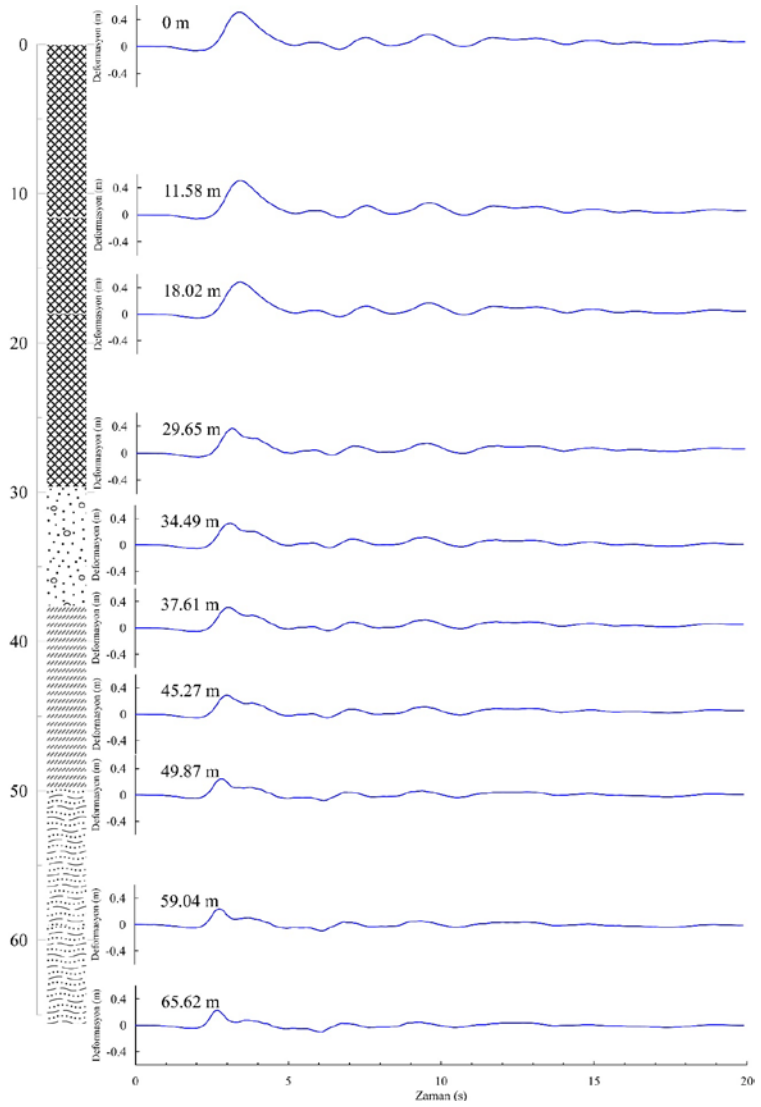
Şekil F.7. Kobe depreminin deformasyon verileri



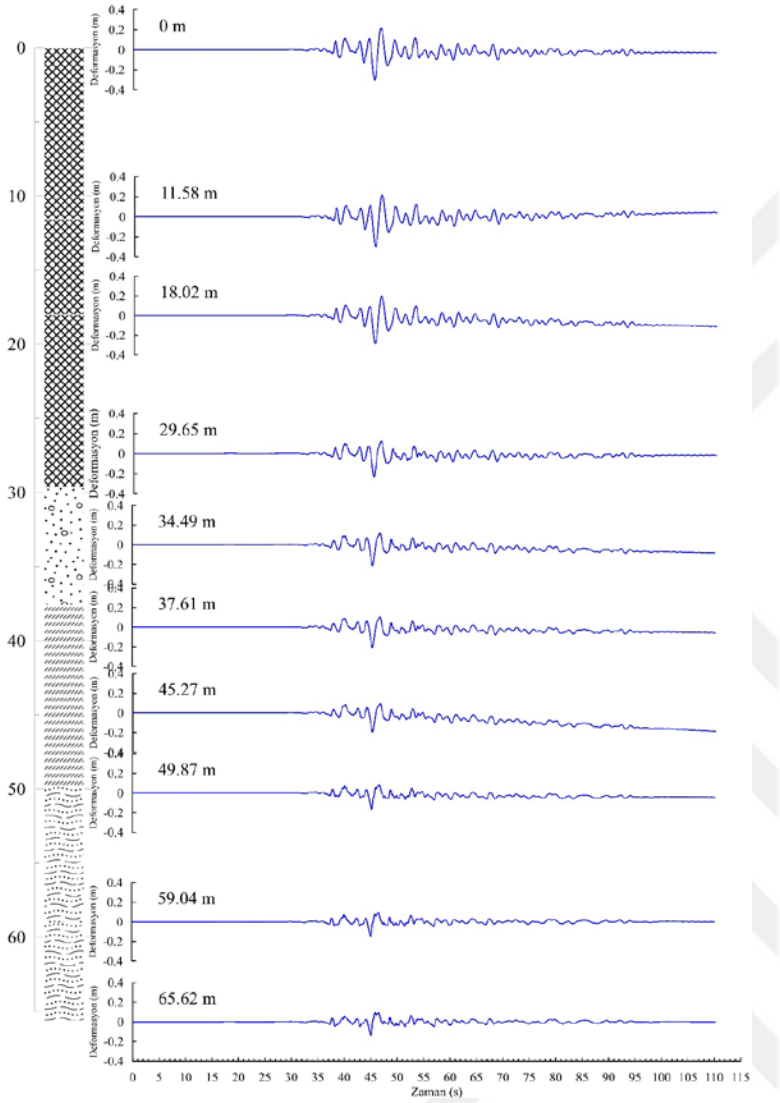
Şekil F.8. Kocaeli depreminin deformasyon verileri



Şekil F.9. Lomaprieta depreminin deformasyon verileri



Şekil F.10. Northbridge depreminin deformasyon verileri



Şekil F.11. Van depreminin deformasyon verileri