Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması

Ersin Güler

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2021

Determination of Dynamic Properties of Soils and Performing Soil Amplification Analysis

Ersin Güler

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

November 2021

Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması

Ersin Güler

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

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN
İkinci Danışman: Doç.Dr. Hasan SAVAŞ

"Bu tez ESOGÜ-BAP tarafından 201915A211 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir."
2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Kamil B. Afacan ve Doç.Dr. Hasan SAVAŞ ve danışmanlığında hazırlamış olduğum **"Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması"** başlıklı 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. 26/11/2021

Ersin GÜLER

İmza

ÖZET

Deprem yer hareketi yerel zemin koşullarından etkilenmektedir. Deprem dalgaları yüzeye doğru hareket ederken ana kayanın derinliği, tabaka kalınlığı, zemin tipi ve dinamik özelliklerinden etkilenmektedir. Deprem bölgelerinde yapılacak olan yapılar için zeminlerin dinamik yükler altında göstereceği davranış büyük öneme sahiptir.

Zeminlerin sahaya özel dinamik paremetrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelerle yapılacak olan analizler sonucunda deprem anında yüzeyde oluşacak zemin tepkisi belirlenmiş olacaktır. Türkiye, Avrupa'nın önemli deprem kuşaklarından birinde yer almaktadır. Buradaki önemli ve aktif fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fay hattı (KAFZ) üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Sismik dalgalar, hareketi boyunca içinden geçtiği zemin tabakalarında değişikliklere neden olurken aynı zamanda zemin tabakalarının özelliklerine göre de dalgaların genlik ve frekans içeriğinde değişiklikler meydana gelmektedir. Yapıların sahaya özel tasarımlarının yapılabilmesi için hem zeminlerin hem de depremlerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizlerin yapılabilmesi için sahaya özel tasarım depreminin belirlenmesi ve zemin büyütme analizlerinin yapılması önemlidir. Bu tez çalışmasında, KAFZ üzerinde yer alan Sakarya ilinde yapılan 4 adet sondaj çalışması ve saha deneyleri ile bölgeden örselenmemiş numuneler ve parametreler elde edilmiştir. Daha sonra laboratuvarda rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deney sistemleri ile sahaya özel dinamik davranışlar, birim kayma genliğine bağlı kayma modülü ve sönüm oranı cinsinden belirlenmiştir.Bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan 11 adet deprem ivme kaydı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de tanımlandığı gibi iki farklı ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş ve Deepsoil programı ile bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Bölgenin zemin büyütme değerleri, iki farklı ölçeklendirme yöntemi ile karşılaştırışmış ardından bölgenin spektral parametreleri TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfı ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sahaya özel analiz, Zemin büyütmesi, Ölçeklendirme, TBDY 2018, Adapazarı.

SUMMARY

Earthquake ground motion is affected by local soil conditions. While seismic waves move towards the surface, they are affected by the depth of the bedrock, layer thickness, soil type and dynamic properties. The behaviour of the soils under dynamic loads is of great importance for the structures to be built in earthquake zones.

As a result of the determination of the site-specific dynamic parameters of the soils and the analyses to be made with these parameters, the ground response that will occur on the surface in the event of an earthquake will be determined. Turkey is located in one of the most important earthquake zones in Europe. Studies have been carried out on the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) which is one of the important and active fault lines here. While seismic waves cause variation while they pass through during their movement, changes occur in the amplitude and frequency content of the waves according to the characteristics of the soil layers at the same time. In order to make site-specific designs of structures, both soils and earthquakes must be analyzed. In order to make these analyses, it is important to determine the site-specific design earthquake and to conduct soil amplification analyses. In this thesis study, undisturbed samples and their parameters were obtained from the field experiments in Sakarya, located on the NAFZ the region with 4 borings. Then, site-specific dynamic behaviors were determined in terms of shear modulus and damping ratio depending on unit slip amplitude with resonant column and dynamic triaxial test systems in the laboratory. 11 earthquake acceleration records reflecting the seismicity of the region were scaled with two different scaling methods and one-dimensional equivalent linear and non-linear soil amplification analyses were performed with the Deepsoil program. The soil amplification values of the region were compared with two different scaling methods, then the spectral parameters of the region were compared with the spectrum envelope proposed by TEC 2018 for the region.

Keywords: Site specific analysis, Soil amplification, Scaling method, TEC 2018, Adapazarı.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…. vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xix
1. GİRİŞ ve AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
3. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ 13
3.1.Yer Hareketi Parametreleri 13
3.1.1. Genlik Parametreleri 13
3.1.1.1.Pik İvme 14
3.1.1.2.Pik Hız 15
3.1.1.3.Pik Yerdeğiştirme 16
3.1.2. Frekans İçeriği Parametreleri 16
3.1.2.1.Yer Hareketi Spektrumu 16
3.1.2.1.Spektral Parametreler 18
3.1.3. Süre 19
3.2. Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Parametreler 19
3.2.1.Kayma Modülü ve Sönüm Oranı 20
3.3. Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Laboratuvar Deneyleri 22
4. SAHAYA ÖZEL DİNAMİK ANALİZ 26
4.1. Sahaya Özel Zemin Davranışı ve TBDY 2018 26
4.2. Zemin Büyütmesi ve Etkileyen Faktörler 28
4.3. Zemin Davranış Analizleri 31
4.3.1. Bir boyutlu eşdeğer doğrusal yaklaşım 32

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3.2. Bir boyutlu doğrusal olmayan yaklaşım 32
5. MATERYAL VE YÖNTEM 36
5.1.Giriş 36
5.2.Çalışma Bölgesinin Tanıtılması 36
5.2.1. Bölgenin Depremselliği ve Jeolojisi 38
5.3. Saha Çalışması 44
5.3.1. Belirlenen Koordinatlarda Sondajların Yapılması 44
5.3.2. Arazi Deneyleri 46
5.4. Laboratuvar Çalışması 50
5.4.1. Örselenmemiş Numunelerin Tanımlanması 51
5.4.2. Örselenmemiş Numuneler ile TRX Deneylerin Yapılması 52
5.4.3. Örselenmemiş Numuneler ile RC Deneylerinin Yapılması..... 56
5.4.4. Örselenmemiş Numuneler ile UU Deneylerinin Yapılması 59
5.5. Dinamik Deney Sonuçlarının Matlab R2018a ile Birleştirilmesi 62
5.6. Sahaya Özel Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması 64
5.6.1. Bölgeye Uygun Depremlerin Seçimi 65
5.6.2. Seçilen Depremlerin Ölçeklendirilmesi..... 68
5.6.3. DeepSoil V6.1. ile 1D Boyutunda Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması75
6. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 80
6.1. Örselenmemiş Numunelerin Dinamik Özellikleri 80
6.2. 1B Eşdeğer Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları 93
6.3. Farklı Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Tepki Spektrumları 98
6.3.1. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları.....99
6.3.2. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları ...100
6.4. Farklı Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Zemin Büyütme Faktörleri.....102
6.4.1. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Zemin Büyütme Faktörleri.....102

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.4.2. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Zemin Büyütme Faktörleri.....110
6.4.3. EL ve NL Analizlerin Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması 117
6.4.4. Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması.....119
6.5. Zemin Büyütme Analizi ve TBDY 2018'e Göre Perfomansının Değerlendirilmesi ... .121
6.5.1. Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçları.....121
6.5.2. Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları 129
SONUÇ VE ÖNERİLER 138
KAYNAKLAR DİZİNİ.....144

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Kobe depremine ait ivme-hız-yer değiştirme grafikleri …….14
3.2. Pik ivmenin gösterimi……....15
3.3. Pik hız değerinin gösterimi……....15
3.4. Pik yerdeğiştirme değerinin gösterimi……..…....16
3.5. Kocaeli depremine ait Fourier genlik spektrumu ve diğer bilgiler……..…...17
3.6. Palm Spring kaydına ait spektrum kayıtları……..…..18
3.7. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme eğrisi……...….20
3.8. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin sistematik gösterimi……...….21
3.9. Modül azalım ve sönümleme eğrilerine bir örnek……..22
3.10. Bender eleman deney sistemi……..…….23
3.11. Rezonant kolon deney sistemi…….23
3.12. Dinamik üç eksenli deney sistemi……...…….24
3.13. Tekrarlı kesme deneyi…….25
3.14. Burulma (Torsional) deney sistemi…….…25
4.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası…….…….26
4.2.AFAD tarafından sunulan yerel tasarım spektrum ekranı……...……...28
4.3. Anakayadan deprem ivme kaydının tabaka boyunca değişimi……..……..…..29
4.4. Dinamik harekete zemin tabakalarının etkisi…….……...31
4.5. Doğrusal ve doğrusal olmayan zeminin elastik ve plastik davranış bölgeleri…….....33
4.6. Zemine ait örnek histerezis eğrisi……..…...33
4.7. Omurga eğrisinden elde edilen kayma modülleri…….....34
5.1. 2020 yılında Türkiye ve çevresinde meydana gelen depremler ve büyüklükleri…..…..36
5.2. Çalışma bölgesinin genel görünümü…….……..……..37
5.3. Türkiye'nin aktif fay hatları ve levhalar…….……..38
5.4. Adapazarı bölgesinin diri fay haritası…….……..……..39
5.5. Türkiye ve çevresinin tektonik haritası…….……..40
5.6. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti…….……...41
5.7. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti……..……..42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

5.8. Sakarya ili jeoloji haritası……....43
5.9. Belirlenen noktalarda sondaj çalışmaları……...45
5.10. Belirlenen noktalarda sondaj çalışmaları……46
5.11. Belirlenen noktalarda SPT değerlerinin ölçümü……...47
5.12. Sondaj noktalarında jeofizik yöntem ile kayma dalgası hızının ölçülmesi……..49
5.13. SK-1 sondaj kuyusundan elde edilen UD tüpü ve örselenmemiş numune…….....51
5.14. Atterberg limitlerinin belirlenmesi……..52
5.15. Dinamik üç eksenli deney sisteminin genel görünümü……53
5.16. Dinamik üç deney sisteminin laboratuvar görünümü……54
5.17. Numunenin hücreye yerleştirilmesi……55
5.18. RCTS deney sistemi ve basınç ünitesinin boy kesiti……..56
5.19. Rezonant kolon deney sistemi laboratuvar görünümü……....57
5.20. İki farklı sönümleme değerlerinin ölçülmesi……...58
5.21. Üç eksenli basınç deney sistemi……61
5.22. Matlab programında en uygun eğri seçimi……...63
5.23. Matlab programlama dili ile en uygun eğrinin elde edilmesi……..64
5.24. DeepSoil programı arayüzü……...65
5.25. Analizlerde kullanılacak olan ivme-zaman grafikleri……...67
5.26. Analizlerde kullanılacak olan ivmelerin spektral ivme-periyot grafikleri……...68
5.27. AFAD interaktif web uygulaması……...69
5.28. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu ve Düşey Elastik Tasarım Spektrumu……...70
5.29. Basit ölçeklendirme sonucunda ivme kaydında meydana gelen değişim……..71
5.30. Basit ölçeklendirme yöntemine göre (PGA) ölçeklendirilen ivme kayıtları……....71
5.31. Zaman tanım alanında ölçeklendirilen deprem ivmelerinin spektral ivme değerleri....72
5.32. Imperial Valley-02 depreminin Seismoartif programına tanıtılması……...73
5.33. Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme……..73
5.34. Yapılan ölçeklendirme sonucunda ivme kaydında meydana gelen değişim……...74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

5.35. Frekans tanım alanında ölçeklendirme yöntemine göre (SPEKTRAL) ölçeklendirilen ivme kayıtları…..……..……..…74
5.36. Frekans tanım alanında ölçeklendirilen deprem ivmelerinin spektral ivme değerleri……...75
5.37. Zeminlere ait parametreler…….…..77
5.38. Zemin profillerinin programa tanıtılması…….……....78
6.1. Çalışmada kullanılan numunelerin plastisite kartı üzerinde gösterimi……..…80
6.2. Sk-2 UD-2 numunesine ait rezonans frekans grafiği……..…81
6.3. TRX deneylerinde kullanılan yükleme tipi……....81
6.4. Dinamik üç eksenli deney sisteminde elde edilen histerezis eğrileri……..…82
6.5. Sk-1 sondaj kuyusuna 2.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları…….....83
6.6. Sk-1 sondaj kuyusuna 7.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları……....83
6.7. Sk-1 sondaj kuyusuna 12.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları……..……...84
6.8. Sk-1 sondaj kuyusuna 17.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları ……....…84
6.9. Farklı PI değerleri ait Vucetic ve Dobry (1991) modeli……..……..…85
6.10. 0-5m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller……..…87
6.11. 5-10m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller……....87
6.12. 10-15m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller……..…88
6.13. 15-20m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller……..89
6.14. 15-20m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller……..…89
6.15. 0-5m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller……....90
6.16. 5-10m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller……..…91
6.17. 10-15m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller……..…91
6.18. 15-20m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller……....92
6.19. 20-25m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller……..…..93
6.20. Zaman tanım ölçeklendirme yöntemi ile EL ve NL analizi sonucunda yüzeyde oluşan ivme değerleri……...94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

6.21. Frekans tanım ölçeklendirme yöntemi ile EL ve NL analizi sonucunda yüzeyde oluşan ivme değerleri……..……..……..….97
6.22. Sk-1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme-periyot değerleri……...99
6.23. Sk-3 ve Sk-4 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme-periyot değerleri 100
6.24. Sk-1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme değerleri…….....101
6.25. Sk-3 ve Sk-4 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme değerleri……...102
6.26. Sk 1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri…….103
6.27. Sk 3 ve Sk-4 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri…….104
6.28. Sk-1 noktasında EL ve NL yapılan analizde ivmenin derinliğe bağlı değişimi...…106
6.29. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi.....108
6.30. Sk 1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri……..…….110
6.31. Sk 3 ve Sk-4 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri……...…..……..……..111
6.32. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi.....113
6.33. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi…..115
6.34. Doğrusal olmayan (NL) analizde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması…….117
6.35. Eşdeğer doğrusal (EL) analizde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması…..……...……118
6.36. Zaman-tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörlerinin karşılaştırılması……..…….……..119
6.37. Frekans-tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörlerinin karşılaştırılması……..120
6.38. Sk-1 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……..……..……122

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

6.39. Sk-1 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi…….123
6.40. Sk-2 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……..124
6.41. Sk-2 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi…….125
6.42. Sk-3 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……126
6.43. Sk-3 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……127
6.44. Sk-4 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……128
6.45. Sk-4 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……129
6.46. Sk-1 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……130
6.47. Sk-1 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……131
6.48. Sk-2 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……132
6.49. Sk-2 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……..133
6.50. Sk-3 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……..134
6.51. Sk-3 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……135
6.52. Sk-4 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……136

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

6.53. Sk-4 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi……..……..……137

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

4.1. Yerel Zemin Sınıfları ……..…….....23
5.1. Deney programı……..……..……...….50
5.2. Seçilen depremler ve özellikleri……..……..……...…..66
5.3. Analizleri yapılan sondaj kuyuları……..……...…....71
6.1. Referans modeller……..…..……...…..……...…..……...…..……...…..…….86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
S_s:	kısa periyot dönemi için spektral ivme
S_1:	1 saniye periyot için spektral ivme
S_{DS}:	yatay elastik tasarım spektrumu
S_a:	spektral ivme
S_v:	spektral hız
S_d:	spektral yer değiştirme
Tp:	baskın periyot
PGA:	pik yer ivmesi
PGV:	pik yer hızı
G:	dinamik kayma modülü
ρ:	yoğunluk

Kısaltmalar	**Açıklama**
1D	bir boyutlu
Metre	m
Kilometre	km
Saniye	sn
Max	maksimum
Min	minimum
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
OCR	aşırı konsolide oranı
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Hattı
V_s	Kayma dalgası hızı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
TRX	Dinamik üç eksenli deney sistemi
RC	Rezonant kolon deney sistemi

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Avrupa'nın önemli deprem bölgelerinden biri olan Türkiye, hem Arabistan hem de Afrika Levhaları'nın ilerlemesi ile Anadolu Levhası sıkışmakta ve Avrasya Levhasına doğru hareket etmekte ve depremler meydana gelmektedir. Bölgede bulunan ve aktif fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAFZ) üzerinde ve yakınlarında meydana gelen 6.9 Erzincan (1992), 7.4 Kocaeli (1999), 7.2 Düzce (1999), 7.2 Van (2011), 6.8 Elaziğ (2020) ve 6.9 Seferihisar (2020) depremlerinde çok sayıda yapı yıkılmış ve can kayıpları meydana gelmiştir. KAFZ üzerinde önemli sanayi kentlerinin bulunması ve şehirleşmenin artması ülke nüfusunun önemli bir bölümünü deprem riski altında bırakmaktadır. Bu nedenle yapı tasarımlarına, sahaya özel zemin davranışının ve yapı-zemin etkileşiminin dâhil edilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle yapıların tasarımının sahaya özel yapılması ve yapı-zemin etkileşiminin incelenmesi önemlidir. Deprem bölgelerinde meydana gelen hasarların azaltılması ve depreme dayanıklı yapı tasarımında zemin tabakalarının sismik yükler altındaki davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Zemin tabakalarının farklılaşması ve dinamik yükler altında göstereceği davranışın farklılaşması ile yapılara etkiyen deprem kuvvetleri değişmektedir.

Sahaya özel zemin davranış analizleri, ana kayadan yüzeye doğru hareket eden sismik kuvvetin zemin tabakaları boyunca değişimini ve zemin yüzeyinde meydana gelen spektral özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Sahaya özel zemin davranışının belirlenmesi için sahada yapılacak arazi deneylerinin ve sahadan alınacak örnekler üzerinde ilgili laboratuvar deneylerinin yapılması önem taşımaktadır. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı laboratuvar deneyleri kullanılmaktadır. Bu deneylerden en yaygın olanları Dinamik Üç Eksenli (TRX) ve Rezonant Kolon (RC) deney sistemleridir. RC deney sistemi ile %0.01'den daha düşük deformasyon seviyeleri için kullanılırken, TRX deney sistemi ise daha yüksek deformasyon seviyeleri için kullanılmaktadır.

Dinamik laboratuvar deney sistemlerinin yanı sıra sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak deprem ivme kayıtları da önem taşımaktadır. Bu konuda yönetmeliklerin belirlediği şekilde seçimlerin yapılması gerekmektedir. Tasarımların yapılabilmesi için bölgenin fay türü, yerel zemin koşulları gibi özelliklere göre depremler seçilerek analizler yapılmaktadır. Kullanılacak olan deprem ivme kayıtları zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında ölçeklendirilmektedir. Bu iki yönteminde sahaya özel analizlerde sonuçlara etkili olduğu bilinmektedir.

Ülkelerin belirlemiş olduğu yönetmeliklerde deprem ivme kayıtlarının seçimi, ölçeklendirilmesi ve tasarım spektrum eğrilerinin elde edilmesine ait tüm detaylar belirtilmiştir. Türkiye deprem yönetmeliği çalışmaları ilk kez 1939 yılında meydana gelen Erzincan depremi sonrasında İtalyan Yönetmeliği temel alınarak 1940 "Zelzele Mıntıkalarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi" hazırlanmıştır. Ardından 1944, 1949,1953 ve 1962, 1975, 1998 ve 2007 yıllarında değişikliğe uğramıştır. Son olarak 2018 yılında yerel zemin koşullarının etkisinin daha da artırıldığı yeni yönetmelik yayınlanmıştır. 2019'dan itibaren güncel olarak kullanılan son yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de, önceki yönetmeliklere göre özellikle sahaya özel yerel zemin sınıflarının belirlenmesi kısmı genişletilerek deprem yer hareketi spektrumlarının yapının bulunduğu konuma, faya uzaklığına ve zemin özelliklerine göre hesaplanması önerilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ülkemizin aktif deprem bölgelerinden biri olan Sakarya ili Adapazarı ilçesinde gerçekleştirilen arazi çalışmalarında sondajlar yapılmış ve sondajlardan örselenmemiş numuneler alınmıştır. Aynı zamanda sondaj alınan noktalarda arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sahaya özel çalışma kapsamında dinamik parametrelerin belirlenmesinde RC ve TRX deneyleri yapılmıştır. Daha sonra bölgenin depremsellik özelliklerinin özelliklerini yansıtan deprem ivme kayıtları önce iki farklı yöntem ile ölçeklendirilmiş ve hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Bölgenin yüzey ivme değerleri ve spektral ivme değerleri hem iki farklı ölçeklendirme ile hem de iki farklı analiz yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, saha çalışmaları, saha deneyleri, laboratuvar deneyleri, analizlerin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi deprem bölgelerinde yapılacak olan tasarımlar için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle araştırmacılar için hem zeminlerin dinamik parametreleri, bunların hesaplanma yöntemleri ve laboratuvar çalışmaları hem de deprem ivmelerinin bölgede göstereceği davranışın analizleri çalışma konusu olmuştur.

Literatürde yapılan araştırmalar 4 kısımda incelenmiştir. Bunlar; *1-Bölgenin jeolojisi, 2-Zemin büyütme analizleri, 3-Laboratuvar çalışmaları ve 4-Analizler ve TBDY 2018* üzerine yapılan çalışmalardır.

Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde bulunan Sakarya ili jeolojik olarak farklı zamanlarda meydana gelen taşkın, sel ve diğer sebepler ile alüvyon zeminler üzerine kurulmuştur. Suya doygun zeminleri olan bu bölgede deprem anında zemin büyütmesi, sıvılaşma gibi sismik tehlikler meydana gelmektedir. Bölgenin jeolojisini inceleyen, bölgenin zemin parametreleri ile çalışmalar yapılmış ve araştırmacılar tarafından ilgi ile bölge hakkında bilgilere ulaşılmıştır.

Bölgenin jeolojisi üzerine Bol (2003) çalışmasında Sakarya ilinde alüvyon zeminlerin jeomorfolojik özelliklerini belirleyerek zemin indeks özelliklerini geoteknik açısından incelemiştir. Adapazırı zeminlerinin oluşumlarını ve deprem anında meydana gelebilecek hasar dağılımlarını belirlemiştir. Sancio (2003), Adapazarı ilçesinde yapmış olduğu 12 bölgede saha deneyleri ile zemin profilini belirlemiş ve ardından bölgenin depremselliği göz önüne alınarak sıvılaşma potansiyeli üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bir diğer çalışmada ise; Adapazarı bölgesinden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır (Kaya ve Erken, 2015). Çalışmada farklı zemin grupları ve plastisite değerleri için gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu

basıncındaki değişimler incelenmiştir.

Bölgede aktif fay hattının ve suya doygun alüvyon zeminlerin varlığı, bunun yanı sıra bölgede daha önce meydana gelen depremlerde yapılarda büyük hasarların olması nedeniyle farklı araştırmacılar tarafından yerel zemin koşullarının etkisini inceleyen çok sayıda çalışma yer almaktadır. Zeminlerinlerde meydana gelen büyütme nedeniyle deprem ivmelerinin bazı zemin tabakalarında uğradığı frekans değişimlerinin çeşitli bölgelerde belirsizlik yaratması ve büyük hasarlara sebep olması nedeniyle hem dünyada hem de ülkemizde çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, Idriss ve Seed (1968) yılında yapmış oldukları araştırmada deprem bölgelerinde biribirine yakın bölgelerde yüzey ivmelerinde büyük farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Ölçüm istasyonlarının yer aldığı zemin tabakalarının bu farklılıkta önemli olduğu belirlenmiştir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi ile yapılan bölgesel çalışmalar ile deprem bölgelerinde değerlendirmelerde bulunulmuştur. Benzer çalışma Güllü (2001), tarafından Dinar ilçesinde yapılmış arazi deneyleri ve dinamik davranış analizi ile zemin büyütme etkisi incelenmiştir.

Tezcan vd. (2002) yılında Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda etkilenecek bir diğer merkez olan İstanbul Avcılar'da farklı dalga büyüklükleri ile yapmış oldukları çalışmada hakim periyotlar belirlenmiş ve zemin büyütmesi etkisi ile yüksek periyotlarda binalarda hasarların oluştuğu görülmüştür. Ulusay ve Aydan (2005) yılında yaptıkları çalışmada 2003 yılında meydana gelen Bingöl (M:6.4) depreminde bölgenin zemin karakterisitikleri belirlenmiş ve zemin büyütme etkisi ile yapılarda büyük hasarların meydana geldiği belirlenmiştir. Beliceli (2006) yılında yerel zemin koşullarının Eskişehir yerleşim yerinde değişiminin incelenerek hasar etkisinin belirlenmesi amacıyla jeolojik gözlemlerin, jeofizik ölçümlerin ve jeoteknik deneylerin değerlendirilmesi yapılarak bölgedeki zemin büyütme değişimi araştırılmıştır. Civelek (2021) Eskişehir ilinde yapılan çalışmada bölgesel zemin bilgileri ile eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin büyütma analizleri yapılmıştır.

Fırat vd. (2016) yılında yapmış olduğu çalışmada Adapazarı bölgesinde zemin büyütme faktörlerini araştırmıştır. Bölgeden elde etmiş oldukları verileri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Eurocode 8 ile karşılaştırmış ve değerlendirmelerde

bulunmuşlardır.

Zeminlerin dinamik parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesinde farklı deformasyon seviyeleri için farklı dinamik deneyler kullanılmaktadır. Araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan Rezonant kolon (RC) ve Dinamik üç eksenli (TRX) deneyleri bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

RC deneyleri üzerine yapılan çalışmalarda, Saxena ve Reddy (1989) yaptıkları çalışmada rezonant kolon deney sistemi ile Monterey kumu kullanarak kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri elde edilmiştir. Young modülü ve poisson oranı ile kayma modülü ve sönümleme değeri arasında formülasyon önerilmiştir. Dutta vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada kil numuneler üzerinde rezonant kolon deney sistemi ile dinamik özellikleri belirlenmiştir. Doygunluğun kayma modülüne etkisi ve poisson oranının dinamik parametrelere etkisi incelenmiştir. Li ve Senetakis (2018) kum numuneler üzerinde yapmış oldukları rezonant kolon deneyleri ile yapılan hesaplamalar sonucunda referans model ile deney sonuçları karşılaştırılarak yeni parametreler kullanılarak model önerilmiştir.

Morsy vd. (2019) kum numuneler üzerinde farklı sıkılık, doygunluk koşulları ve çevre basıncı altında rezonant kolon deneyleri yapılmış ve numunelerin kayma modülü ve sönümleme oranı değerleri elde edilmiştir. Farklı kumların dinamik özellikleri ve diğer karşılaştırmalarda bulunulmuştur.

TRX deney sistemleri ile yapılan çalışmalar incelendiğinde, Kokusho (1980) yılında yapmış olduğu çalışmada dinamik üç eksenli deney sisteminde Toyoura kumu ile yapılan farklı boşluk oranı ile deneyler yapılmıştır. Diğer çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılmış ve poisson oranı ile ilgili öneride bulunulmuştur.

Kumar vd. (2017),dinamik üç eksenli deney sisteminde kum numunesinin dinamik özelliklerinin değerlendirildiği bir çalışma yapılmıştır. Farklı sıkılık ve çevre basıncında yapılan deneylerde literatürdeki referans modeller ile karşılaştırmalarda ve

değerlendirmelerde bulunulmuştur.

RC ve TRX deney sistemlerinin beraber kullanıldığı çalışmalarda, Khan vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deney sistemleri kullanılarak kum numunelerde farklı oranlarda bentonit katılarak kayma modülü değerleri incelenmiştir. El Mohtar vd. (2013) farklı sıkılıkta hazırlanan ve farklı oranlarda bentonit katkısı ile deneyler yapılmıştır. Aynı şartlar farklı çevre basınçlarında da drenajlı ve drenajsız olarak deneylere tabi tutulmuş ve katkının etkisi araştırılmıştır. Bayat ve Ghalandarzadeh (2017) farklı kum ve çakıl oranlarında, farklı sıkılık ve boşluk oranlarında yapılan rezonant kolon, bender ve dinamik üç eksenli deney sistemleri kullanılmıştır. Farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde her bir etkinin dinamik parametrelere olan etkisi incelenmiştir. Banerjee ve Balaji (2018) Chennai Marine kili üzerine RC ve TRX deneyleri yapılmıştır. Araştırmada gerilme oranı ile dinamik parametreler arasında bağıntı kurulmuştur.

Sobolev ve Martirosyan (2018) yaptıkları çalışmada kum ve kil numunelerin dinamik özellikleri laboratuvarda dinamik üç eksenli ve rezonant kolon, torsional deney sistemleri ile belirlenmiştir. Ardından sonlu elamanlar programı ile analizler yapılmıştır. Pistolas vd. (2018) kum ve çakıl numuneler ile kauçuk malzeme üzerinde dinamik üç eksenli ve rezonant kolon deneyleri ile çalışma yapmışlardır. Elde edilen veriler referans modeller ile karşılaştırılmıştır.

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinin sahaya özel analizlerde önemli olması, araştırmacıları zeminlerin dinamik davranışını araştırmaya yöneltmiştir. Ancak bu yöntemde kullanılan deney sistemlerine yeteri kadar ulaşılamaması, zaman alıcı olması ve maliyetli olması nedeniyle zeminlerin belirlenen bazı parametreleri yardımıyla kullanılan ve dinamik kayma modülü ve sönümleme oranı değerleri için referans olabilecek modeller önermişlerdir. Bu modeller ile araştırmacılar pratik bir şekilde zeminlerin dinamik özellikleri için elde etmiş oldukları verilerin doğruluğu hakkında bilgi sahibi olmaktadırlar. Bu kapsamda hem literatürde yaygın olarak kullanılan hem de bu çalışmada da referans olarak alınan Vucetic ve Dobry (1991), Darendeli (2001) ve Amir-Faryar vd. (2016) modelleri

tanıtılmaktadır.

Vucetic ve Dobry (1991), yaptıkları çalışmada suya doygun zeminlerin gerilme-şekil değiştirme döngülerinde plastisite indisi (PI) etkisini incelemişlerdir. PI etkisinin zeminlerin kayma modülü azalım eğrisi ve sönümleme eğrisi üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. 16 farklı çalışmada kullanılan deneysel veriler kullanılmıştır. Burada normal ve aşırı konsolide killer (OCR=1-15) ve kumlar kullanılmıştır. PI artması ile kayma modül azalım değeri (G/G_{maks}) artmaktadır.

Darendeli (2001) yılında yapmış olduğu doktora tez çalışmasında 20 farklı nokta ve farklı derinliklerden alınan örselenmemiş numuneler ile dinamik deneyler yapmıştır. Proje kapsamında alınan numuneler rezonant kolon ve torsional deneylerine tabi tutulmuştur. İki deney sonucu birleştirilerek çevre basıncı etkisi, aşırı konsolide oranı etkisi ve frekans etkisi kısımları incelenmiştir. Yapılan istatistiksel çalışma sonucunda zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde referans model önerilmiştir.

Amir-Faryar vd. (2016) çalışmada iki farklı zemin türü için kayma modülü-birim şekil değiştirme ve sönümleme oranı değerleri için model önerisinde bulunmuşlardır. Literatürde bulunan referans modeller ile yapılan nümerik analizler sonucunda kum, kil ve fiber karışımlı olarak zeminlerin davranışını gösteren modeller önermişlerdir.

Sahaya özel analizlerde, çalışma bölgesinin zemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi kadar yapılacak olan analiz yöntemi de önemlidir. Bu analizlerde kullanılacak olan deprem ivme kayıtlarının ölçeklendirme yöntemi de analizleri etkilemektedir. Bu analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumlarının belirlenmesi ve yüzeyde oluşacak ivme kayıtlarının elde edilmesi gerekmektedir. Yüzeyde oluşan ivme spektrumları deprem özelliklerini yansıtan ve yapıların tasarımlarında kullanılan önemli bir parametredir (Ansal vd. 2011).

Yapılan analizlerden elde edilen veriler yönetmeliklerin önermiş olduğu yüzey tepki

spektrumları ile değerlendirilmektedir. Depremler nedeniyle yapılarda meydana gelen hasarların azaltılması ve depreme karşı güvenilir yapıların inşa edilmesi için, zemin tabakalarının sismik yükler altında davranışının belirlenmesi ve uygun üst yapı tasarımının yapılması gerekmektedir.

Yer hareketlerinin belirlenmesi için deprem yönetmeliklerinde belirtilen tasarım spektrum değerleri kullanılmaktadır. Bu değerler ile yapıların doğal titreşim periyotları dikkate alınmakta, yapıya etkiyecek yatay ve düşey yükler belirlenmektedir. Tasarım spektrumları, sahanın sismik özelliklerini ve zemin koşullarını dikkate alarak farklı deprem kuvvetlerine verdiği tepkinin maksimum değerlerinden oluşur. Yönetmeliklerin sundukları tasarım spektrumları zeminin kum-kil davranış özelliklerini göz önünde bulundurmadan salt kayma dalgası hızı, düzeltilmiş SPT vuruş sayısı ve drenajsız kayma dayanıma bağlı zemini sınıflandırarak noktasal olarak üretilmektedir. Bu çalışmalar ile 2019 yılında yürürlüğe giren TBDY 2018 in performansını değerlendirmek için günümüzde çalışmalar devam etmekte ve geliştirilmeye çalışılmaktadır (Afacan ve Güler, 2019; Başaran, 2018; Keskin ve Bozdoğan, 2018; Koçer vd., 2018)

Okur (2002) yılında yapmış olduğu çalışmada, ince daneli zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışını farklı dinamik gerilme genliklerinde incelenmiştir. Boşluk oranı, efektif çevre basıncı ve diğer faktörlerde göz önüne alınarak maksimum dinamik kayma modülü için çeşitli ampirik bağıntılar geliştirmiştir. Ayrıca plastisite indisinin suya doygun ince daneli zeminlerde önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Boşluk suyu basınçlarının oluşmadığı bölgede, ince daneli zeminlerde, çevrim sayısı artsa bile deformasyonların meydana gelmediği belirlenmiş ve PI ile ilgili kolerasyonlar önerilmiştir.

Andrus vd. (2003) yılında yapmış oldukları çalışmada Güney Karolina bölgesinde SPT ve CPT deney sonuçları ile kayma dalgası hızı tahmininde bulunmuş ardından laboratuvarda 122 numune üzerinde rezonant kolon ve torsional deneylerini yapmışlarıdır. Yapılan deneylerin ardından çevre basıncı, PI etkisi ile kayma modlü arasında eşitlik oluşturmuşlardır.

Yalçınkaya ve Alptekin (2003) Dinar ilçesinde 1995 yılında meydana gelen deprem sonucunda 5 adet istasyonda kaydedilen veriler kullanılarak a Klasik Spektral Oran ve Yatay/Düfley Spektral Oran hesaplanmış ve aralarında 2-3 kat fark olduğu belirlenmiştir. Dinar Ovası içerisinde yer alan zeminlerde 8 kata varan zemin büyütme etkisi belirlenmiştir. İlçede hasar gören 4-5 katlı binaların doğal titreşim periyodu ile çakıştığı belirlenmiştir. Bölgedeki hasarlarda zemin büyütmeleri ve rezonans etkisinin önemli rol oynadığı görülmüştür.

Roblee ve Chiou (2004) çalışmasında, 28 farklı alanda 154 numune ile zeminlerin dinamik özelliklerini yansıtan bir model önermişlerdir. RCTS deney sonuçları, rezonant kolon ve torsional deney sistemi ile karşılaştırılmıştır. Ardından çevre basıncının etkisi araştırılmış ve kayma modülü hakkında bir trend oluşturulmuştur. Önerilen model ile Darendeli (2001) modeli karşılaştırılmıştır.

İnce (2005) yılında yapmış olduğu çalışmada İstanbul ilinde 125 adet sondaj bilgisine dayalı zemin büyütmesi, şev stabilitesi ve sıvılaşma tehlikesi analizlerini yapmıştır. Çalışma bölgesinin 250m*250m boyutlarında hücrelere ayrılması ile Coğrafi Bilgi Sistemi ile mikrobölgeleme yapılmıştır.

Kale (2008), tarafından yapılan çalışmada İstanbul ili Zeytinburnu ilçesindeki yüzey hareketlerinde meydana gelen değişim hem 1B boyutunda hem de 2B boyutunda incelenmiştir. Farklı analiz programları kullanılarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Zemin yüzeyinde oluşan yer hareketi özelliklerinin yerel zemin koşulları ve arazi topografyası ile değiştiği belirlenmiştir.

Tönük (2009), literatürde yer alan zemin davranış analizleri incelenmiş ve çalışmalarda analizlere yöntemlerin, deprem kayıtlarının, doğrusal olmayan analizler üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Geliştirmiş olduğu yöntem ile olasılıksal deprem tehlike analizine dayanan sahaya özel araştırmalara yönelik zemin yüzeyinde deprem özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir.

Mohammad Hosseini vd. (2010), tarafından yapılan çalışmada 1B boyutunda eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Zeminin doğrusal olmayan analizleri incelendiğinde, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin farklı büyütme faktörlerinin olduğu belirlenmiştir. Analizler üzerindeki farklılıkların etkileri incelenilerek sahaya özel analizlerin zemin davranış analizlerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

İyisan ve Haşal (2011) yaptıkları çalışmada zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla yüksek plastisiteli kil ve siltli kum tabakasının olması durumu için, altı anakaya depremi kullanılarak bir (1D) ve iki boyutlu (2D) dinamik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yüzeyde 19 farklı deprem için yüzeyde ivme-zaman ve ivme-spektrum grafiklerini oluşturmuşlardır. Anakaya üzerinde yer alan zeminin kum olması halinde yüzeyde yaklaşık 2 kat, kil olması durumunda ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Farklı programlar kullanılarak 1D ve 2D boyutunda analizler yapılmıştır.

Kaptan ve Tezcan (2012) çalışmada zemin büyütme etkisinin öneminden bahsederek İzmir ilinde yumuşak zemin üzerinde bulunan 3 ayrı yapı hakkında bilgiler verilmiş ve zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda zeminin 6.7 kat anakayadaki ivmeyi büyüttüğü ve yerel zemin koşulları göz önüne alınarak yapılacak zemin büyültme analizleri sonunda belirlenecek özel ivme spektrumlarının tasarımlarda kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Afacan (2014) yaptığı çalışmada, kil numuneleri üzerinde yapmış olduğu santrifüj deneylerini geniş bir gerilme aralığında yapmış, farklı deprem kayıtları ile analizler yapılmıştır. Çalışmada deprem kayıtlarının ölçeklendirilerek bir boyutlu analizleri yapılmıştır. Çalışmada T:1.0 sn'den daha düşük periyotlarda doğrusal olmayan davranışın daha etkili olduğu, ancak uzun periyotlarda doğrusal davranışın etkisinin daha büyük olduğunu belirlemiştir.

Sönmezer vd. (2015) Kırıkkale ilinde yaptıkları çalışmada 107 sondaj, 15 sismik kırılma ve 6 aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemi (MASW) verisinden eşdeğer doğrusal analiz yöntemiyle tek boyutlu sismik tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler

sonucunda bölgenin en büyük yer ivmesi, zemin büyütmesi ve zemin hakim periyotları değerlendirilerek haritalanmıştır.

Fırat ve Demir (2016), Adapazarı bölgesinde yaptıkları çalışma ile yerel zemin koşullarının kuvvetli deprem hareketlerini büyütme etkisinin hangi boyutta olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ile belirlenen zemin davranış spektrumları farklı yönetmelikler ile mukayese edildiğinde, tasarım spektrumlarının dışında yer aldığını, zemin yüzeylerindeki pik yer ivmesi değerlerinin zemin alt tabakasındaki değerlerden büyük olduğunu ve zeminlerin lineer olmayan özelliklerinden dolayı küçük frekanslarda büyük zemin büyütmesi, büyük frekanslarda ise daha küçük büyütmelerin olduğunu gösterdiği belirlenmiştir.

Ateş (2016) çalışmasında 1999 Düzce depreminde meydana gelen yapı-zemin rezonans etkisi ile oluşan hasarların incelenmesini araştırmıştır. Yapılan araştırma sonucunda bölgenin standart penetrasyon testi (SPT)-N darbe sayısı, kesme dalgası hızı (V_s), zemin büyütme katsayısı ve zemin hâkim titreşim periyodu olarak elde edilen veriler ile bölgedeki yapıların kat yüksekliği ile ilişkisi incelenmiştir.

Afacan vd. (2019) çalışmasında santrifüj deneyleri ile elde edilen veriler doğrultusunda model geliştirmiş ve yumuşak kil tabakalarında bir boyutlu yer tepki parametrelerini belirlemişlerdir. Bu kapsamda hız düzeltmeli drenajsız kayma dayanım parametresi kullanarak hem EL ve NL analizleri yapılmıştır. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, PGA değerlerinde eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarının doğrusal olmayan analiz sonuçlarından yaklaşık 2 kat artış olduğu belirlenmiş, bu nedenle büyük gerilme koşullarında eşdeğer doğrusal yöntem ile doğrusal olmayan modellemeyi önermişlerdir.

Sönmezer vd. (2019)'da ise Elazığ ilinin belirlenen zemin dinamik özelliklerinin ardından 1 boyutlu eşdeğer lineer zemin analiz ile yüzey tepkileri hesaplanmış ve yönetmelikler ile değerlendirilmiş ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak haritalandırma yapılmıştır. Sönmezer ve Çeliker (2020) yaptıkları çalışmada, Kuzey

Anadolu Fay Hattı ve Doğu Anadolu Fay hattı keşisiminde bulunan Karlıova (Bingöl)'de eşdeğer lineer zemin tepki analizi yapılmıştır. Bölgeden alınan veriler ile TBDY ve Eurocode 8 önerdiği yüzey tepki spektrumları karşılaştırılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Ildır vd. (2020) yaptıkları çalışmada sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zeminlerde zemin büyütme faktörleri incelenmiştir. Adapazarı ilçesinde incelenen zeminde Flac 2D programı ile yapılan analizlerde zemin büyütme etkisi görülmüş, düşey ve yatay ivme değişimleri olduğu belirlenmiştir.

Uyanık vd. (2021) depremde meydana gelen pik yatay yer ivme değeri tahmin etmişlerdir. 152 adet deprem kaydından dinamik parametreleri elde edilmiş ve veri tabanı oluşturulmuştur. Çalışmada geliştirilen deneysel azalım ilişkisi, literatürdeki diğer deneysel ilişkiler ile karşılaştırılmıştır.

Bilican vd. (2021) çalışmalarında tek boyutlu zemin büyütme analizlerinde kullanılmak üzere Transfer fonksiyonlarının elde edilmesi için bir yöntem önermişlerdir. Literatürde zemin hâkim periyodunun bulunması için kullanılan yöntem transfer fonksiyonlarının bulunması için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar iki örnek üzerinde değerlendirilmiştir.

Yavuzoğlu vd. (2021) çalışmada zemin büyütmesinin kaynak, sismik ışının izlediği yol, topografya, soğrulma ve dispersiyon etkilerinden etkilendiği ve zemin büyütme etkisinin temel topografyasının, soğrulma ve dispersiyonun yüzey dalgası üzerindeki etkileri belirlenerek 3 boyutlu modellemesi yapılmıştır.

3. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışına vermiş oldukları tepki nedeniyle, depremlerin yapılarda meydana getirdiği hasar seviyeleri değişmektedir. Zemin davranışının sahaya özel belirlenmesi ve bu dinamik zemin parametrelerinin yapı tasarımında kullanılması önem arz etmektedir.

Depremlerin belirli bir bölgedeki etkilerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi ile yer hareketinin tanımlanması gerekmektedir. Yer hareketi, tanım olarak insanları ve çevresini etkileyecek güce sahip olan harekettir. Yer hareketini mühendislik açısından özelliklerini tanımlamak ve bu özellikleri yansıtan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

3.1.Yer Hareketi Parametreleri

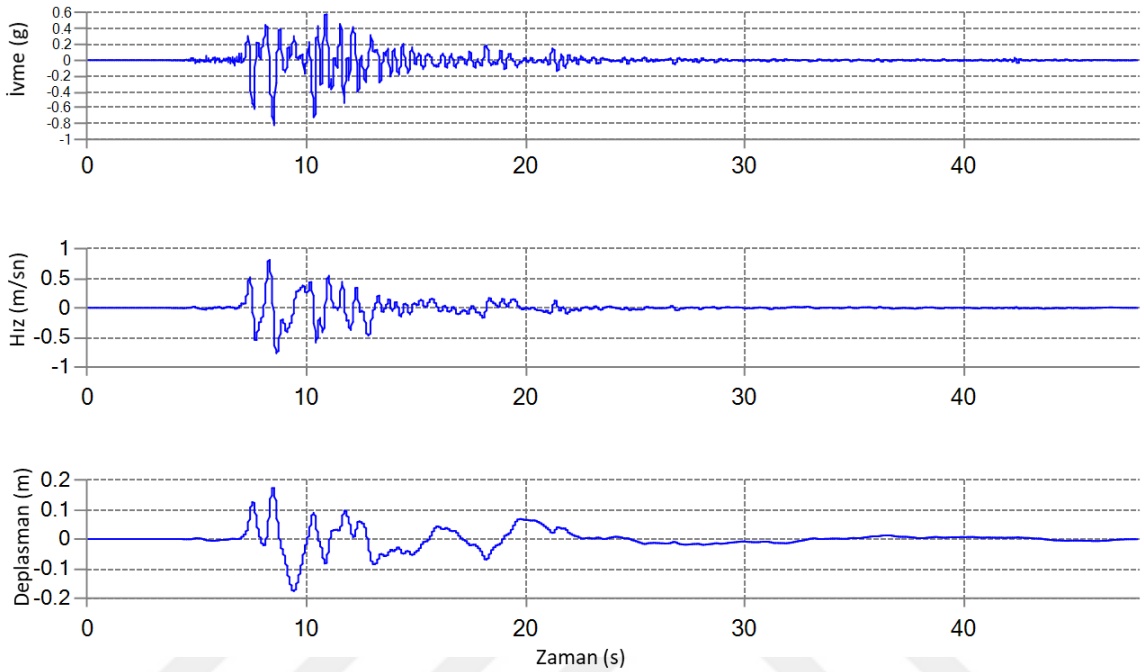
Yer hareketi nedeniyle oluşan depremlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve zeminlerin davraşının bu parametreler üzerinden değerlendirilmesi gerekmektedir. Yer hareketini genlik, frekans içeriği ve süresi olarak üç özellikten faydalanılmaktadır. Bu parametreler, deprem hareketinin önemli özellikleri olan genlik, frekans içeriği ve süredir (Kramer, 1996).

3.1.1. Genlik Parametreleri

Periyodik bir harekette maksimum düzeye genlik denir. Yer hareketinin tanımlanması ise zaman tanım alanında yapılmaktadır. Meydana gelen hareketteki parametreler ivme, hız ve yer değiştirmedir. Burada sadece ivme kaydı alınarak ölçüm yapılmaktadır. Diğer iki parametreye ise integral ve/veya türev yardımıyla geçiş yapılmaktadır (Kramer, 1996).

Deprem kayıt istasyonlarında kaydedilen ivme-zaman grafikleri ve buna bağlı olarak

elde edilen hız, yer değiştirme-zaman grafiklerine örnek olarak Kobe depremine ait grafikler Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



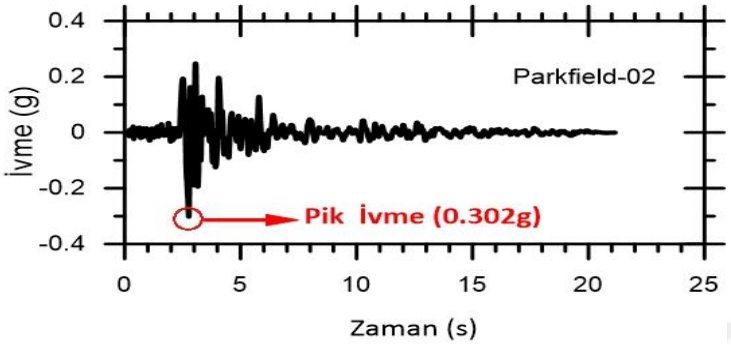
Şekil 3.1. Kobe depremine ait ivme-hız-yer değiştirme grafikleri

3.1.1.1.Pik İvme

Depremin genliğini belirlemek için kullanılan ölçüt pik yatay yer ivmesidie. Bu değer akselerogramdaki yatay ivmenin mutlak değerinden en büyüğüdür.

Yer hareketini tanımlamak amacıyla yatay hareket kullanılmaktadır. Düşey ivmeler yatay ivmelere göre fazla ilgi görmemiştir. Çünkü yer çekimin etkisi ile statik düşey kuvvetlerin deprem anında emniyetinin yüksek olmasıdır. Pik ivme değeri, deprem hakkında önemli bir parametre olsa da, yer hareketinin frekans içeriği ve süresi hakkında bilgi içermemektedir.

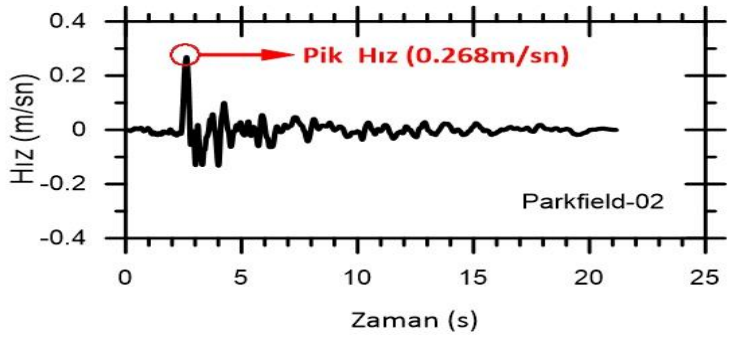
Yüksek pik ivmeye sahip yer hareketi çoğu zaman düşük pik ivmeli hareketten daha yıkıcı olmaktadır. Pik ivmenin büyüklüğü kadar süreside önemlidir (Kramer, 1996). Parkfield-02 depremine ait pik ivme değeri 0.302g Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Pik ivmenin gösterimi

3.1.1.2.Pik Hız

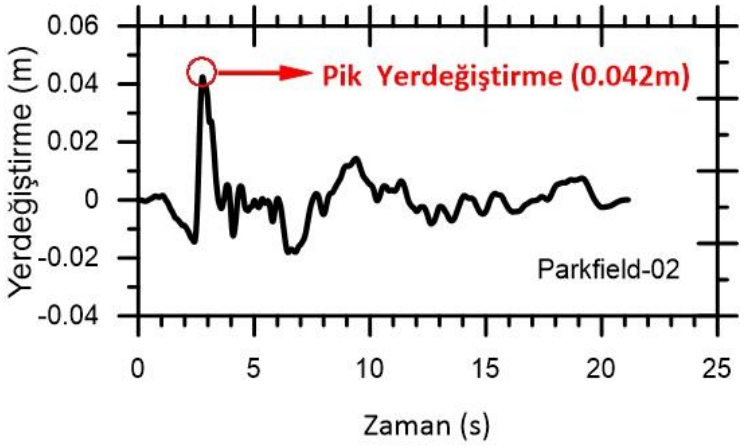
Yer hareketinin tanımlanmasında diğer önemli parametrelerinden birisi de pik yatay hızdır. Orta frekanslardaki yer hareketinin genliği doğru bir şekilde tanımlamak için pik ivme değerine göre ğik hız değeri daha iyi olmaktadır. Orta frekans aralığında yüklemeye uğrayan, yüksek ve esnek yapılar, köprüler vb. tesisler oluşabilecek hasarları belirlemede pik hız değerleri daha iyi sonuç vermektedir. Parkfiled 02 depremine ait pik hız değeri Şekl 3.3'te gösterilmiştir (Kramer, 1996).



Şekil 3.3. Pik hız değerinin gösterimi

3.1.1.3.Pik Yerdeğiştirme

Yer hareketinin düşük frekansa sahip faktörleri ile pik yerdeğiştirmeler ilişkilidir. Yerdeğiştirme, diğer yer hareketi parametreleri olan pik ivme ve pik hız değerlerine göre daha az kullanılmaktadır. Parkfield 02 depremine ait pik yerdeğiştirme değeri Şekil 3.4'te gösterilmiştir (Kramer, 1996).



Şekil 3.4. Pik yerdeğiştirme değerinin gösterimi

3.1.2. Frekans İçeriği Parametreleri

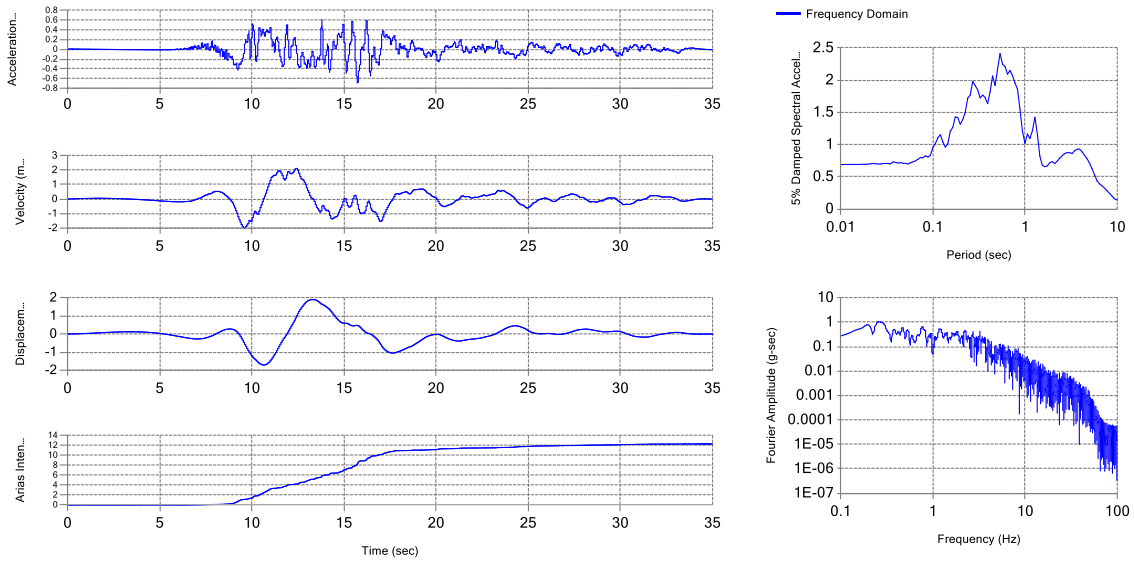
Frekans içeriği, bir yer hareketi genliğinin değişik frekanslar arasında nasıl dağıldığını tanımlamaktadır. Depremler çok geniş bir frekans aralığında dağılım göstermektedir. Depremlerin frekans içeriği o hareketin etkisinde çok büyük yer tutmaktadır. Bu nedenle hareketin özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir.

3.1.2.1. Yer Hareketi Spektrumu

Fourier spektrumu, harmonik bir hareketin frekans, genlik ve fazdaki terimlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Periyodik bir fonksiyon olarak x(t) Fourier serisi kullanılarak şu şekilde ifade edilir;

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \emptyset_n) \qquad (3.1)$$

Fourier genlik spektrumu, bir yer hareketinin genliğinin frekansa göre dağılımını göstermektedir. Genlik spektrumu dar (hareketin düz ve yaklaşık sinüsoidal) veya geniş olabilmektedir. Geniş spektrum ise daha çok değişik frekanslar içeren ve girintili-çıkıntılı, zamana göore sürekli değişen hareket olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996). Kocaeli depremine ait Fourier genlik spektrumu Şekil 3.5'da gösterilmiştir.

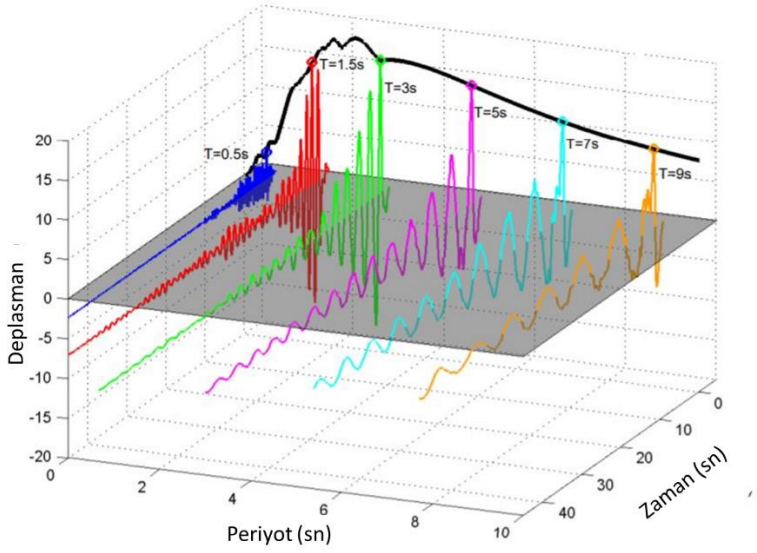


Şekil 3.5. Kocaeli depremine ait Fourier genlik spektrumu ve diğer bilgiler

Tepki spektrumları ise mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek dereceli serbestlikli (TDS), doğal frekans ile TDS sistemin bir sönümleme oranının bir fonksiyonu olarak belirli bir harekete verdiği maksimum tepki olarak tanımlanmaktadır.

Tasarım spektrumları, yeni yapıların tasarımında kullanılacak deprem yükünü belirlemekte kullanılır. Güvenli yapıların tasarımında kullanılan bu parametrelerden yapıya zeminden gelen kuvvet ivme maksimumu spektral ivme "Sa" ile belirlenmektedir. Yapıya gelen maksimum enerjiyi ise spektral hız "Sv", yapı içinde oluşabilecek gerilmeler ise

spektral yer değiştirme “Sd” ile ifade edilmektedir. Palm spring kaydına ait lineer yer değiştirme spektrumu örneği Şekil 3.6’de gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Palm Spring kaydına ait spektrum kayıtları (Hachem, 2004).

3.1.2.2. Spektral Parametreler

Yer hareketlerinin yapılar üzerinde etkisi incelenirken, tepki spektrumlarının yanında ek bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Her spektrumdan bilgilerin alınması ve yorumlanması amacıyla spektral parametreler öne sürülmektedir. Bunlar spektrumların karmaşık fonskiyon olması nedeniyle tanımlanmasında yardımcı olmaktadır. Bu parametrelerden birisi de baskın periyottur.

Baskın periyod, yer hareketinin frekans ile ilgili bilgi veren tek parametre baskın periyottur. Bu periyod (T_p), Fourier genlik spektrumunda en büyük değere karşılık gelen titreşim periyodu olarak tanımlanmaktadır. Baskın periyod, genellikle düzleştirilmiş spektrumdan elde edilerek istenmeyen pik durumların etkisinden kaçınılmaktadır. Farklı frekans içeriğine sahiğ yer hareketleri incelendiğinde aynı baskın periyotlara sahip olabileceği görülebilir (Kramer, 1996).

3.1.3. Süre

Depremlerin yani kuvvetli bir yer hareketinin süresi, bir fayda biriken enerjinin boşalması için gereken zamanla ile ilgilidir. Bu sürenin uzun olması depremlerin neden olduğu hasarları artırmaktadır.

Faylarda meydana gelen yırtılmanın uzunluğu/alanı büyüdükçe meydana gelen yer hareketinin de süresi o kadar uzamaktadır. Depremlerin frekans özelliklerine göre incelendiğinde, kısa süreli yüksek genlikli depremler yıkıcı etkiler oluşturmayabilirken, düşük genlikli fakat yüksek süreli depremler yıkıcı hasarlara neden olabilir. Bu da depremin süresinin de önemli etkenlerden biri olduğunu göstermektedir. Deprem bölgelerinde zeminlerin yapısı, yer altı suyu seviyesi ve yapıların kalitesi de bu yükleme sürelerinden etkilenerek yapılardaki hasarın artmasına neden olmaktadır (Kramer, 1996).

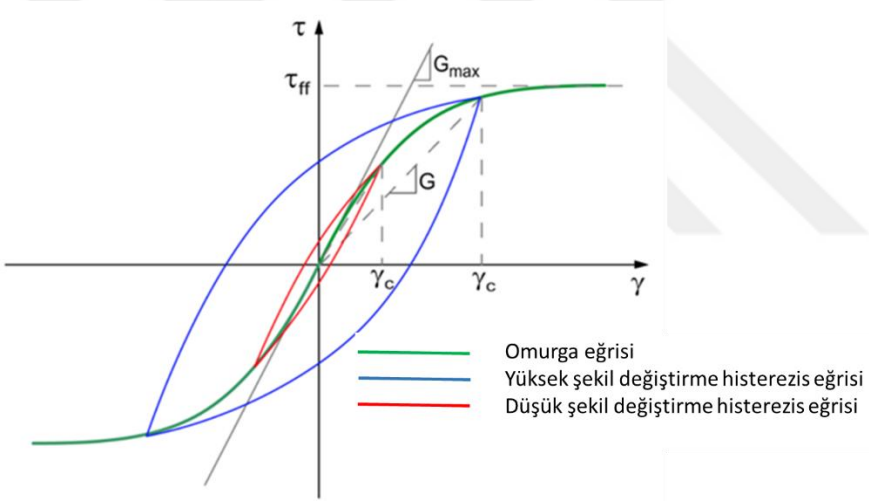
3.2. Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Parametreler

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi geoteknik mühendisleri için büyük önem arz etmektedir. Depremler nedeniyle zeminlerin gerilme-deformasyon ve mukavemet özellikleri değişmektedir. Meydana gelen deformasyonlar sonucunda yapılarda büyük hasarlar meydana gelmektedir. Deprem bölgelerinde yapılacak olan yapıların tasarımlarında zemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi önemlidir. Bu parametrelerin belirlenmesi ve tasarımlarda kullanılması deprem anında meydana gelebilecek hasarların azaltılmasını sağlamaktadır. Zeminlerin sahaya özel yapılacak analizlerinde göstereceği davranışın belirlenmesi açısından kayma modülü ve sönümleme eğrisi değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Sahaya özgü belirlenecek olan tasarım davranış spektrumu ile yer yüzeyi hareketlerinin ve tekrarlı yükler altında zeminlerin göstereceği gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

3.2.1.Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Zeminlere uygulanan tekrarlı yükler sonucunda bir histerezis döngüsü meydana gelir. Zeminlerin tekrarlanan yükler altındaki davranışını anlamak için iki ana özellik vardır: 1) geniş bir aralıkta gerilme-şekil değiştirme davranışı 2) zemin rijitliği. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özellikleri, farklı birim kayma deformasyon seviyeleri için tekrarlı yükleme nedeniyle kayma modülü ve sönüm oranı değerlerindeki değişiklikler olarak tanımlanır. Dinamik yüklemenin bir sonucu olarak, zemin numunesinin gerilme-şekil değiştirme davranış değişikliğini gösteren geleneksel bir döngü Şekil 3.7'de (Stewart vd., 2014) sunulmaktadır ve temel olarak 'histerezis döngüsü' olarak adlandırılır. Bu döngüler bir araya gelerek omurga eğrisini oluşturur (Güler ve Afacan 2021).



Şekil 3.7. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Stewart vd., 2014)

Belirli bir kayma geriniminde sekant kayma modülü veya kayma modülü, kayma gerilmesi-şekil değiştirme döngüsünün eğimi alınarak hesaplanabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

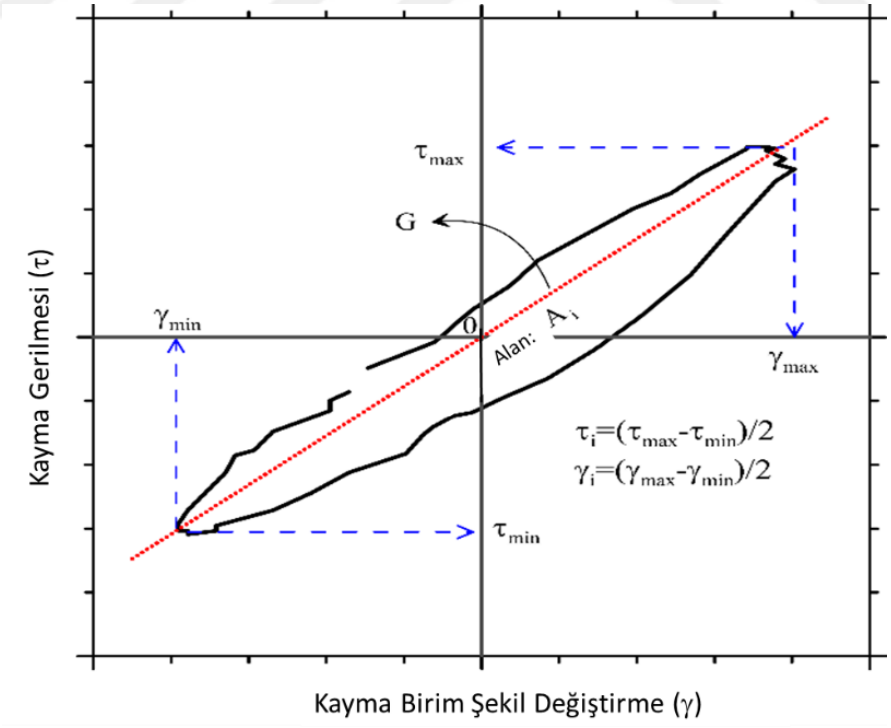
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{3.2}$$

Zeminin maksimum rijitliğini tanımlayan maksimum dinamik kayma modülü, bu

deformasyon seviyelerinde bu eğimin elde edilmesi zor olduğundan, arazi deneylerinden elde edilen kayma dalgası hızı, zeminin hızına ve yoğunluğuna bağlı olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$G_{maks} = \rho V_s^2 \tag{3.3}$$

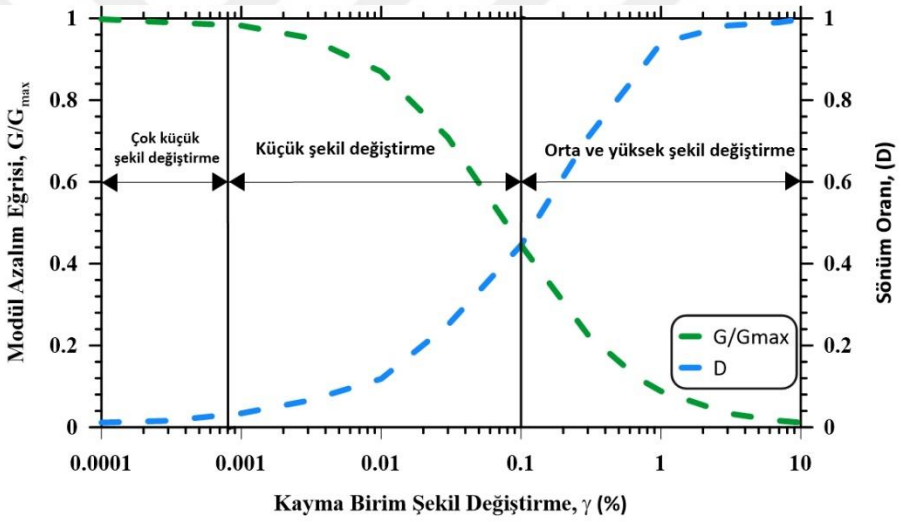
Zemine uygulanan tekrarlı yükler sonucunda harcanan enerji miktarı sönüm oranı olarak tanımlanır. Sönüm miktarı, D, gerilim-gerinim histerezisinden hesaplanır. Sönüm özellikleri, zeminin dalga yayılımı, deprem yükleri karşısındaki zemin davranışı gibi dinamik problemleri çözmek için kullanılır. Şekil 3.8, dinamik bir yükleme altında kaydedilen bir çevrimi göstermektedir. Belirli bir döngü için kaydedilen maksimum ve minimum kayma gerilmeleri ve kayma gerilmelerinin ortalaması sırasıyla τ_c ve γ_c olarak ifade edilir. Histerezis alanı ile eğri altında kalan alan hesaplanarak denklem 3'te gösterildiği gibi hesaplanabilir (Sobolev ve Ter-Martirosyan, 2018; Güler ve Afacan, 2019).



Şekil 3.8. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin sistematik gösterimi

3.3. Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Laboratuvar Deneyleri

Zeminlerin dinamik özeliklerinin belirlenmesinde farklı deney sistemleri kullanılmaktadır. Her bir deney sistemi farklı deformasyon seviyelerinde kayma modülü ve sönüm oranı değerlerini elde etmektedir. Bu kapsamda farklı deformasyon seviyelerinde kullanılan Bender Eleman Deneyi, Rezonant Kolon Deneyi (RC), Dinamik Üç Eksenli Deneyi (TRX), Tekrarlı Basit Kesme ve Burulma (Torsional) Deney Sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 3.9'da görüleceği üzere hem düşük hem de yüksek deformasyon seviyelerinde, kayma modülü azalım eğrisi ve sönüm eğrisi değerlerine bu deneyler ile ulaşılabilinmektedir.



Şekil 3.9. Modül azalım ve sönümleme eğrilerine bir örnek

Zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Bender Eleman deney sisteminde numune içerisine gönderilen dalga bir başlıktan diğer başlığa ulaşmaktadır (Şekil 3.10). Burada diğer başlık dalgayı elektrik sinyaline dönüştürülerek kayma dalgası hızı hesaplanmış olur. Bu değerden sonra kayma modülü değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 3.10. Bender eleman deney sistemi (Houbrechts vd. 2011)

Rezonant kolon deney sisteminde ise belirli bir çevre basıncında uygulanan burulma kuvveti uygulanmaktadır (Şekil 3.11). Numune baş kısmından uygulanan farklı frekans ve genliklerde dinamik tork ile numune burulur. Dalga yayılım teorisi uygulanarak bulunan rezonans frekans ile kayma dalgası hızı hesaplanmaktadır. Ardından kayma modülü değerine ulaşılmaktadır.



Şekil 3.11. Rezonant kolon deney sistemi



Şekil 3.12. Dinamik üç eksenli deney sistemi

Şekil 3.12'de görüldüğü üzere dinamik üç eksenli deney sisteminde çevre basıncı altındaki numuneye uygulanan deformasyon kontrollü yükleme ile gerilme-şekil değiştirme davranışı elde edilmekte ve buradan numunenin dinamik parametreleri hesaplanmaktadır.

Tekrarlı basit kesme deney sisteminde Silver ve Seed 1971, düşük gerilme genliği testleri için bir döngüsel basit kesme aparatı kullanmışlardır. Deney sistemi ile numunenin kayma gerilmesi-birim deformasyon ilişkisi çevrimsel olarak elde edilmektedir (Şekil 3.13).

Burulmalı (Torsional) deney sistemi Şekil 3.14'teki gibi silinir numunesinin başlık ile burulması sonucunda numune burulmaya maruz bırakılmaktadır. Yükleme frekansı kademeli olarak artırılarak maksimum deformasyon genliği bulunmaktadır.



Şekil 3.13. Tekrarlı kesme deneyi (Houbrechts vd. 2011)



Şekil 3.14. Burulma (Torsional) deney sistemi

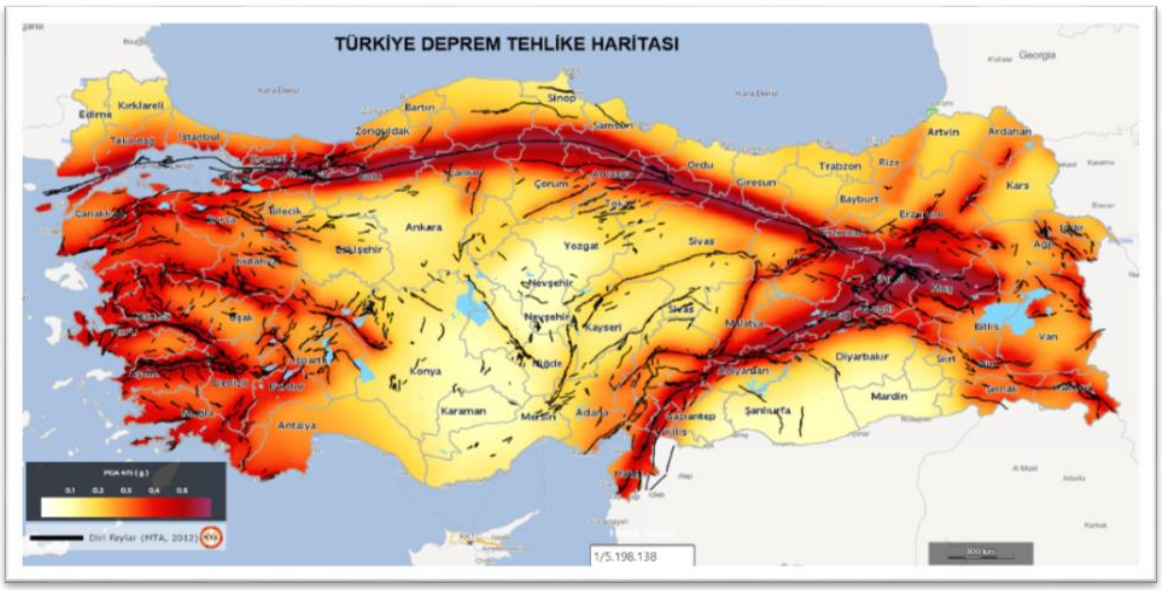
Bu çalışma kapsamında ise düşük deformasyon seviyelerinde (<%0.01) RC deney sistemi, yüksek deformasyon seviyelerinde ise TRX deney sistemi kullanılmıştır. Bu iki deney sisteminden elde edilen sonuçlar birleştirilerek zeminlerin dinamik parametreleri elde edilmiştir. Kullanılan deney sistemleri Bölüm 5.4'te detaylı olarak açıklanmıştır.

4. SAHAYA ÖZEL DİNAMİK ANALİZ

4.1. Sahaya Özel Zemin Davranışı ve TBDY 2018

Deprem etkisi altında bulunan bölgelerde yapılacak olan binalar için zeminlerin deprem performansı belirlenmelidir. Yerel zemin koşullarının tanımlanması ve yapısal tasarım için gerekli geoteknik parametrelerin belirlenerek raporlanması gerekmektedir.

Türkiye deprem yönetmeliği çalışmaları kapsamında yaşanan depremler ve bilgi birikimlerinin ardından yeni "Türkiye Deprem Tehlike Haritası" çıkarılmıştır (Şekil 4.1). Son olarak 2018 yılında yerel zemin koşullarının etkisinin daha da artırıldığı yeni yönetmelik yayınlanmıştır. 2019'dan itibaren güncel olarak kullanılan son yayınlanan TBDY (2018)'de, önceki yönetmeliklere göre özellikle sahaya özel yerel zemin sınıflarının belirlenmesi kısmı genişletilerek deprem yer hareketi spektrumlarının yapının bulunduğu konuma, faya uzaklığına ve zemin özelliklerine göre hesaplanması önerilmektedir.



Şekil 4.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2021).

Yönetmelik kapsamında yerel zemin sınıfları yenilenmiş ve tasarım ivme spektrumu değerleri bölgeye göre haritadan seçilme imkânı sunulmuştur. Yapıların tasarımında önemli olan bu parametreler yeni yönetmelikten elde edilmektedir. Geçmişten günümüze ülkemizin sürekli depremlere maruz kalması nedeniyle araştırmaların artması, teknolojik gelişmelerin yaşanması ile deprem yönetmelikleri revize edilmiştir. Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren TBDY 2018'e göre zeminler 6 sınıfa ayrılmıştır (Çizelge 4.1). Sınıfların belirlenmesinde $Vs_{,30}$, $N_{60,30}$ ve $cu_{,30}$ parametrelerine dayandırılmıştır. Yönetmelikte belirtilen değerlerde en zayıf zemin olan ZF sınıfı sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler olarak adlandırılmaktadır.

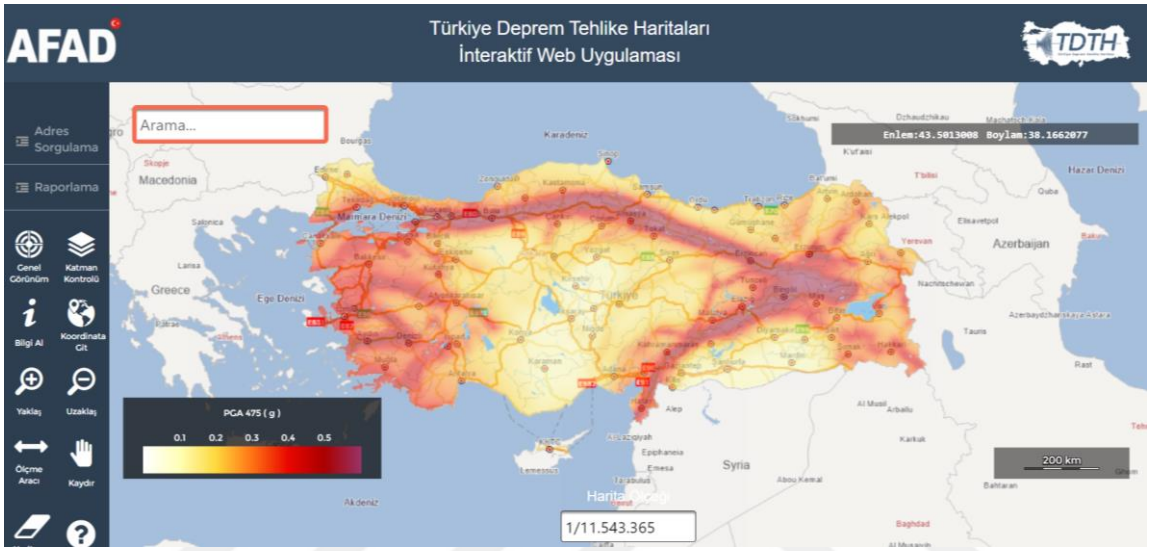
Çizelge 4.1. Yerel Zemin Sınıfları (TBDY,2018).

Yerel Zemin Sınıfı	**Zemin Cinsi**
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya PI > 20 ve w > % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (cu < 25 kPa) içeren profiller
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

Sahaya özel zemin davranış analizleri, taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinin zemin tabakaları boyunca değişimini ve zemin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere yapılır.

Tasarım spektrumları, analizlerde farklı deprem kayıtlarından elde edilen sismik

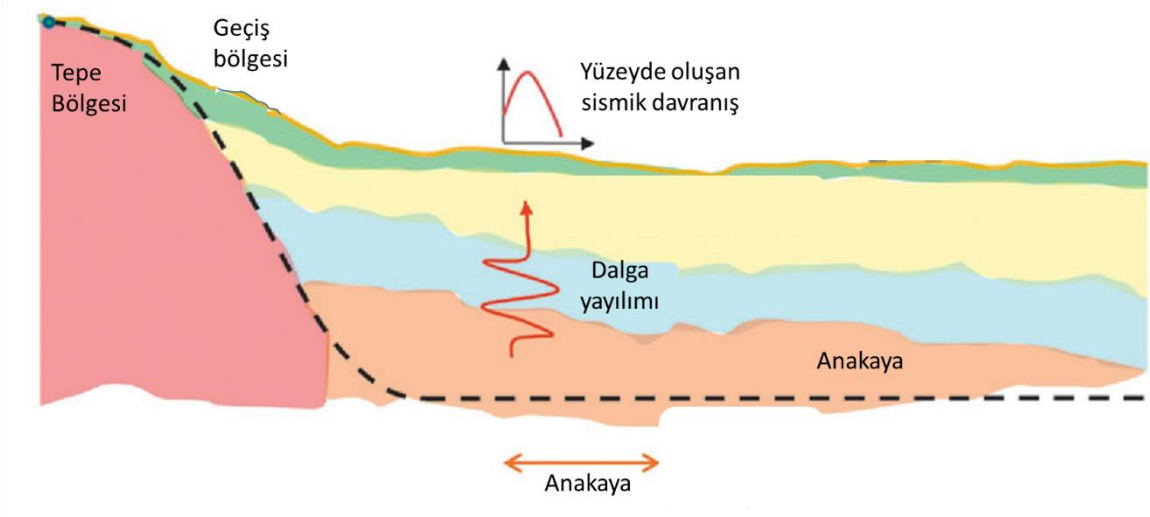
kayıtların dinamik karakteristiğini yansıtmaktadır. Her bölgeye ait tasarım spektrumu karakteristikleri AFAD'ın internet sitesinde Şekil 4.2'de görüleceği üzere "Türkiye Deprem Tehlikeleri Haritaları" üzerinden yerel olarak belirlenmiş ve kullanıcıya sunulmuştur. Bu interaktif uygulama farklı deprem düzeyleri ve zemin sınıfları için spektrum katsayılarını vermekle birlikte, spektrum zarflarını da hesaplanmış bir şekilde sunmaktadır.



Şekil 4.2.AFAD tarafından sunulan yerel tasarım spektrum ekranı (AFAD, 2021).

4.2. Zemin Büyütmesi ve Etkileyen Faktörler

Sahaya özel analizlerde deprem ivme kayıtlarının farklı noktalarda genliklerinde değişimler gözlenmiştir. Yerel zemin tabakalarının yüzeyinde oluşacak deprem özelliklerini belirleyebilmek amacıyla, yerel sismik tehlike bulguları ile uyumlu zemin büyütme analizleri yapılmaktadır. Sismik hareketler, farklı nedenlerle oluşarak ana kayadan yüzeye hareketinde yerel zemin koşullarından etkilenerek değişmekte, zemin cinsine ve dinamik özelliklerine bağlı olarak da sönümlenerek ya da büyüyerek yüzeye iletilmektedir. Zemin tabakalarından geçen deprem dalgalarının genliklerinde meydana gelen bu artış literatürde zemin büyütmesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.3) (Kaptan ve Tezcan, 2012; Ansal ve diğ., 2011; Horri ve Mousavi, 2019).



Şekil 4.3. Anakayadan deprem ivme kaydının tabaka boyunca değişimi (Garcia vd. 2013'den düzenlenmiştir.)

Deprem dalgaları anakayadan yüzeye doğru hareket ederken çeşitli tabakalardan geçerken yansıma ve kırılmalara maruz kalırlar. Yeryüzüne ulaşan ivmeler geldiği açılar ve katmanların özelliklerine göre farklılıklara maruz kalır. Tabakalar arasındaki empedans farklılıkları ivmelerin genliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Daha rijit tabakalardan daha yumuşak tabakalara geçen deprem dalgalarının genliklerinde büyüme meydana gelir.

Deprem anında zemin tabakaları içerisinde yayılan düşey S dalgası için sismik empedans (z), yoğunluk (ρ) ve dalga hızının (Vs) çarpımı ile elde edilir.

$$z = \rho V_s \tag{4.1}$$

Tabakaların yer yüzeyine yakınlaştıkça zeminlerin yoğunluğu ve dalga hızları daha küçülmektedir (Yalçınkaya, 2004). Yüzeye doğru yayılan enerji, enerjinin korunumu göz önüne alınarak değerlendirilirse sismik enerji;

$$E = \frac{1}{2}(\rho V_s)u(t) \tag{4.2}$$

ile ifade edilir. Burada yeryüzüne yaklaşırken azalan yoğunluk (ρ) ve kayma dalgası hızı (V_s) empedansın azalmasına neden olur. Enerjinin korunumu için u(t) kadar tanecik hızının artması gerekmektedir (Kramer, 1996).

Deprem dalgalarının taşıdıkları enerji basit harmonik bir dalga için incelendiğinde, enerji (E);

$$E = A^2 w^2 \rho V/2 \tag{4.3}$$

ile ifade edilir. Enerjiyi oluşturan dalga genliği (A), açısal frekans (w), yoğunluk (ρ) ve ortamın dalga hızı (V) ile belirlenir (Stein ve Wysession, 2003; Yalçınkaya 2010). Bu enerjinin yüzeye doğru hareketinde ne kadar büyütme olacağı ise (B);

$$B = \frac{1}{(1/\alpha) + (\pi/2)\xi} \tag{4.4}$$

formülü ile ifade edilir. Empedans oranı (α), sönüm oranı (ξ) değerlerine bağlı olan zemin büyütmesi, empedans oranının artması ile artarken sönüm oranı değerinin artması ile azalmaktadır. Bu iki değeri açıklayacak olursak;

$$\alpha = \frac{\rho_r v_r}{\rho_s v_s} \qquad \xi = \frac{\eta w}{2G} \tag{4.5}$$

ile ifade edilir. Burada ρ_r, V_r anakaya yoğunluğu ve hızını, ρ_s,v_s ise zemin yoğunluğu ve hızını belirtmektedir. Sönüm oranında ise zemin viskozitesi (η), açısal frekans (w), kayma modülü (G) değerleri ile elde edilir (Roesset 1977; Yalçınkaya 2010; Kramer 1996).

Deprem dalgaları yumuşak zemin tabakalarında farklı tepkilere maruz kalmaktadır. Farklı genlik ve frekanslarda oluşan bu deprem dalgaları, bazı frekanslarda daha büyük bazı

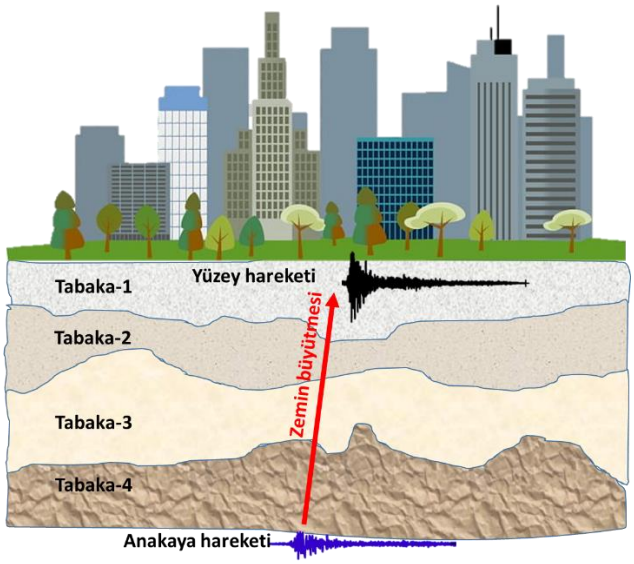
frekanslarda ise daha az büyütme meydana gelmektedir. Büyütme miktarına daha önce bahsettiğimiz empedans oranı ve sönüm oranı belirlerken, frekans içeriğine göre ise zemin tabakasının kalınlığı ve sismik dalga hızı ile belirlenmektedir. Bu ise;

$$f_o = \frac{v_s}{4H} \; veya \; T_o = \frac{4H}{v_s} \tag{4.6}$$

ile ifade edilir. Burada f_0 ve T_o, büyütmenin maksimum olduğu frekans ve periyotu, H yumuşak zemin tabakasının kalınlığı, V_s ise zeminin kayma dalgası hızıdır. Büyütmenin maksimum olduğu andaki periyot, zeminin hakim periyotu olarak belirlenir.

4.3. Zemin Davranış Analizleri

Zeminlerin sismik yükler altında anakayadan yüzeye doğru hareketi olan davranış analizleri bir boyut, iki boyut ve üç boyutlu olarak yapılmaktadır. Burada zemin davranışı eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan davranış olarak incelenmektedir.



Şekil 4.4. Dinamik harekete zemin tabakalarının etkisi (Url-1'den düzenlenmiştir).

Eşdeğer doğrusal yaklaşım ile yapılan analizlerde tabakaların yatay ve sonsuz olduğu, dinamik parametrelerin sabit olduğu kabul edilirken, doğrusal olmayan yaklaşımda ise her bir zemin tabakasında dinamik parametrelerin değiştiği kabul edilmektedir (Şekil 4.4).

4.3.1. Bir boyutlu eşdeğer doğrusal yaklaşım

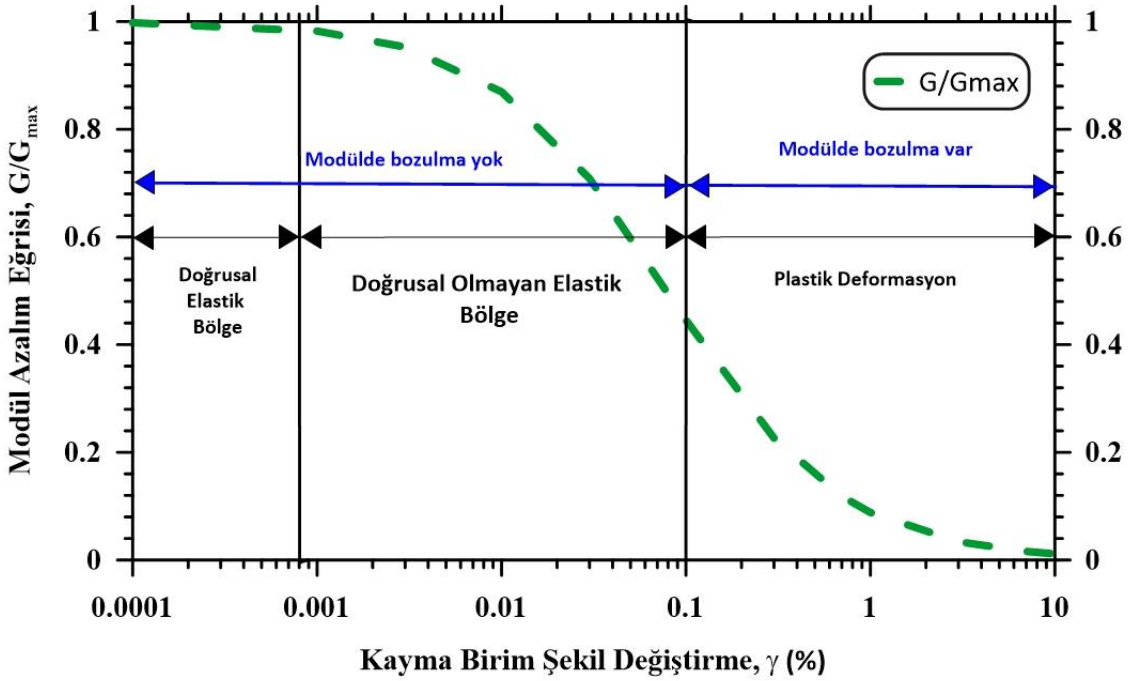
Bir boyutlu eşdeğer doğrusal yaklaşımda, yer tepkisinin analizleri transfer fonksiyonlarının hesaplanmasına dayanmaktadır. Eşdeğer doğrusal modellerde zeminlerin doğrusal bir davranış gösterdiği bilinmektedir.

Yer tepkisi analizlerinde transfer fonksiyonu önemlidir. Hem doğrusal davranışta hemde doğrusal olmayan davranışta kullanılabilen yer tepki parametreleri transfer fonksiyonları yardımıyla bulunmaktadır. Anakayadan gelen ivme ile yer değişitirme, hız, ivme, kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyon parametrelerine ulaşılabilinmektedir.

Eşdeğer doğrusal yaklaşım ile yapılan analizlerde her zemin tabakasında kullanılan ve zeminlerin dinamik parametrelerinden olan kayma modülü ve sönüm oranı için sabit bir değer belirlenmektedir. Bu yöntemde farklı jeolojik koşullar için transfer fonksiyonları kullanılarak yer hareketinin karmaşık etkisi bu yöntemler kullanılarak azaltılmaktadır (Kramer,1996).

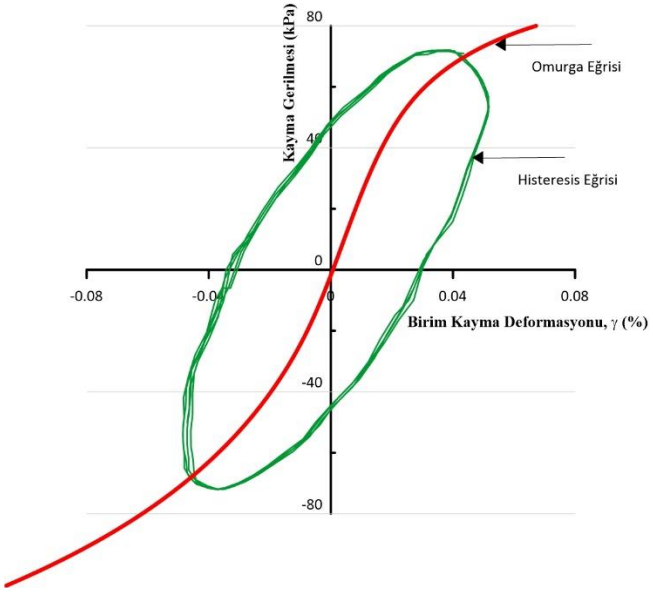
4.3.1. Bir boyutlu doğrusal olmayan yaklaşım

Zeminlerin farklı deformasyon seviyelerinde göstermiş olduğu davranış ile analiz yöntemleri değişmektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere "doğrusal elastik bölge" $<\%10^{-3}$ birim deformasyondan daha düşük seviyelerde olurken, doğrusal olmayan elastik bölgesi ise $\%10^{-3}$ ile $\%10^{-1}$ deformasyon aralığında oluşmaktadır. Daha yüksek deformasyon seviyelerinde ise plastik deformasyonlar meydana gelmektedir.



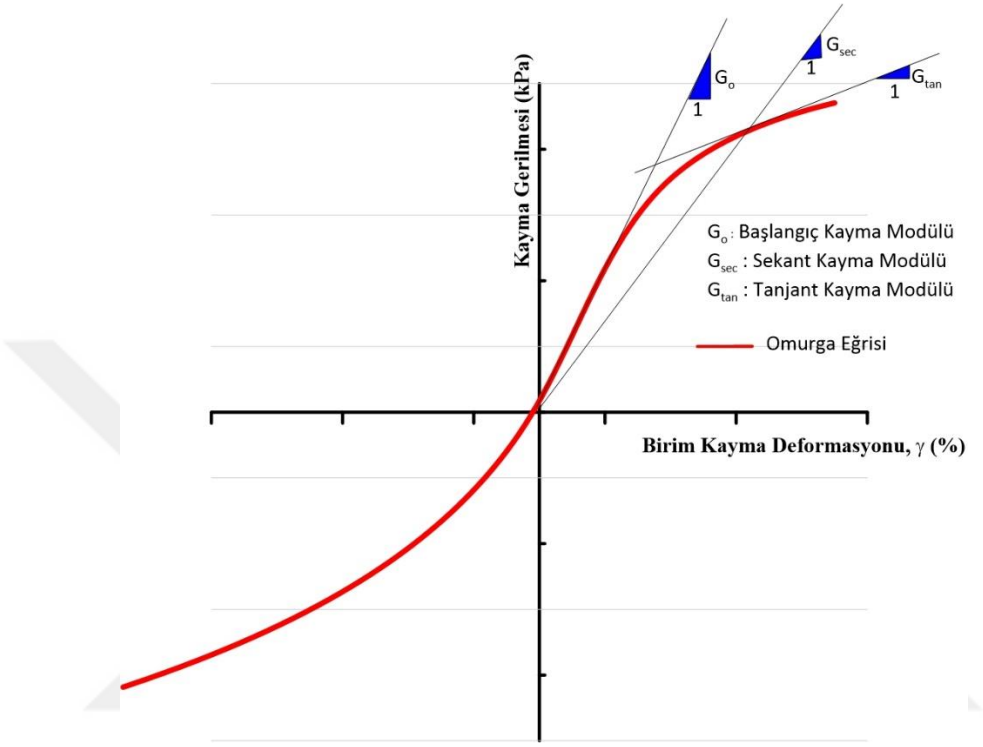
Şekil 4.5. Doğrusal ve doğrusal olmayan zeminin elastik ve plastik davranış bölgeleri

Dinamik yükler altında zemine uygulanan tekrarlı yükler nedeniyle zemin davranışında doğrusal olmayan Şekil 4.6'da görüldüğü gibi Esogü-Geoteknik laboratuvarında elde edilen histerezis eğrisi (gerilme-şekil değiştirme) ile kayma modülü ve sönümleme değerleri elde edilmektedir. Bu değerler eşdeğer doğrusal yaklaşım ile elde edilen parametrelerden daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.6. Zemine ait örnek histerezis eğrisi

Doğrusal olmayan yaklaşımda Tanjant kayma modülü (G_{tan}) değeri kullanılırken, doğrusal yaklaşım analizlerinde Sekant kayma modülü (G_{sec}) değeri kullanılmaktadır. Histerezis eğrisinden geçen iskelet eğrisi ve başlangıç kayma modülü (G_o), G_{tan} ve G_{sec} değerlerinin omurga eğrisinde Şekil 4.7'deki gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.7. Omurga eğrisinden elde edilen kayma modülleri

Doğrusal olmayan yaklaşımda her bir eğimden elde edilen değerler ile kayma modülü-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmektedir. Bu da doğrusal olmayan elastik bölgenin yansıtılması açısından önemlidir.

Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler farklı araştırmacılar tarafından incelenmiş ve karşılaştırılmıştır;

- Eşdeğer doğrusal analizlerde karakteristik doğrusallığı nedeniyle yanıltıcı rezonansa ve yüksek büyütme değerlerine ulaşmasına neden olabilir.
- Eşdeğer doğrusal analizlerde efektif kayma birim deformasyonun kullanılması, yüksek birim deformasyonlarda fazla kayma modülü ve sönüm

değerlerinin kullanımına neden olmaktadır.

- Doğrusal olmayan yaklaşım ile yapılan analizlerde aşırı boşluk suyu basıncının oluşması, dağılması ve sönümlenmesi formüle edilebilinirken, eşdeğer doğrusal modellerde yapılamamaktadır.
- Doğrusal olmayan analizlerde ise sahayı yansıtan doğru kayma modülü-birim deformasyon ve sönümleme eğrilerinin kullanılması gerekmektedir.
- Eğdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımların kullanılmasında zeminin birim deformasyon seviyesine bağlıdır.
- Bu iki yaklaşımda da zemin şartları, yapılan varsayımlar, zeminlerdeki belirsizliklere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle deformasyon seviyesi belirsiz durumlarda herhangi bir modelin diğerinden kuvvetli ve kesin olduğu söylenemez (Joyner ve Chen, 1975; Martin ve Seed, 1978; Dikmen ve Ghaboussi, 1984; Kramer 1996).

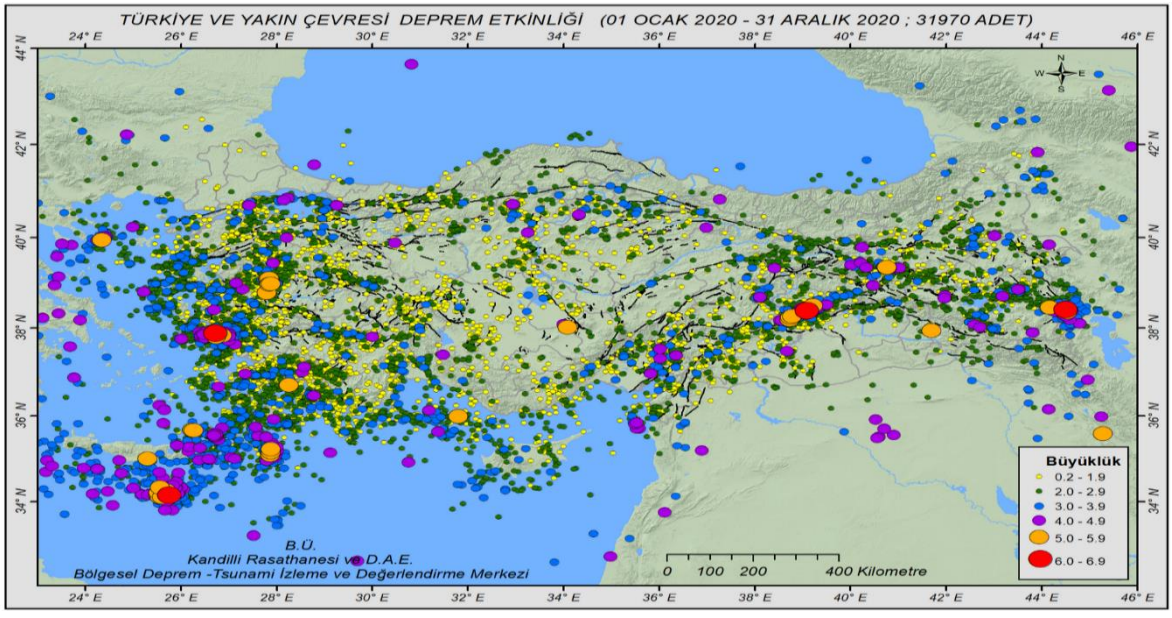
5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1.Giriş

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde farklı özelliklere sahip deney sistemleri kullanılmaktadır. Her bir deney sisteminde birim deformasyon değerlerine göre kayma dayanımı ve sönüm değerleri elde edilmektedir. Bu çalışmada sahaya özel elde edilen örselenmemiş numuneler ile zemin tanımlama deneyleri (elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık, Atterberg limitleri) ve dinamik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deney sistemleri kullanılmıştır.

5.2.Çalışma Bölgesinin Tanıtılması

Dünyanın aktif deprem bölgelerinden biri olan Türkiye'de 2020 yılında farklı büyüklüklerde (0.2<M<7.0) toplam 31970 adet deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin konumları ve büyüklükleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. 2020 yılında Türkiye ve çevresinde meydana gelen depremler ve büyüklükleri (B.Ü.Kandilli Rasathanesi, 2021).

Çalışma bölgesi olarak Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nin kuzey doğusunda yer alan Sakarya ilinde seçilmiştir (Şekil 5.2). Bölge seçiminde etkili olan neden günümüze kadar farklı büyüklükte yıkıcı depremlerin olmasıdır. Bu nedenle araştırmacıların pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir.



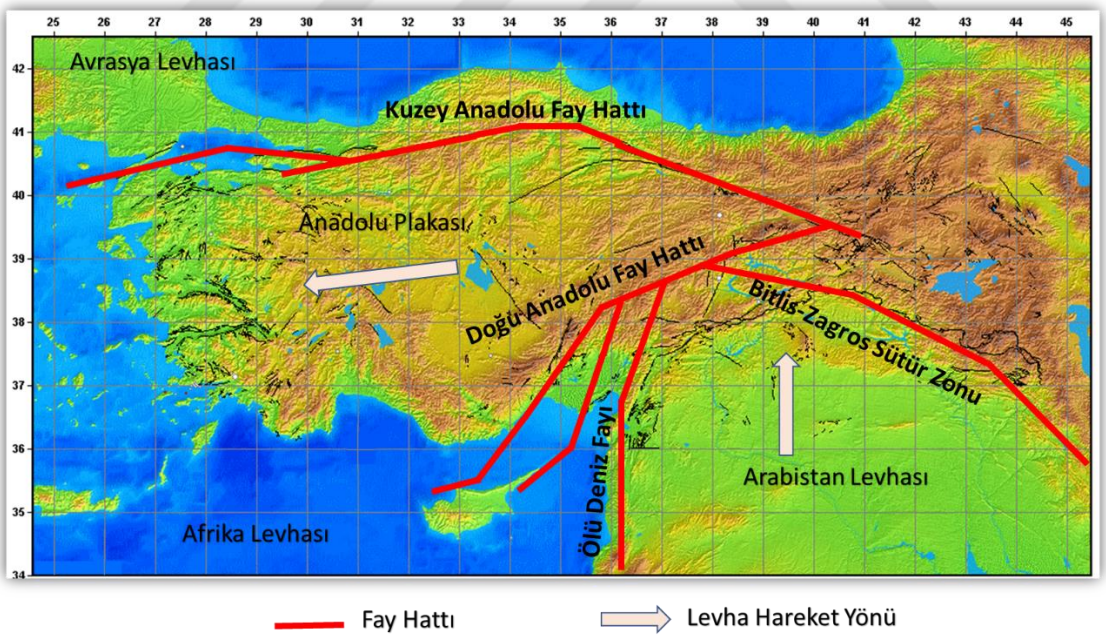
Şekil 5.2. Çalışma bölgesinin genel görünümü

Sakarya ili içerisinden geçmekte olan Sakarya nehrinden adını almaktadır. Sanayileşmenin yoğun olduğu bölgede hızlı nüfus artışı ve bunun sonucunda yapılaşma görülmektedir. Sakarya il merkezi olan Adapazarı ve çevresi "Adapazarı ovası" olarak anılmakta ve deniz seviyesinden yüksekliği ise 31m olarak ölçülmüştür. Geniş bir ova üzerinde olan il merkezinde ve çevresinde Sakarya nehri, Mudurnu çayı geçerken bölgede Sapanca, Taskısığı, Poyrazlar, Akgöl, Gökçeören ve Acarlar gölleri bulunmaktadır. Bölgenin Karadeniz ve Marmara iklimi etkisi altında olduğu görülmektedir. Adapazarı il merkezinin yıllık yıllık ortalama yağış tutarı 845.5 mm (Ustaoğlu, 2018) olarak belirlenmiştir.

5.2.1. Bölgenin Depremselliği ve Jeolojisi

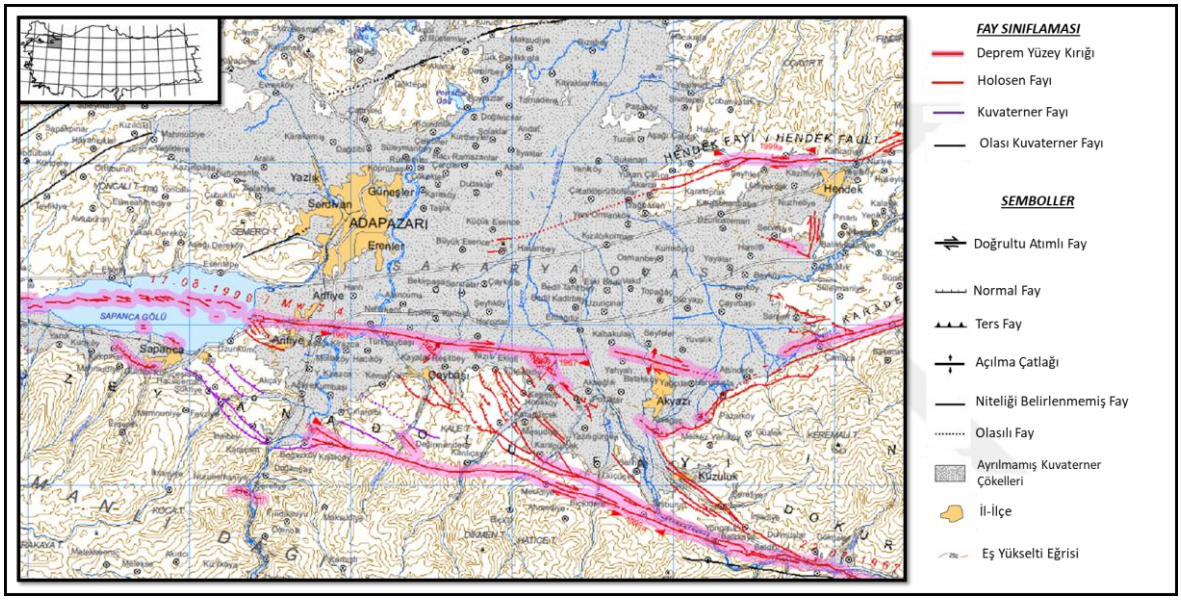
Avrupa'nın önemli deprem bölgelerinden biri olan Türkiye, hem Arabistan hem de Afrika Levhaları'nın ilerlemesi ile Anadolu Levhası sıkışmakta ve Avrasya Levhasına doğru hareket etmekte ve depremler meydana gelmektedir (Şekil 5.3). Bölgede bulunan ve aktif fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAFZ) üzerinde ve yakınlarında meydana gelen 6.9 Erzincan (1992), 7.4 Kocaeli (1999), 7.2 Duzce (1999), 7.2 Van (2011), 6.8 Elazig (2020) ve 6.9 Seferihisar (2020) depremlerinde çok sayıda yapı yıkılmış ve can kayıpları meydana gelmiştir.

Bu fay hattı üzerinde sanayi kentlerinin bulunması ve şehirleşmenin artması nedeniyle ülke nüfusunun büyük bir çoğunluğu deprem riski altındadır. Bu nedenle yapıların tasarımının sahaya özel yapılması ve yapı-zemin etkileşiminin incelenmesi önemlidir.



Şekil 5.3. Türkiye'nin aktif fay hatları ve levhalar (B.Ü.Kandilli Rasathanesi'nden uyarlanmıştır).

Kuzey Anadolu Fay Sisteminin ana hattı üzerinde bulunan Sakarya ili tarihsel dönem depremlerden büyük hasar görmüştür. 1943 M:6.6 Hendek, 1957 M:7.1 Abant, 1967 M:6.0 Akyazı, 1967 M:7.2 Adapazarı ve 2000 M:5.2 Akyazı bölgede son yüzyılda hasar yapan depremlerdir (Harman ve Küçük, 2016; Afad 2021). KAF zonunun son yıllardaki büyük depremlerde önemli rol oynayan kuzey kolu, doğrultu atımlı segmentlerden oluşmuştur (Tekin 2012) (Şekil 5.4). Bu segmentler, Sapanca-Gölcük segmenti, İzmit-Karamürsel segmenti ve Yarımca-Yalova segmentidir.

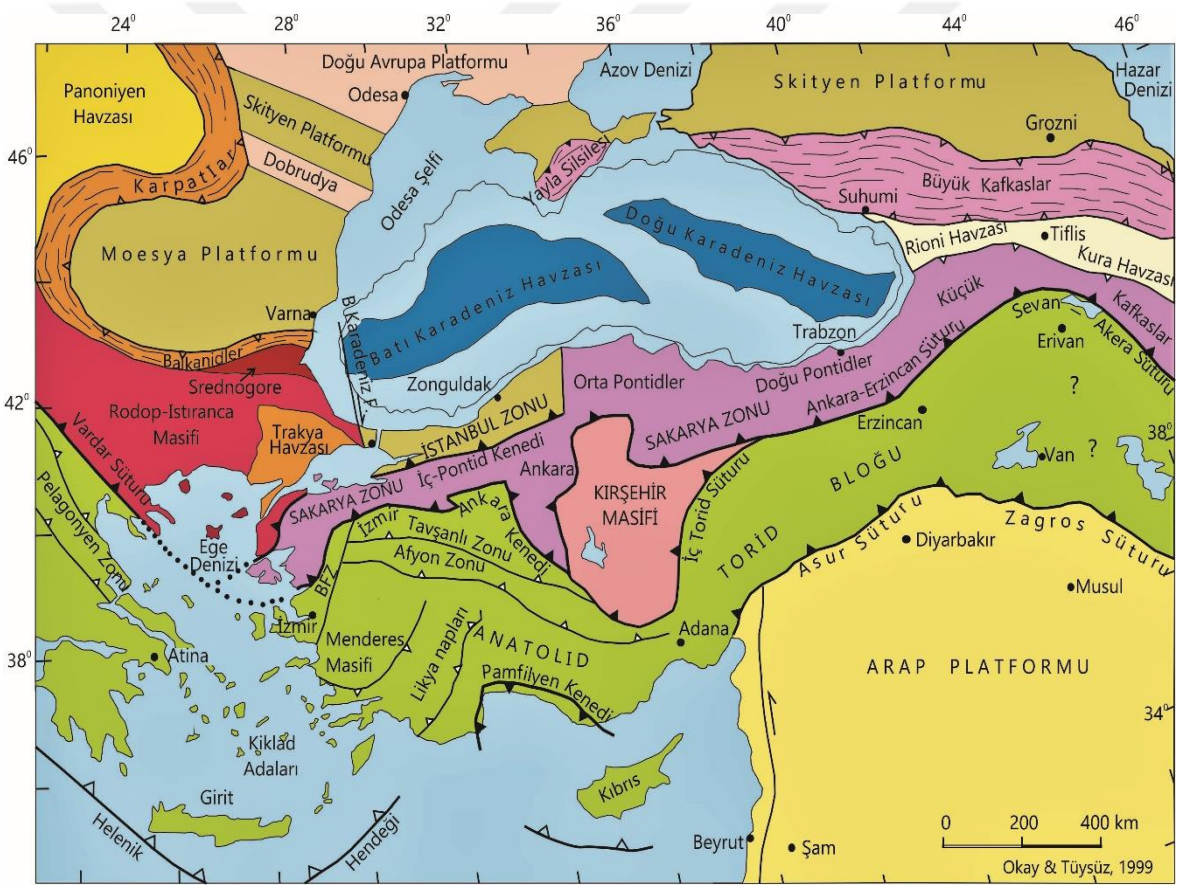


Şekil 5.4. Adapazarı bölgesinin diri fay haritası (Emre vd. 2011)

Yaklaşık 1500 km uzunluğunda olan ve hem dünyanın hem de Türkiye'nin önemli fay hatlarından biri olan KAFZ, Bolu ili Mudurnu ilçesi yakınlarında iki kola ayrılmaktadır. Kuzey kolu, Sakarya ve İzmit'ten geçerek Marmara Denizi boyunca Yunanistan'a uzanmakta iken, güney kolu ise İznik ve Bursa'dan geçerek Edremit'e uzanmaktadır.

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Emre ve diğ. (1998) yılında yaptıkları çalışmada Erken-Orta Miyosende peneplenleşme aşaması geçirmiştir. Daha sonra ise geç Miyosen ve Pliyosen arasında sıkışma ve bölgesel olarak yükselme meydana gelmiştir.

Sakarya il merkezi ve çevresi İstanbul Zonu, Sakarya Zonu ve Armutlu Zonu içerisinde yer almaktadır ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir (Erturaç, 2018). Bölgenin jeolojik evrimi göz önüne alındığında üç ana şekillenme dönemi (Erken-Orta Miyosen, Geç Miyosen-Pliyosen, En geç Pliyosen-Günümüz) olarak ayrılmıştır. Sakarya zonu metamorfik bir temel ve Jura-Kretase yaşlı tortul örtüden oluşur. Kocaeli yarımadası Erken-Orta Miyosen yaşta, Armutlu yarımadası Geç Miyosen-Pliyosen, Bilecik-Bursa yaşlı, KAF zonu ise en Geç Pliyosen-Günümüz arasında yer almaktadır (Emre vd., 1998). Bölgenin deprem yönünden aktif bir yer olmasının yanında Sakarya nehri, Çark suyu gibi akarsuların getirmiş olduğu alüvyonlar ile kaplıdır.

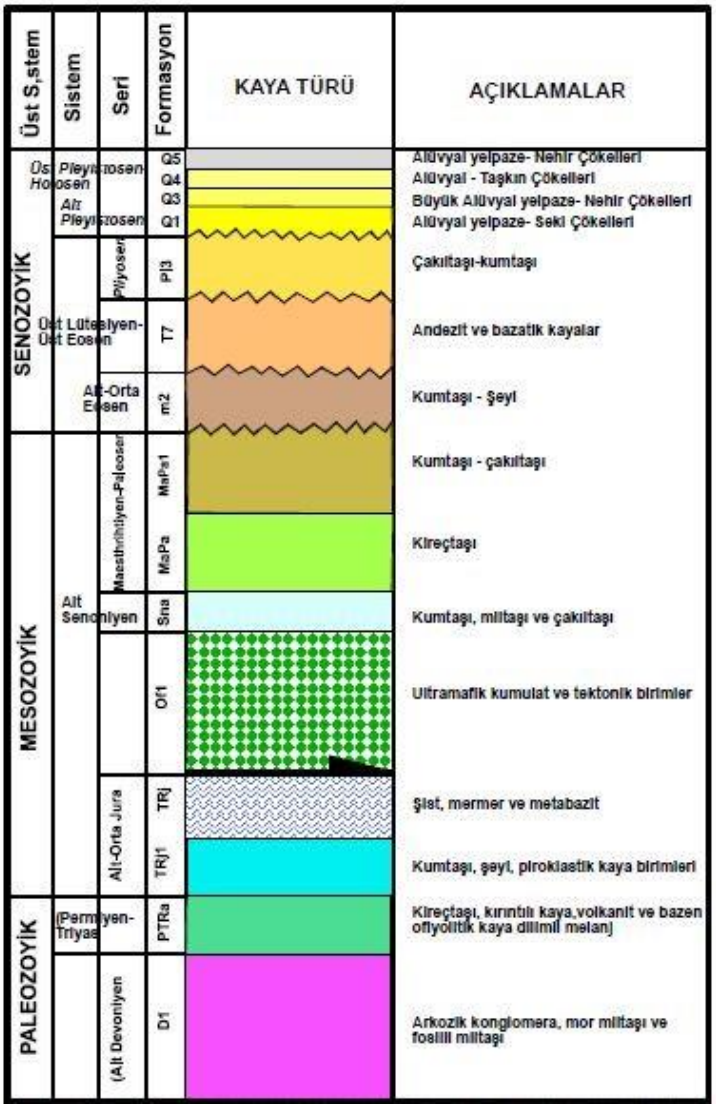


Şekil 5.5. Türkiye ve çevresinin tektonik haritası (Okay ve Tüysüz, 1999)

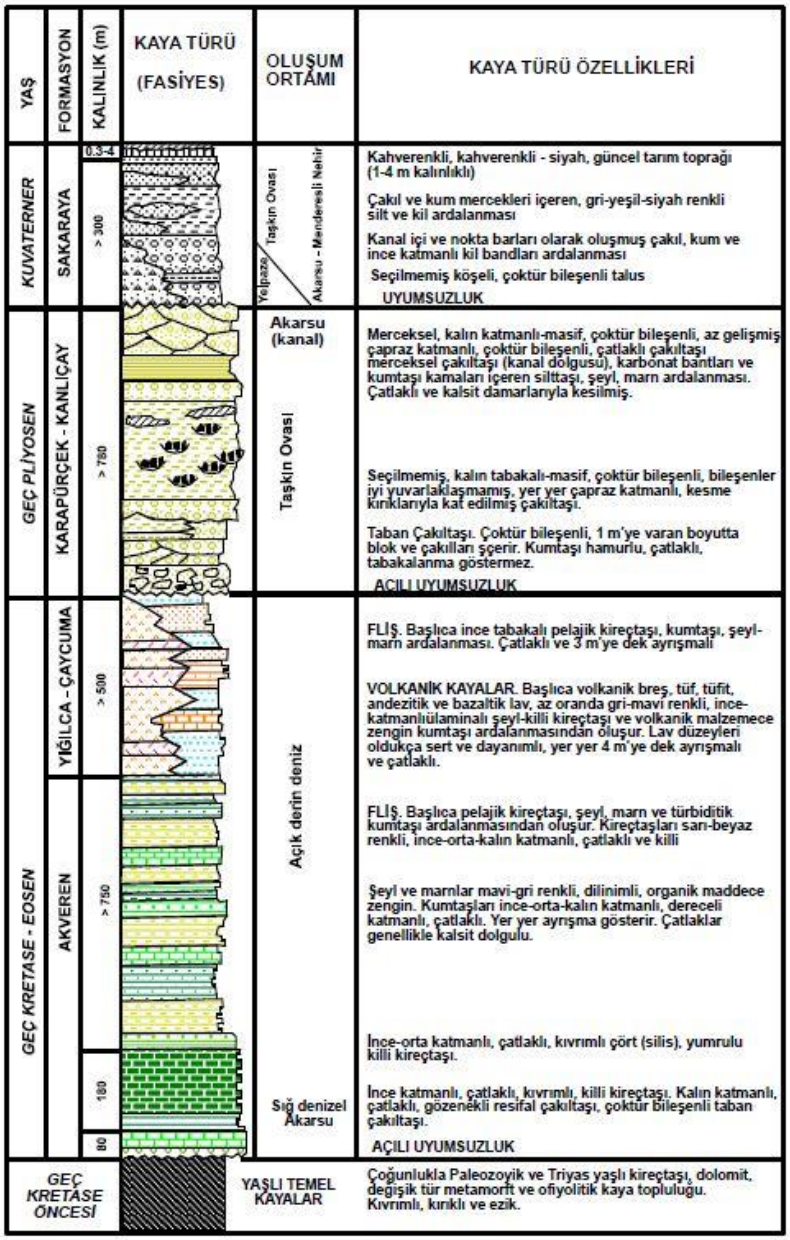
Sakarya ili jeolojisi incelendiğinde geniş bir alana yayılmış alüvyon zeminden oluşmaktadır. Adapazarı ilçesi genel olarak Kuvaterner ile temsil edilmektedir (Şekil 5.6). Kuvaterner kavramı 18.yy'ın sonlarında ortaya çıkmış ve Kuvaterner jeolojisi ve

jeomorfolojisinin ilerlemesi 19.yy'da sürmüştür. Kuvaterner stratigrafisi ve haritalaması konuları ise 20.yy'da daha net açıklanmıştır. Ayrıca Tchihatcheff'in (Pierre de Tchihatcheff) haritasında Kuvaterner olarak belirlenen birimler o dönemki açıklama ile 'dilüvyon've 'alüvyon' olarak adlandırılmaktadır (Gürbüz ve Kazancı, 2017).

Şekil 5.6 ve 5.7 bölgenin jeolojik genelleştirilmiş dikme kesitlerini göstermektedir. Bölgede genel olarak Kuvaterner yaşlı birimlerinden olan Alüvyol yelpaze ve seki çökelleri, akarsu çökelleri ve taşkın çökelleri bulunmaktadır. Bölgede çakıl, kum, silt ve kil tabakaları bulunmaktadır.

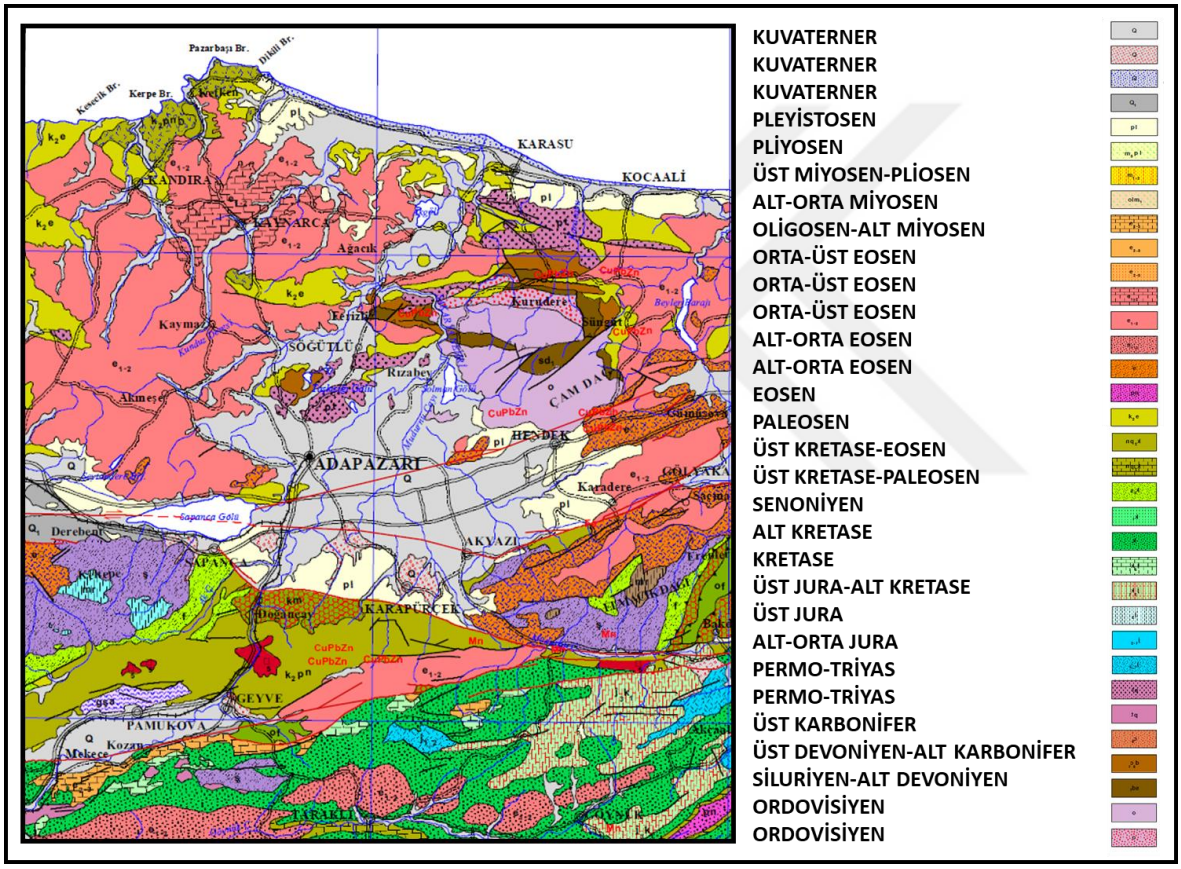


Şekil 5.6. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti (Herece ve Akay, 2003).



Şekil 5.7. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti (Basa vd. 1998).

Sakarya ilinde yapılan inceleme alanında genel olarak yaşlı alüvyon çökellerden oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.8). Bölgede bulunan ovalar kum, silt, kil ve çakıldan oluşmaktadır. Bu alüvyon bölgeler Sakarya nehri, Çark suyu ve Mudurnu çayı ile bölgeye taşınmıştır. Bu taşınma KAFZ ve bölgenin güneyinde bulunan kayalardan oluşmaktadır. Adapazarı bölgesinde Bol 2003 ve DSİ tarafından yapılan çalışmada 200m'lik sondajlar alüvyon katmanlar içerisinde kalmıştır. Bölgenin yoğun bir alüvyon tabakası içerisinde olduğu görülmektedir (Bol 2003).



Şekil 5.8. Sakarya ili jeoloji haritası (Akat vd. 2002)

Sakarya ilinde yapılan kapsamlı çalışmalardan biri olan, Bol 2003 tarafından yapılan çalışmada şehrin kuzey ve doğu bölgesinde ML sınıfı killerin hakim olduğu, kuzey tarafında ise CL sınıfında killer olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın devamında ise Adapazarı ilçesinde zemin profilleri farklı derinliklere ayrılmış ve sınflandırmalara tabi tutulmuştur. 0.00-2.25m arasında bölgenin güney ve batı bölgelerinin kil ağırlıklı olmasına rağmen, doğu bölgelerinde ise düşük plastisiteli killer hakimdir. 2.26-3.75m aralığında ise ilçenin güneydoğu kesiminde siltli zeminlerin bir tabakalanmada olduğu, kuzey bölgelerinde ise killi zeminlerin bu derinlikte yoğun olduğu belirlenmiştir. 3.76-5.25m aralığında ise ilçenin güneydoğu bölgelerinde siltli kumların bir dere yatağı gibi şehir merkezine doğru bir tabaka oluşturduğu görülmüştür. 5.26-6.75m aralığında ise sel nedeniyle oluşan siltli kum alanında daha da arttığı ilçe merkez konumu ile kuzey-güney aksını birleştirdiği belirlenmiştir. 6.78-8.25m aralığında silt tabakasının arttığı yine siltli kum tabakalanmasının kuzey-batı yönünde bir tabaka oluşturduğu, güney kısmı ile arasına silt bandı bulunmaktadır. 8.26-9.75m aralığında ise batı ve güney bölgelerde kil tabakalarının tekrar yoğunlaştığı, 9.76-11.25m aralığında ise silt kum tabakalanmasının daha batıya bir kol oluşturduğu, batı bölgelerde killerin hakim olduğu, güney bölgelerde ise silt ve siltli kum tabakalardan oluşmaktadır (Bol, 2003).

5.3. Saha Çalışması

Sakarya ilinde yapılan çalışmalar incelendikten sonra çalışma bölgesinde örselenmemiş numunelerin temini ve arazi deneylerinin yapılması aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda belirlenen koordinatlarda sondaj çalışması, SPT (Standart Penetrasyon Testi) deneyi ve sismik ölçümler yapılmıştır.

5.3.1. Belirlenen Koordinatlarda Sondajların Yapılması

Bölgede yapılan araştırmalarda hem belediyeler hem de bölgede iş yapan zemin etüd firmaları ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bugüne kadar yapılan zemin etüd raporları incelenerek ön araştırma yapılmıştır.

Sakarya ilinde zemin yapısı ve tabakalanma incelemeleri sonucunda 4 adet sondaj noktası belirlenmiştir. Çalışmada her 5m'de örselenmemiş numuneler, ortam koşullarını

sağlayacak şekilde UD tüpleri yardımıyla elde edilmiştir. Alınan UD tüplerinin uçları parafin kullanılarak kapatılmış ve su kaybetmesi engellenmiştir. Sondaj çalışmalarında yapılan değerlendirmelerde yer altı su seviyesinin 1.5m civarında olduğu belirlenmiştir. Alınan numuneler suya doygun olduğu belirlenmiş ve yapılan değerlendirmelerde kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Belirlenen noktalarda sondaj çalışmaları



Şekil 5.10. Belirlenen noktalarda sondaj çalışmaları

5.3.2.Arazi Deneyleri

Bölgenin depremsellik özelliklerinin belirlenmesinde laboratuvar deneyleri kadar arazi deneyleri de büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle arazi koşullarının daha iyi belirlenmesi ve alınan örselenmemiş numunelerin göstereceği davranışın daha sağlıklı incelenmesi için arazide yapılan SPT ve jeofizik ölçüm yöntemi kullanılarak V_s (kayma dalgası hızı) hesaplanmıştır.



Şekil 5.11. Belirlenen noktalarda SPT değerlerinin ölçümü

Zeminlerin taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde kullanılan SPT değerleri, sondaj alınan noktalarda her 1.5m'de ölçülmüş ve tüp içerisindeki numune tanımlama yapmak üzere alınmıştır. Bu numune örselenmiş olarak kabul edilmektedir.

Standart Penetrasyon deneyi (SPT) arazide yapılan ve şahmerdan adı verilen tokmağın (76 cm yükseklikten 63.5 kg ağırlığında) dinamik olarak düşürülerek shelby tüpünün zemine 45 cm çakılması şeklinde uygulanır. Tüpün zemine son 30 cm'lik çakılması için gerekli olan toplam darbe sayısı, zeminin penetrasyon direnci (SPT-N) olarak tarif edilir.

SPT deneyinin yapımında kullanılan standartlar BS 1377, ENV (Eurocode 7) ve ASTM D1586 standartlarıdır. Ülkemizde TS EN ISO 22476-3 (Jeoteknik Etüt ve Deneyler – Arazi Deneyleri - Bölüm 3: Standart Penetrasyon Deneyi) standartı da uygulanmaktadır (JMO 2021).

Çalışmada bir diğer arazi deneyi olarak kayma dalgası hızı ölçümü yapılmıştır. Belirlenen sondaj noktalarında zeminin boşluk oranına, gerilme durumuna, efektif gerilme durumuna, sıkılığa bağlı olan fiziksel bir parametre olduğundan sahada ölçümü önem

taşımaktadır.

Yüzey dalgası ölçümlerinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; aktif kaynaklı ve pasif kaynaklı yöntemlerdir. Bu yöntemler yüzey dalgalarının analizine dayanmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan MASW (Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi) yöntemi yüzey dalgalarının dispersiyon özelliklerinden yararlanarak zeminin V_{30} (ilk 30m derinliğe kadar) ortalama kayma dalgası hızı belirlenmektedir. Bu yöntem son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Park vd., 1999).

Bölgede belirlenen noktalarda yapılan örselenmemiş numuneler ile dinamik parametrelerin belirleneceğinden, kayma dalgası hızı da depremin yer tepkisi ve kayma modülü ile doğrudan ilişkisi bulunmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında zemin tepkisinin belirlenmesinde kayma dalgası hızının ölçülmesi önemlidir.

Arazi koşullarını yansıtan bu deneylerden alınan veriler aynı zamanda laboratuvardan elde edilen veriler ile karşılaştırılma imkânı sunmaktadır. Çalışma kapsamında kayma dalgası hızı hem arazide hem de laboratuvarda elde edilmiştir.



Şekil 5.12. Sondaj noktalarında jeofizik yöntem ile kayma dalgası hızının ölçülmesi

5.4. Laboratuvar Çalışması

Bu tez çalışmasında, deprem bölgesinde yapılan sondaj çalışması sonucunda elde edilen örselenmemiş numuneler ile zemin tanımlama deneyleri (doğal su muhtevası, Elek analizi, Atterberg limitleri), kayma dayanımlarının belirlenmesi amacıyla üç eksenli basınç deneyi (drenajsız konsolidasyonsuz UU), dinamik parametrelerin belirlenmesi amacıyla ise Rezonant kolon (RC) ve Dinamik üç eksenli (TRX) deney sistemleri kullanılmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Deney programı

SK No	Örselenmemiş Numune No	Deney No	Boyut (mm)	Derinlik (m)	Deney No
SK-1	UD-1	RC-1 TRX-1	50*100 70*140	2.50	UU-1
	UD-2	RC-2 TRX-2	50*100 70*140	7.50	UU-2
	UD-3	RX-3 TRX-3	50*100 70*140	12.50	UU-3
	UD-4	RC-4 TRX-4	50*100 70*140	17.50	UU-4
SK-2	UD-1	RC-1 TRX-1	50*100 70*140	2.50	UU-1
	UD-2	RC-2 TRX-2	50*100 70*140	7.50	UU-2
	UD-3	RX-3 TRX-3	50*100 70*140	12.50	UU-3
	UD-4	RC-4 TRX-4	50*100 70*140	17.50	UU-4
	UD-5	RC-5 TRX-5	50*100 70*140	22.50	UU-5
SK-3	UD-1	RC-1 TRX-1	50*100 70*140	2.50	UU-1
	UD-2	RC-2 TRX-2	50*100 70*140	7.50	UU-2
	UD-3	RX-3 TRX-3	50*100 70*140	12.50	UU-3
	UD-4	RC-4 TRX-4	50*100 70*140	17.50	UU-4
	UD-5	RC-5 TRX-5	50*100 70*140	22.50	UU-5
SK-4	UD-1	RC-1 TRX-1	50*100 70*140	2.50	UU-1
	UD-2	RC-2 TRX-2	50*100 70*140	7.50	UU-2
	UD-3	RX-3 TRX-3	50*100 70*140	12.50	UU-3
	UD-4	RC-4 TRX-4	50*100 70*140	17.50	UU-4

5.4.1. Örselenmemiş Numunelerin Tanımlanması

Saha çalışması sonucu elde edilen örselenmemiş zemin numuneleri hidrolik kriko yardımıyla UD tüplerinden çıkarılmıştır. Saha şartlarını yansıtması açısından zemin tanımlama deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda su muhtevası, elek analizi, Atterberg limitleri deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5.13. SK-1 sondaj kuyusundan elde edilen UD tüpü ve örselenmemiş numune

Bu çalışmada zeminlerin tanımlanması amacıyla öncelikle doğal su muhtevası değerleri ölçülmüştür. Bunun ardından zeminlerin elek analizi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde zeminlerin ince dane oranının %89 ve üzeri olduğu belirlenmiştir. Ardınan zeminlerin ince taneli zeminlerin farklı su muhtevalarındaki davranışlarının tespit edilmesine işlemine geçilmiştir. Kıvam zemin tanecikleri arasında kohezyonun derecesini ve zemin kütlesinin akıcı kıvama geldiği sayıya isabet eden su içeriğini belirten bir kavramdır.



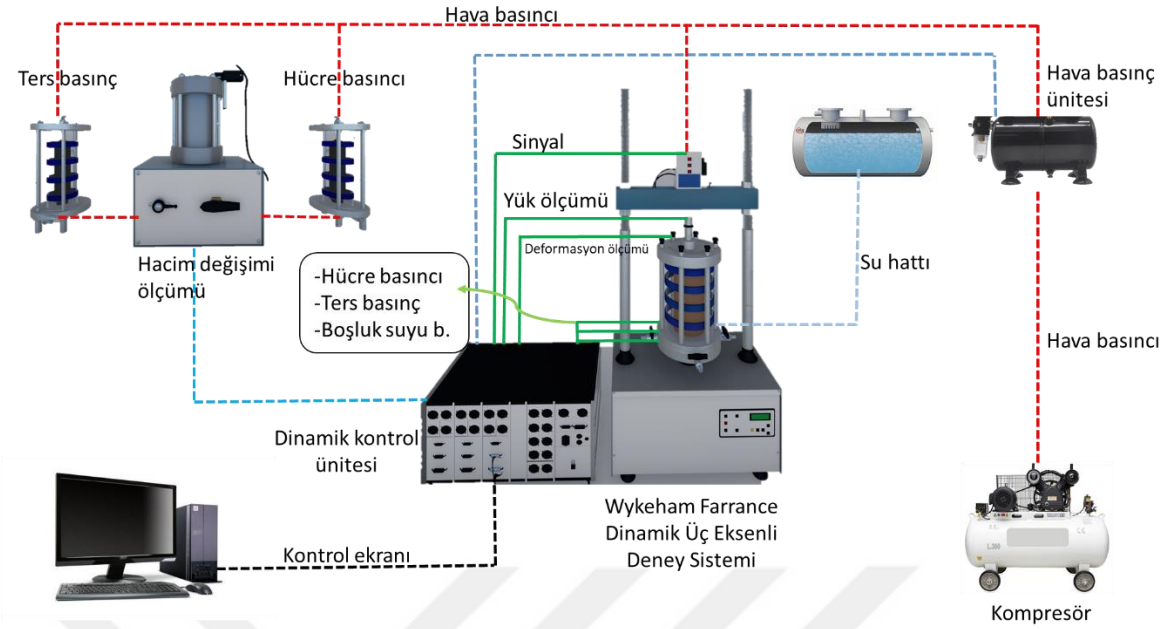
Şekil 5.14. Atterberg limitlerinin belirlenmesi

İnce taneli zeminlerin şekil verebilme özelliklerinin son bulduğu (kırılmaya çatlamaya başladığı) andaki isabet eden su içeriğini belirten kavramdır. Zeminin plastik bir malzemeden yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü andaki su muhtevası plastik limit olarak tanımlanmaktadır. Bu deney henüz zeminin plastik kıvamda bulunduğu en düşük su muhtevasının elde edilmesi işlemidir.

5.4.2. Örselenmemiş Numuneler ile TRX Deneylerin Yapılması

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan dinamik üç eksenli deney sistemi literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan dinamik üç eksenli deney sistemi bu çalışmada kullanılmıştır.

Deney sistemini genel olarak tanıtmak gerekirse; numunelerin yerleştirildiği hücre, hava basınç hattı, su hattı ve kontrol üniteleri olarak dört ana bölümden oluşmaktadır. Ekipmanlar incelendiğinde, hava kompresörü, su tankı, tekrarlı yükleme cihazı, vakum sistemi, deney hücresi, su ve hava dolaşım sistemi, basınç elemanları, kontrol sistemi, hacim değişim ölçüm sistemi, bilgisayardan oluşmaktadır. Deney sisteminin genel bağlantı görünümü Şekil 5.15'de görülmektedir.



Şekil 5.15. Dinamik üç eksenli deney sisteminin genel görünümü

Deney sisteminde kullanılan yardımcı elemanlar ise CO_2 tüpü, membran, poroz taş, filtre kağıdı, o-ring, numune yerleştirme aparatı ve silikon gresden oluşmaktadır. Tüm bu aparatlar ve yardımcı malzemeler kullanılarak deney yapılmaktadır.

Deney yapım aşamaları incelendiğinde ise;

- Numunenin hazırlanması,
- Deney düzeneğinin hazırlanması,
- Numunenin hücreye yerleştirilmesi,
- Numunenin doyurulması,
- Numunenin konsolide edilmesi ve
- Numuneye yükleme işleminin yapılması aşamalarından oluşmaktadır.

Deney yapılış aşamalarına başlamadan önce su tankına yeterli miktarda su basımı yapılır (Şekil 5.16). Ardından su içerisindeki hava vakum yardımıyla alınır. Bu aşamadan sonra hazırlanmış olan numune deney sistemi içerisine yerleştirilmek üzere bekletilir. Öncelikle hücre içerisine filtre kağıdı ve poroz taş yerleştirilir. Membran ise silikon gress sürülerek hücrenin alt kısmına geçirilir. Buradaki amaç membranın tam olarak yapışması ve numune ile hücrenin bağlantısının olmamasıdır. Aksi halde su membran içerisinden

numuneye geçebilir. O-ringler yardımıyla membran sıkı bir şekilde hücrenin alt kısmına yerleştirilmiş olur.



Şekil 5.16. Dinamik üç deney sisteminin laboratuvar görünümü

Numune yerleştirme aparatı yardımıyla numunenin membran içerisine yerleştirilmesinin ardından üst kısmına tekrar filtre kağıdı ve poroz taş yerleştirilir. Numunenin yerleştirilmesinin ile artık sistem ile numune bağlantısını kuracak olan başlığın yerleştirilmesi gerekir. Bu aşamada başlığın üst kısmına tekrar silikon gress sürülerek yük başlığı ile numune bağlanmış olur (Şekil 5.17). Hücrenin yerleştirilmesinin ardından hücre su ile doldurulur ve numune hazır hale gelir. Sistem üzerinde yer alan bağlantılar ve deformasyon ölçer hizalanır.

Tüm bağlantıların ve sistemin aktif olması sağlandıktan sonra numunenin doyurulması aşamasına geçilmesi gerekmektedir. Bu aşamada CO_2 tüpü yardımıyla numunenin içerisindeki havanın dışarı çıkarılmasının sağlanması ve su ile doyurulmasının sağlanması yapılmaktadır. Havanın dışarı çıkarılması ile numune su ile doyurulmaya başlanır. Burada kademeli bir doyurma yapılmaktadır.



Şekil 5.17. Numunenin hücreye yerleştirilmesi

Doyurma işleminin tam anlamı ile yapılmasının sağlanması gerekmektedir. Bu deney sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Doyurma işleminde numunenin herhangi bir deformasyona maruz kalmadan tüm boşlukların su ile doyurulmasını amaçlamaktadır. Bu aşamada hücre basıncının, numunenin içerisine gönderilen basınçlı doyurma işlemi arasındaki fark 5kPa olacak şekilde yapılmaktadır. Kademeli olarak her ikisinin artırılması ile aradaki fark korunmaktadır. Her aşamada numune içerisine giren su miktarı azalmaktadır. Burada kontrol ekranından B değeri yani boşluk suyu basıncının hücre basıncı değişimine oranı ($B=\Delta\sigma_u/\Delta\sigma_3$) incelenmektedir. Bu değerin 0.95-1.00 arasına ulaştığında doyurma işleminin tamamlandığı kabul edilir ve işlem sona erdirilir.

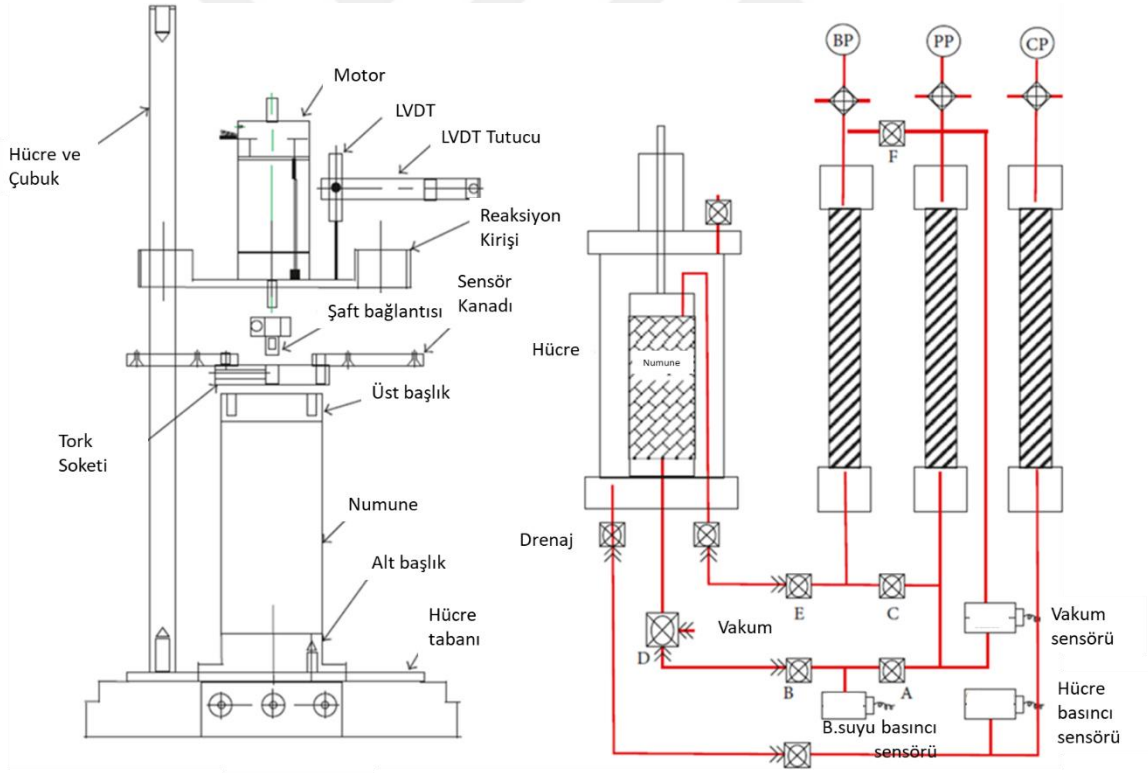
Doyurma işleminin ardından konsolidasyon aşamasına geçilmektedir. Burada numune izotropik olarak konsolide edilir. Konsolidasyon ile numunenin gerekli efektif gerilmenin etkilemesi sağlanmaktadır. Numune içerisindeki suyun dışarı atılmasının ardından valf kapatılarak konsolidasyon işlemi tamamlanır.

Son işlem olarak numuneye yükleme işlemi yapılmaktadır. Burada numuneye gerekli çevre basıncının verilmesi ve diğer tüm bağlantılarının kontrolünün yapılmasının ardından yükleme yapılır. Çalışmada 1 Hz frekansında ve 10 çevrim olacak şekilde deformasyon

kontrollü sinüs dalgası yüklemesi yapılmıştır. Deformasyon seviyesinin kademeli olarak artırılmasının ardından numunenin göçmesine kadar devam edilmektedir.

5.4.3. Örselenmemiş Numuneler ile RC Deneylerinin Yapılması

Zeminlerin dinamik parametrelerinden biri olan maksimum kayma modülü (G_{maks}) hesaplanmasında hem arazi hem de laboratuvar deneylerinden yararlanılmaktadır. RC deney sisteminde laboratuvar şartlarında numunenin kayma dalgası yardımıyla G_{maks} değeri hesaplanmaktadır. Sistemde numunenin boyuna doğru titreşim veya burulmalı titreşim uygulanarak kayma dalgası hızı hesaplanmaktadır (Hardin ve Richart, 1963). Deney sistemine (RCTS) ait bağlantı sistemi ve boy kesiti Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18. RCTS deney sistemi ve basınç ünitesinin boy kesiti

Rezonant kolon deney sistemine yerleştirilen silindir numunesi ile burulma kuvveti uygulanır (Şekil 5.19). Numune baş kısmından uygulanan farklı frekans ve genliklerde dinamik tork ile numune burulur. Dalga yayılım teorisi uygulanarak bulunan rezonans

frekans ile kayma dalgası hızı hesaplanmaktadır. Bu aşamada ayrıca polar atalet momenti hesaplanır ve kayma modülüne geçiş yapılmaktadır.



Şekil 5.19. Rezonant kolon deney sistemi laboratuvar görünümü

Zemin numunesinin bir tarafının sabit tutulması ve diğer tarafından uygulanan tork ile numune elastik olarak belirli bir dönme açısı ile döndürülerek tekrar ilk haline gerir gelmiş olur. Uygulanan tork (T);

$$T = GJ\frac{d_\theta}{d_z} \tag{5.1}$$

formülü ile ifade edilir. Burada G kayma modülü, d_θ d_z ise dönme açısı olarak tanımlanmaktadır. Rezonant kolon deney sisteminde rezonans frekansın hesaplanması ile kayma dalgası hızı hesabı yapılmaktadır. Burada Kelvin-Voight modeli kullanılmaktadır.

Kayma dalgasının aşağıya doğru numune boyunca ilerlemesi sonucunda, kayma modülü (G) ve yoğunluğa (ρ) bağlı olarak;

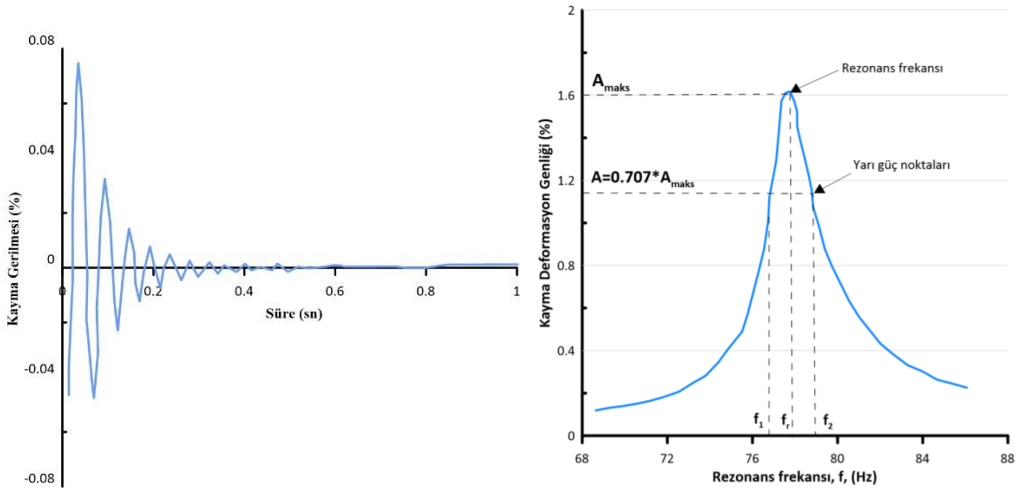
$$V_s = \sqrt{G/\rho} \tag{5.2}$$

ifade edilir. Aynı zamanda birim deformasyon genliği (γ) de;

$$\gamma = \frac{r\theta_{maks}}{h} \tag{5.3}$$

zeminin ekseninden olan mesafe (r), maksimum dönme açısı (θ_{maks}) ve numunenin yüksekliği (h) ile ifade edilmektedir.

Deney sistemi ile dinamik parametrelerden biri olan sönüm oranı da hesaplanmaktadır. Burada iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar; serbest titreşim sönümleme oranı ve yarı güç bant genişliği yöntemidir. RC deney sistemi iki farklı yöntem ile hesaplama yapmaktadır. Hesaplamaya ait grafikler Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. İki farklı sönümleme değerlerinin ölçülmesi

Deneyin yapılışı ise şu aşamalardan oluşmaktadır;

- Numunenin hazırlanması,
- Numunenin yerleştirilmesi,
- Hücrenin yerleştirilmesi,
- Numunenin doyurulması,
- Numunenin konsolide edilmesi ve
- Numuneye kuvvet uygulanması.

Deney için hazırlanan RC deney sistemi öncelikle tüm bağlantılar kontrol edilmelidir. Hücreye numunenin yerleştirilmesi aşamasında ise öncelikle membran yerleştirilmesi yapılır. Burada silikon gress ve 0-ring ile alt başlığa sabitlenen membran daha sonra numune yerleştirme apartı yardımıyla membran içerisine yerleştirilir. Üst başlığın yerleştirilmesi ve o-ring ile bağlantısının yapılmasının ardından motor kısmı bağlantısı yapılır. Deformasyon ölçerin ve diğer tüm bağlantıların yapılmasının ardından hücre yerleştirilir. Hücre üzerinde yapılan bağlantıların ardından numune doyurulma aşamasına geçmiş olur. Doygunluk aşamasında yine B değeri kontrol edilerek 0.95 üzerinde tamamlanır. Konsolidasyon işleminde gerekli çevre basıncı için sisteme hava verilerek konsolide edilir. Bu aşamadan sonra artık kuvvet uygulanarak gerekli frekans ve genliklerde rezonans frekans kontrol edilir ve kademeli olarak tork kuvveti artırılır.

5.4.4. Örselenmemiş Numuneler ile UU Deneylerinin Yapılması

Zeminlerin kayma dayanımı, mühendislik parametreleri içerisinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Kayma dayanımı, zeminlerin taşıyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yapıların tasarımlarında temellerin taşıma gücü hesaplarında, çeşitli istinat ve şev stabilitesi problemlerinde kullanılan bu parametre, Mohr-Coulomb tarafından önerilen formül ile daha anlaşılabilir hale gelmiştir. Bu fonksiyon;

$$\tau = c + \tan(\phi) \tag{5.4}$$

ile ifade edilir. Burada kayma gerilmesi (τ), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) olarak tanımlanmaktadır.

Bu kapsamda zeminlerin kayma dayanım parametrelerini belirlemek üzere üç eksenli basınç deneyi kullanılmaktadır. Bu deney sisteminde arazide benzer gerilmelerin oluşturulabilindiğinden önemlidir. Deney sistemi Şekil 5.21'de görüldüğü üzere hücre içerisine yerleştirilen numune ile drenajsız konsolidasyonsuz (UU) deneyleri yapılmıştır. Deney sisteminde kullanılan yardımcı elemanlar ise CO_2 tüpü, membran, poroz taş, filtre kağıdı, o-ring, numune yerleştirme aparatından oluşmaktadır.



Şekil 5.21. Üç eksenli basınç deney sistemi

Deney yapım aşamaları incelendiğinde ise;

- Numunenin hazırlanması,
- Deney düzeneğinin hazırlanması,
- Numunenin hücreye yerleştirilmesi,

- Numunenin doyurulması,
- Numuneye yükleme işleminin yapılması aşamalarından oluşmaktadır.

Deney aşamasında çevre basıncı hücre içerisine gönderilen su ile yapıldığından su tankına su basımı yapılır. Ardından su içerisindeki hava vakum yardımıyla alınır. Deney sistemine yerleştirilen örselenmemiş numune (50*100mm) filtre kağıdı ve poroz taş yerleşiminden sonra membran içerisine yerleştirilir. O-ringler ile membran ve başlık kısımları sıkı bir şekilde bağlanmış olur.

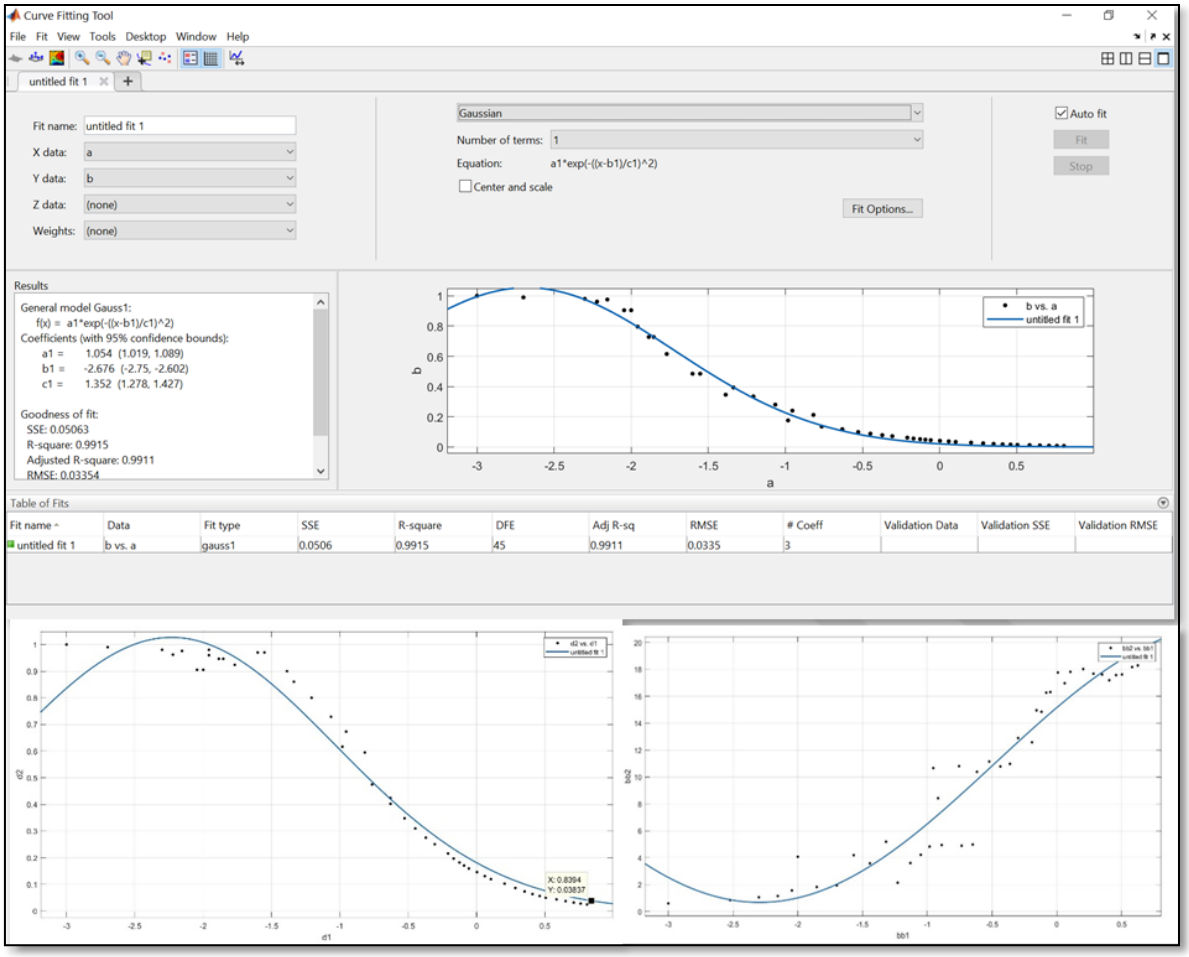
Deney aşamasında numunenin yerleştirilmesi ve deney sisteminin hazırlanmasından sonra CO_2 tüpü ile numunenin içerisindeki havanın dışarı çıkması sağlanır ardından numune doyurma aşamalarına geçilir.

Doyurma işleminde numunenin herhangi bir deformasyona maruz kalmadan tüm boşlukların su ile doyurulmasını amaçlamaktadır. Bu aşamada hücre basıncının, numunenin içerisine gönderilen basınçlı doyurma işlemi arasındaki fark 5kPa olacak şekilde yapılmaktadır. Kademeli olarak her ikisinin artırılması ile aradaki fark korunmaktadır. Her aşamada numune içerisine giren su miktarı azalmaktadır. Burada kontrol ekranından B değeri yani boşluk suyu basıncının hücre basıncı değişimine oranı ($B=\Delta\sigma_u/\Delta\sigma_3$) incelenmektedir. Bu değerin 0.95-1.00 arasına ulaştığında doyurma işleminin tamamlandığı kabul edilir ve işlem sona erdirilir. Yükleme işleminin ardından numunenin kırılması ve deformasyonun %10 seviyesinde deney tamamlanmış olur.

5.5. Dinamik Deney Sonuçlarının Matlab R2018a ile Birleştirilmesi

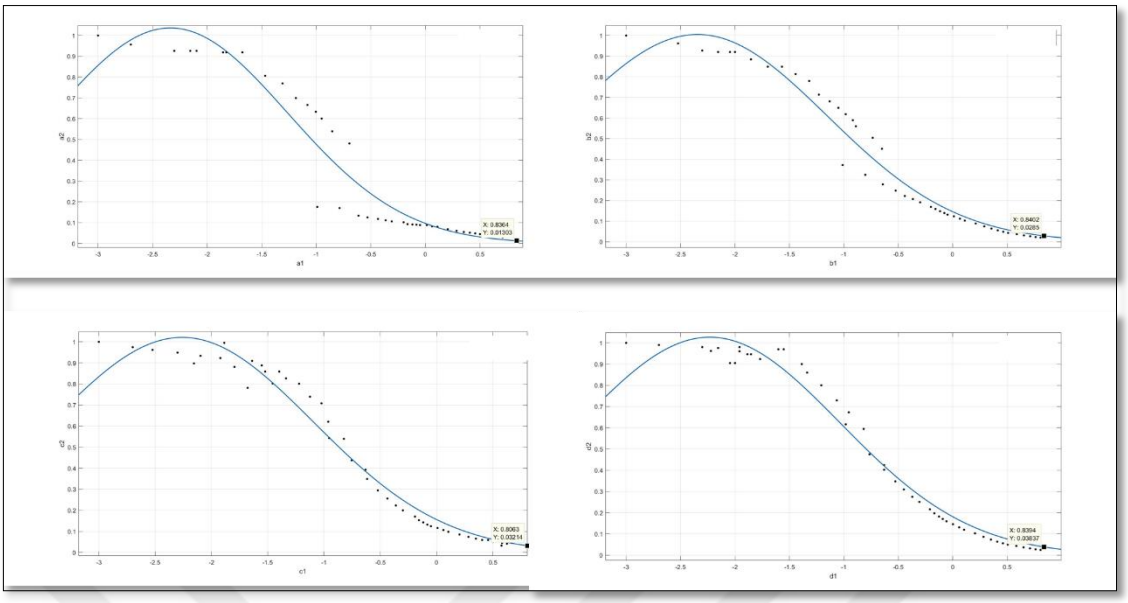
Yapılan deneysel çalışmaların ardından yapılan değerlendirmelerde RC ve TRX deney sonuçlarının birleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada farklı deformasyon seviyelerinden elde edilen kayma modülü-birim deformasyon değerleri elde edilmiştir. Burada RC ve TRX deney sonuçlarının birleştirilmesi sonucu en uygun eğrinin geçirilerek çalışma bölgesini dinamik özelliklerinin yansıtılması sağlanmıştır.

Bu kapsamda Matlab (**Mat**rix **Lab**oratory) sayısal hesaplama yazılımı ve programlama dili kullanılmıştır. Matlab yaygın olarak akademik çalışmalarda kullanılmaktadır. Çalışmada, Matlab R2018a programlama dili kullanarak deney sonuçlarının birleştirilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22. Matlab programında en uygun eğri seçimi

Matlab R2018a programlama dilinde tanıtılan deney sonuçlarından geçirilen en uygun eğri her 5m'de değerlendirilmiş ve o tabakayı yansıtan dinamik parametrelerin olduğu eğriler elde edilmiştir. Daha sonra aynı derinlikteki tüm sondaj kuyularından elde edilen parametreler incelenerek tüm parametreler eklenmiş ve Şekil 5.23'te görüldüğü üzere en uygun eğri elde edilmiştir.



Şekil 5.23. Matlab programlama dili ile en uygun eğrinin elde edilmesi

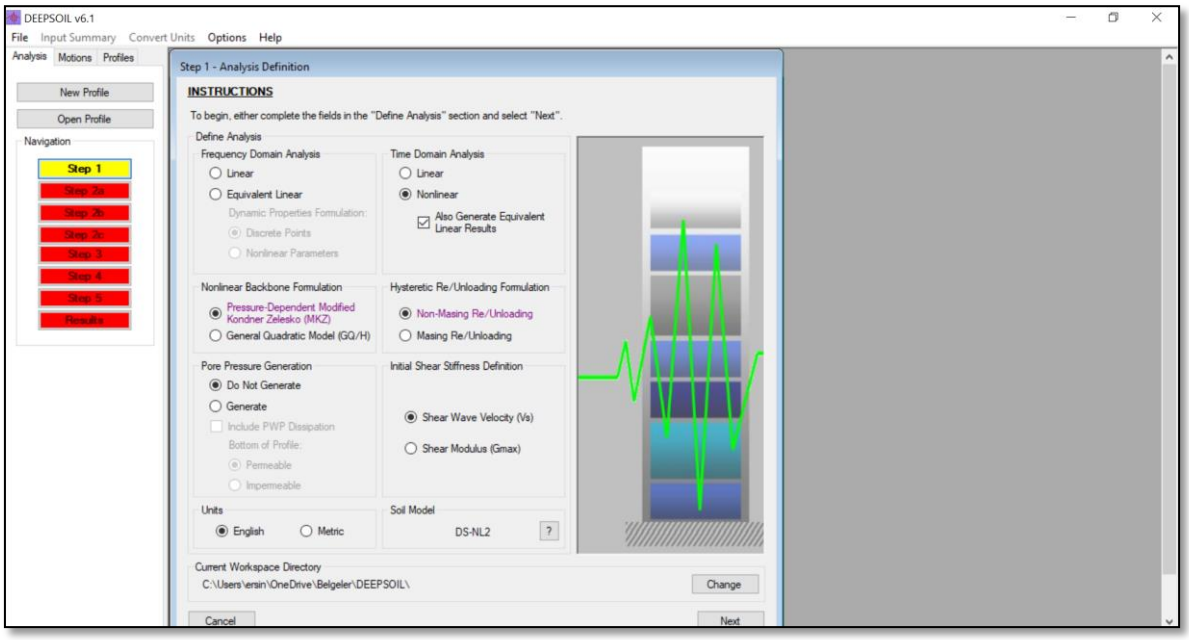
5.6. Sahaya Özel Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması

Zeminlerin sahaya özel davranışının belirlenmesinde farklı yazılımlar kullanılmaktadır. Bu alanda ilk olarak kullanılmaya başlayan kayma dalgalarının etkisinde oluşan dalga yayılma çözümlemelerini temel alan SHAKE yazılımıdır. Daha sonra geliştirilen EERA yazılımı geliştirilmiştir. 1998 yılında ise zeminlerin 1B (1 boyutlu) analizlerinde kullanılan DeepSoil programı geliştirilmiştir.

Bu çalışmada Hashash vd. tarafından geliştirilen DeepSoil programı kullanılarak sahaya özel 1B zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Bu yazılım ile hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analizler (hem frekans hem de zaman tanım alanında) analizler yapılmaktadır. Tanımlanan zemin tabakaları ve ivme kayıtları sonucunda yapılan analizlerde her zemin tabakasında ivme, gerilme, büyütme (amplifikasyon), Fourier davranış spektrumları ve davranış spektrumları elde edilmektedir.

Şekil 5.24'te görülen program arayüzünde analiz yönteminin seçilmesi, hesap yöntemi, boşluk suyu basıncının değişimi, kullanılacak birim yöntemi seçilmektedir. Daha

sonra belirlenen zemin tabakalarına ait tabaka adı, kalınlığı, birim hacim ağırlık, kayma dalgası hızı değerleri girilmektedir. İkinci aşamada ise her bir tabakaya ait kayma gerilmesi değeri ile tabakanın kayma modülü-birim şekil değiştirme eğrisi ile sönümleme eğrilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sahaya özel örselenmemiş numuneler ile elde edilen eğriler manuel olarak programa tanıtılmıştır.



Şekil 5.24. DeepSoil programı arayüzü

Programa tanımlanan eğriler yapılacak analizlerde referans olarak kullanılmaktadır. Ayrıca program içerisinde zemin türüne göre farklı referans eğrilerde kullanılabilir. Bu aşamadan sonra uygun ivme kayıtları ile analizler yapılmaktadır.

5.6.1. Bölgeye Uygun Depremlerin Seçimi

Sahaya özel analizlerde seçilecek olan depremler, bölgenin depremsel özelliklerini yansıtması gerekmektedir. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacaktır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer

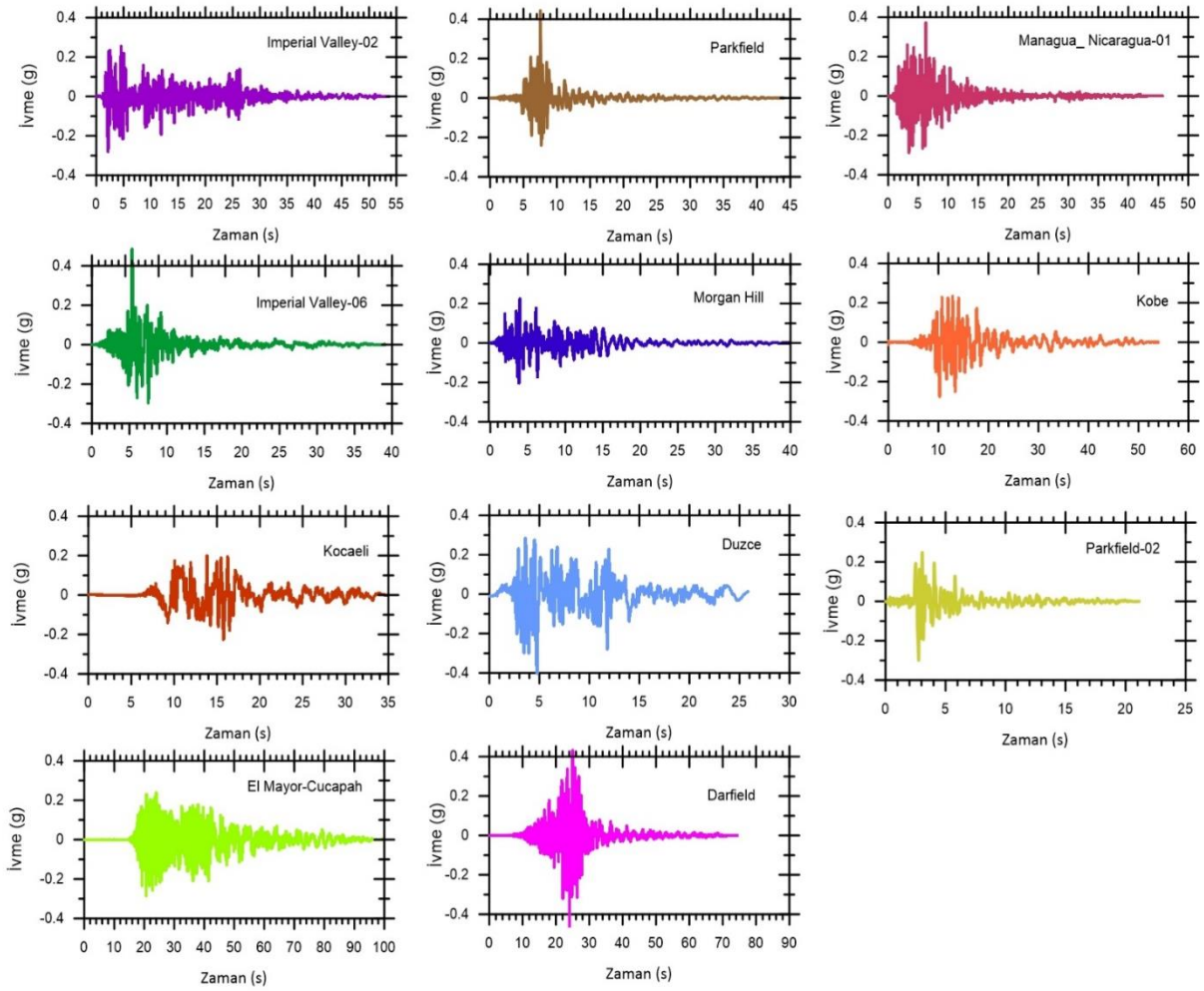
hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtların kullanılması gerekmektedir (TBDY, 2018).

Bu kapsamda Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından paylaşıma sunulan deprem ivme kayıtları incelenmiş ve 11 adet deprem ivme kaydı seçilmiştir. Yapılan tarama sonucunda on bir adet deprem seçilmiş ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

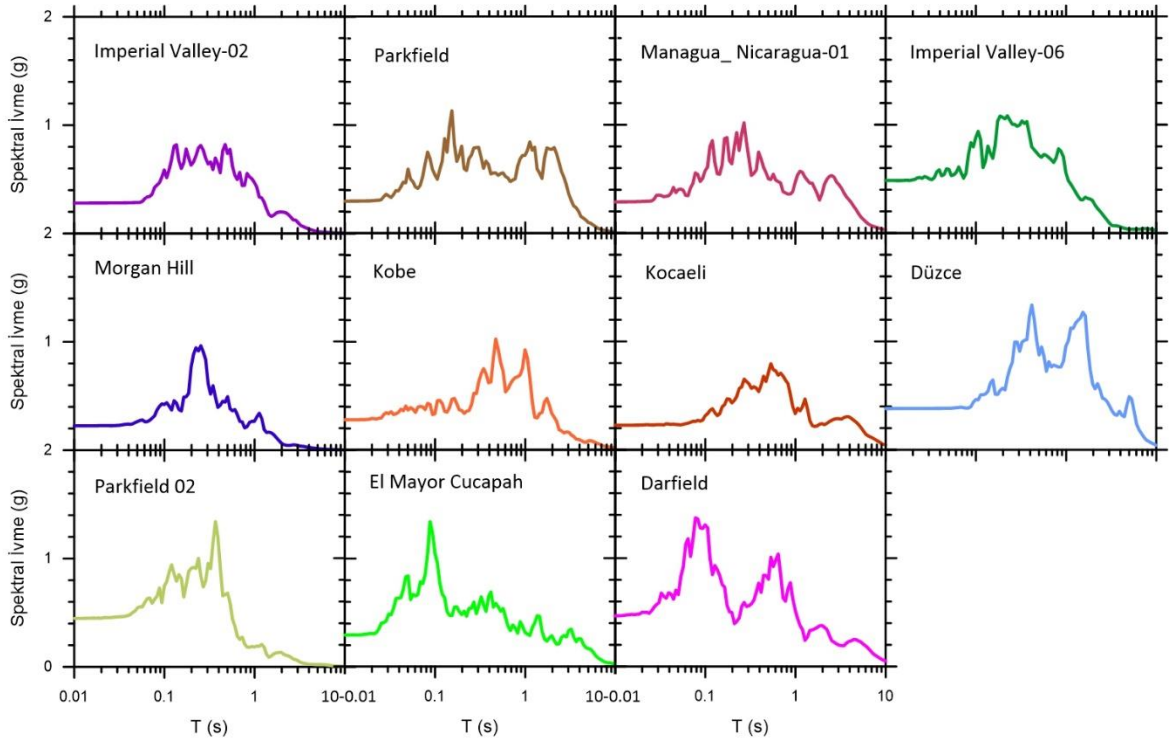
Çizelge 5.2. Seçilen depremler ve özellikleri

	Deprem	Yıl	İstasyon	Magnitüd (M)	Fay Tipi	PGA	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	Vs_{30} (m/sec)
1	"Imperial Valley-02"	1940	"El Centro Array #9"	6.95	Doğrultu atımlı	0.280	6.09	6.09	213.44
2	"Parkfield"	1966	"Cholame - Shandon Array #5"	6.19	Doğrultu atımlı	0.443	9.58	9.58	289.56
3	"Managua _ Nicaragua-01"	1972	"Managua _ ESSO"	6.24	Doğrultu atımlı	0.371	3.51	4.06	288.77
4	"Imperial Valley-06"	1979	"El Centro Array #4"	6.53	Doğrultu atımlı	0.484	4.9	7.05	208.91
5	"Morgan Hill"	1984	"Gilroy Array #4"	6.19	Doğrultu atımlı	0.224	11.53	11.54	221.78
6	"Kobe_ Japan"	1995	"Amagasaki"	6.9	Doğrultu atımlı	0.275	11.34	11.34	256.00
7	"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Yarimca"	7.51	Doğrultu atımlı	0.226	1.38	4.83	297.00
8	"Duzce_ Turkey"	1999	"Duzce"	7.14	Doğrultu atımlı	0.404	0	6.58	281.86
9	"Parkfield-02_ CA"	2004	"Parkfield - Cholame 4AW"	6.0	Doğrultu atımlı	0.302	4.81	5.53	283.38
10	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"CERRO PRIETO GEOTHERMAL"	7.2	Doğrultu atımlı	0.286	8.88	10.92	242.05
11	"Darfield_ New Zealand"	2010	"LINC"	7.0	Doğrultu atımlı	0.461	5.07	7.11	263.2

Seçilen depremler M:6.0 ve üzeri olarak sınıflandırıldığında seçilen 11 adet depremin ivme-zaman grafikleri Şekil 5.25'te ve bu depremlere ait spektral ivme değerleri Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Analizlerde kullanılacak olan ivme-zaman grafikleri



Şekil 5.26. Analizlerde kullanılacak olan ivmelerin spektral ivme-periyot grafikleri

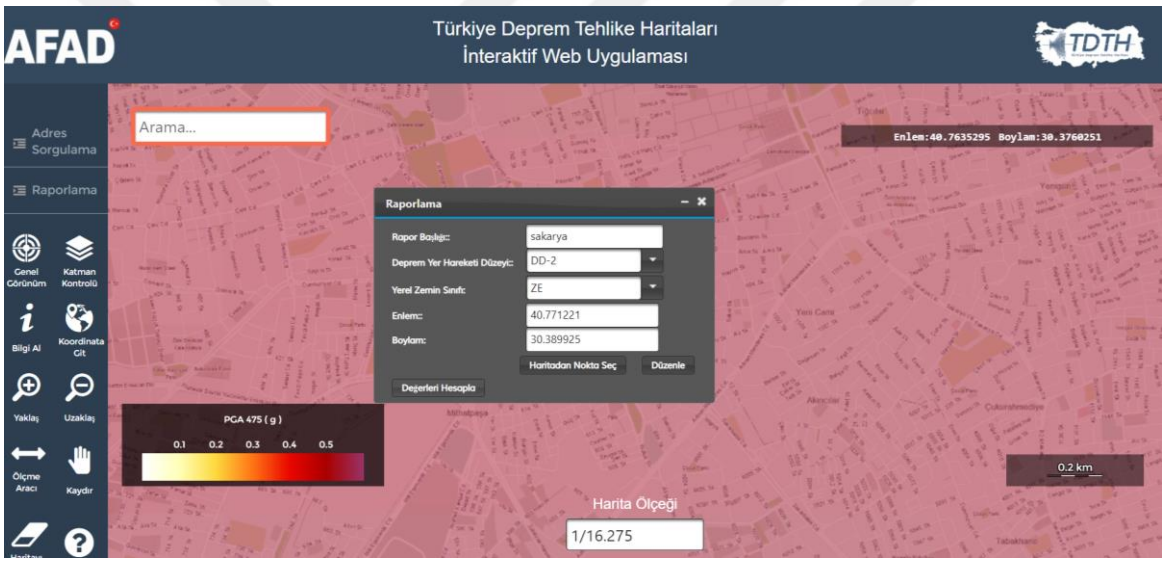
5.6.2. Seçilen Depremlerin Ölçeklendirilmesi

Sahaya özel analizlerde kullanılacak olan depremlerin öncelikle çalışma bölgesinin deprem karakteristiğine göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Deprem kayıtları tasarım spektrumuna uygun olacak şekilde iki farklı yöntem kullanılarak (zaman-tanım/frekans-tanım) ölçeklendirilebilir. Bu çalışmada iki yöntem ile ölçeklendirilme yapılmıştır.

Mühendislik alanında meydana gelen gelişmeler ile farklı yöntemler kullanılarak deprem kayıtları ölçeklendirilmektedir. Gerçek deprem kayıtları, zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında ölçekleme yöntemleri kullanılarak ölçeklenebilir. Zaman tanım alanındaki ölçekleme yöntemlerinde kaydın frekans içeriği değiştirilmeksizin sadece kaydın genliği ile değiştirilir. Frekans tanım alanındaki ölçekleme yöntemlerinde ise tasarım ivme spektrumuna bir eşlik bulmak için yer hareketi kaydının frekans içeriği değiştirilir. Ölçeklendirilecek olan deprem ivme kayıtları üç farklı yöntem ile temin edilebilir. Bunlar; yapay deprem kayıtları, simüle edilmiş kayıtlar ve gerçek deprem kayıtlarıdır (Özdemir ve

Fahjan, 2007; Fahjan, 2008). Farklı yönetmeliklerin belirlediği sismolojik şartlara uyan depremler ile ölçeklendirme yapılarak deprem ivme kayıtları elde edilmekte ve yapılara olan zemin büyütme etkileri üzerine farklı çalışmalar yapılmaktadır (Alielahi ve Adampira, 2016; Arslan ve diğ., 2018; Ebrahimi Motlagh ve Rahai, 2017; Rodrigues ve diğ., 2018).

TBDY 2018'e göre seçimi yapılan deprem ivme kayıtlarının kullanılabilmesi için basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu kapsamda AFAD tarafından kullanıcılara sunulan interaktif web uygulaması ile koordinatları işaretlenen bölge için önerilen zemin davranış spektrumu elde edilmektedir (Şekil 5.27).



Şekil 5.27. AFAD interaktif web uygulaması

Çalışma bölgesi için yönetmeliğin önerdiği saha bilgileri (anakaya) aşağıda verilmiştir. Ayrıca bölgeye önerilen yatay ve düşey elastik tasarım spektrum grafikleri Şekil 5.28'de verilmiştir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi: DD-2 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi,

S_S = 1.695 S_1 = 0.463 S_{DS} = 1.356 S_{D1} = 0.370

PGA = 0.689 PGV = 57.511

S_S : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz],

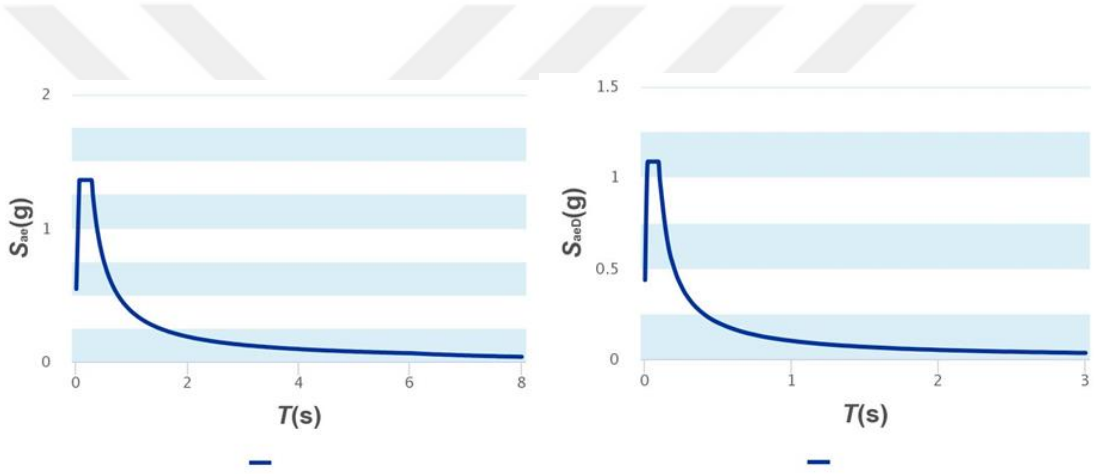
S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz],

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz],

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz],

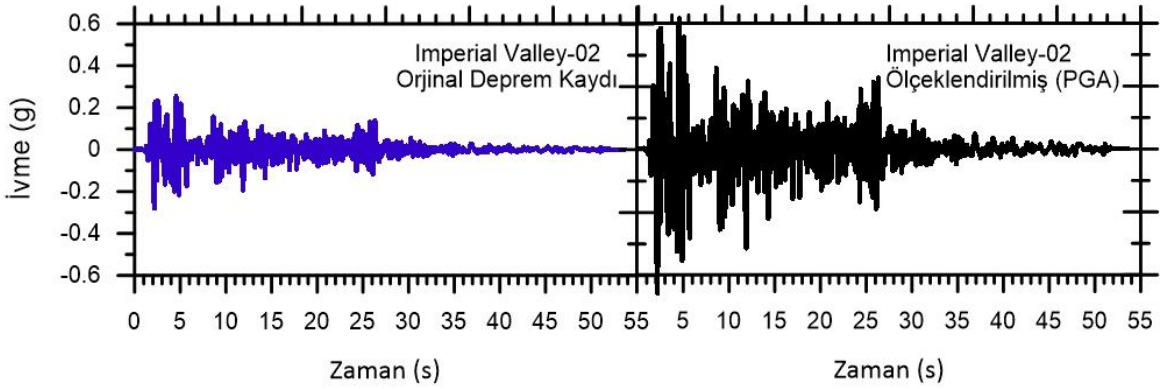
PGA : En büyük yer ivmesi [g],

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn].



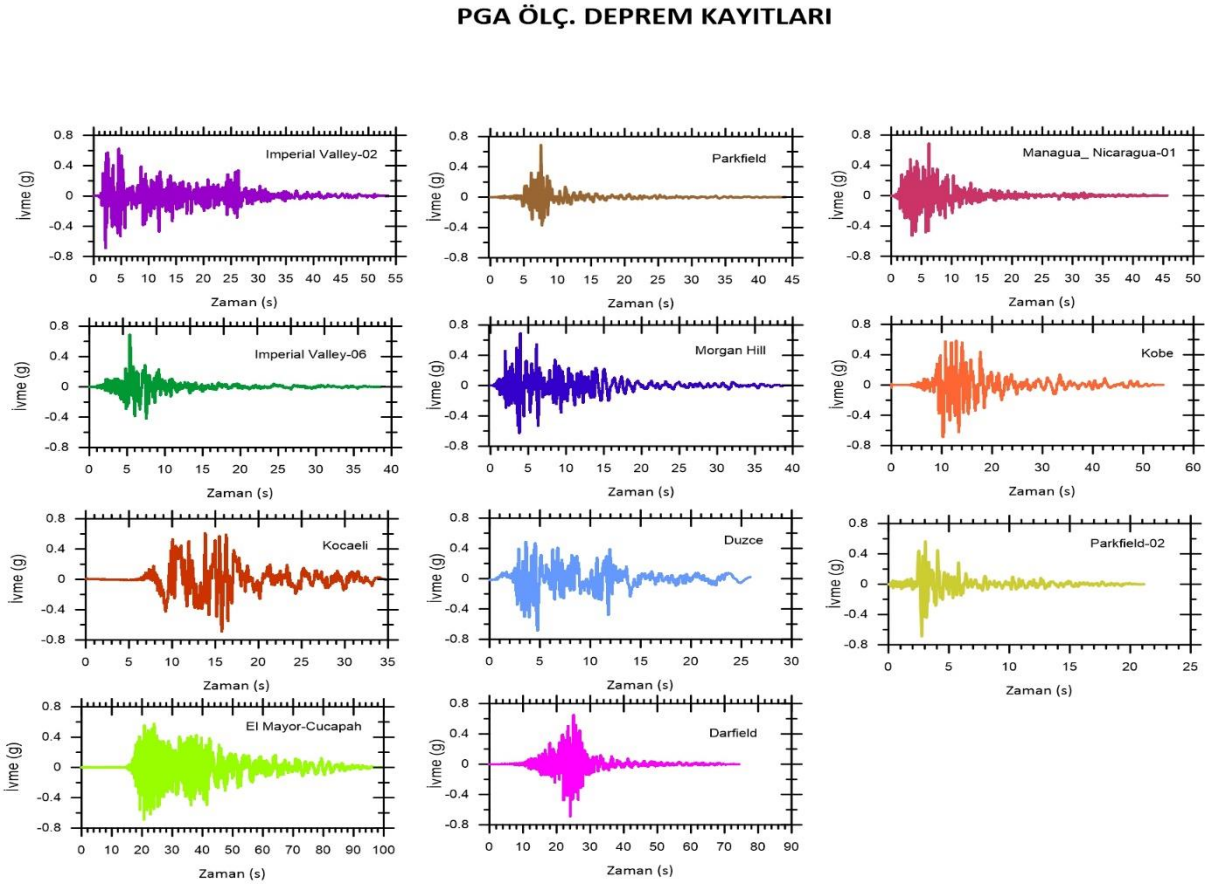
Şekil 5.28. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu ve Düşey Elastik Tasarım Spektrumu (Afad, 2021)

Basit ölçeklendirme yönteminde bölgenin PGA değeri baz alınarak zaman tanım alanında ölçeklendirme yapılmaktadır. Bu çalışmada tüm deprem ivme kayıtları öncelikle zaman tanım alanında PGA değerine göre basit ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme sonucunda yüzey kayıtlarının genliklerinde değişim meydana gelmiştir. Şekil 5.29'da görüleceği üzere Imperial Valley-02 depremine ait yüzey kaydında meydana gelen değişim gösterilmiştir.

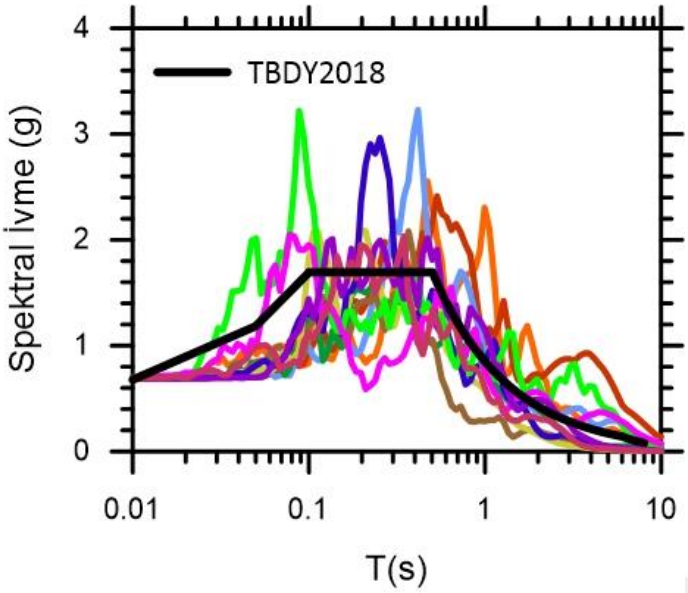


Şekil 5.29. Basit ölçeklendirme sonucunda ivme kaydında meydana gelen değişim

Analizlerde kullanılacak olan tüm deprem ivme kayıtları zaman tanım alanında ölçeklendirilmiş ve Şekil 5.30'da ve bu depremlere ait 0.689g'den başlayan spektral ivme grafikleri de Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



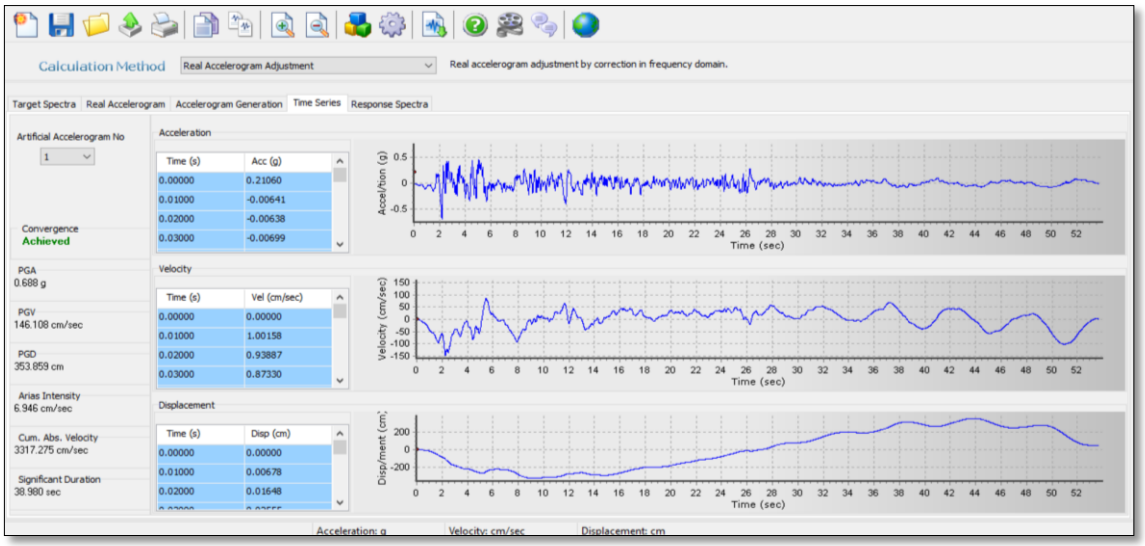
Şekil 5.30. Basit ölçeklendirme yöntemine göre (PGA) ölçeklendirilen ivme kayıtları



Şekil 5.31. Zaman tanım alanında ölçeklendirilen deprem ivmelerinin spektral ivme değerleri

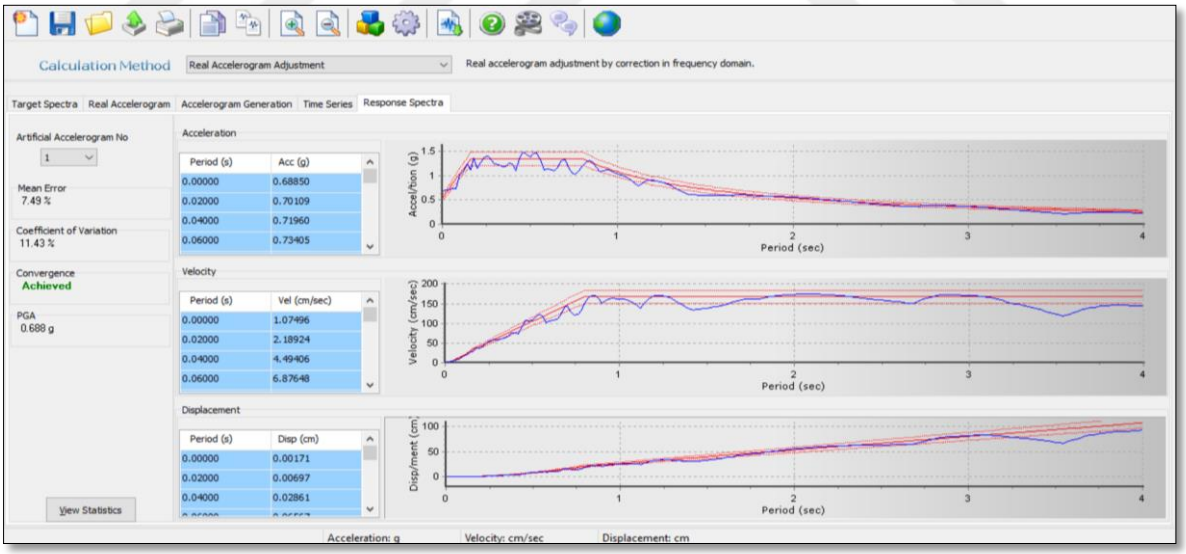
Frekans tanım alanındaki ölçekleme yöntemlerinde ise tasarım ivme spektrumuna uygun olacak şekilde ölçeklendirme işlemi yapılmaktadır. TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfına göre her bir deprem ivme kaydı ölçeklendirilmiştir. Bu aşamada Seismoartif 2018.4.1. Akademik versiyon programı kullanılmıştır.

Programa öncelikle Imperial Valley-02 depremi tanıtılmıştır. Bu işlem ile birlikte sahanın spektral ivmesi tanıtıldıktan sonra ölçeklendirme yapılmıştır (Şekil 5.32).



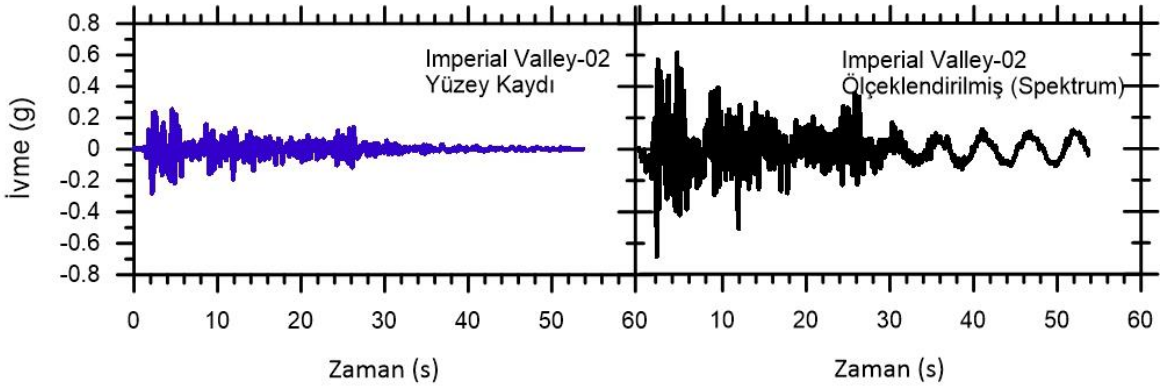
Şekil 5.32. Imperial Valley-02 depreminin Seismoartif programına tanıtılması

Çalışma bölgesinin spektral ivmesine göre frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme Şekil 5.33'de gösterilmiştir.



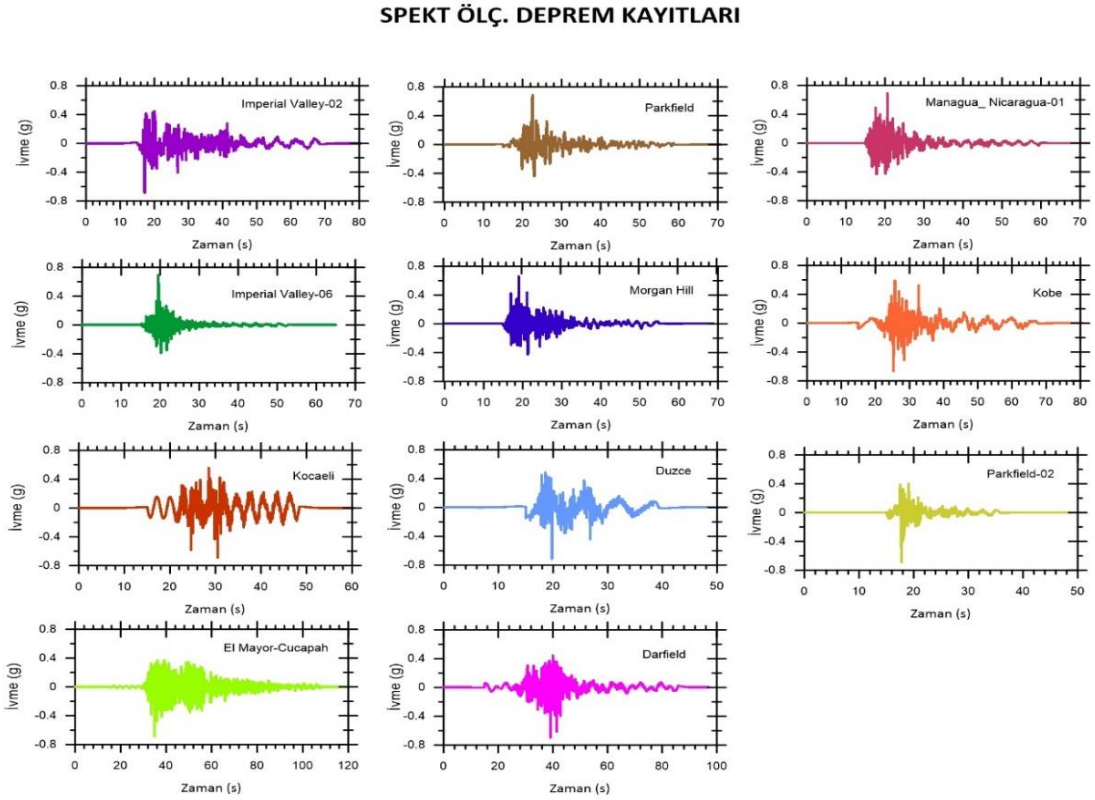
Şekil 5.33. Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme

Yapılan ölçeklendirme sonucunda Imperial Valley-02 depremine ait frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme Şekil 5.34'de gösterilmiştir.

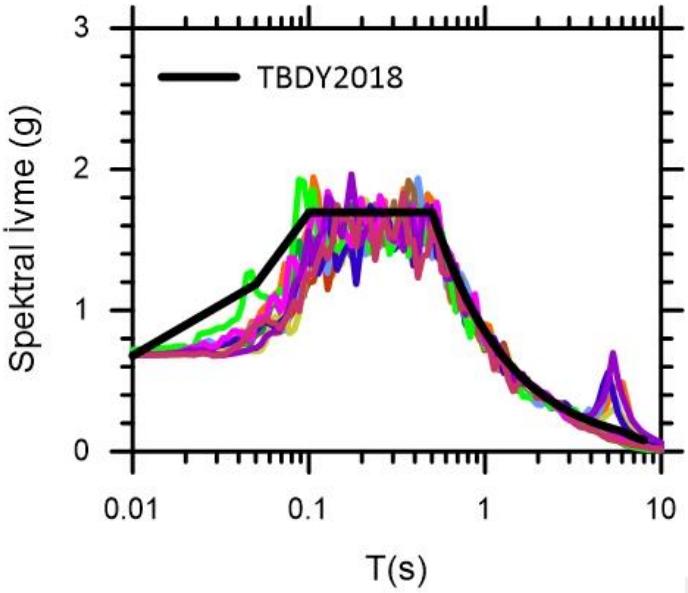


Şekil 5.34. Yapılan ölçeklendirme sonucunda ivme kaydında meydana gelen değişim

Analizlerde kullanılacak olan tüm deprem ivme kayıtları ölçeklendirilmiş ve Şekil 5.35'te ve bu depremlere ait spektral ivme grafikleri ise Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.35. Frekans tanım alanında ölçeklendirme yöntemine göre (SPEKTRAL) ölçeklendirilen ivme kayıtları



Şekil 5.36. Frekans tanım alanında ölçeklendirilen deprem ivmelerinin spektral ivme değerleri

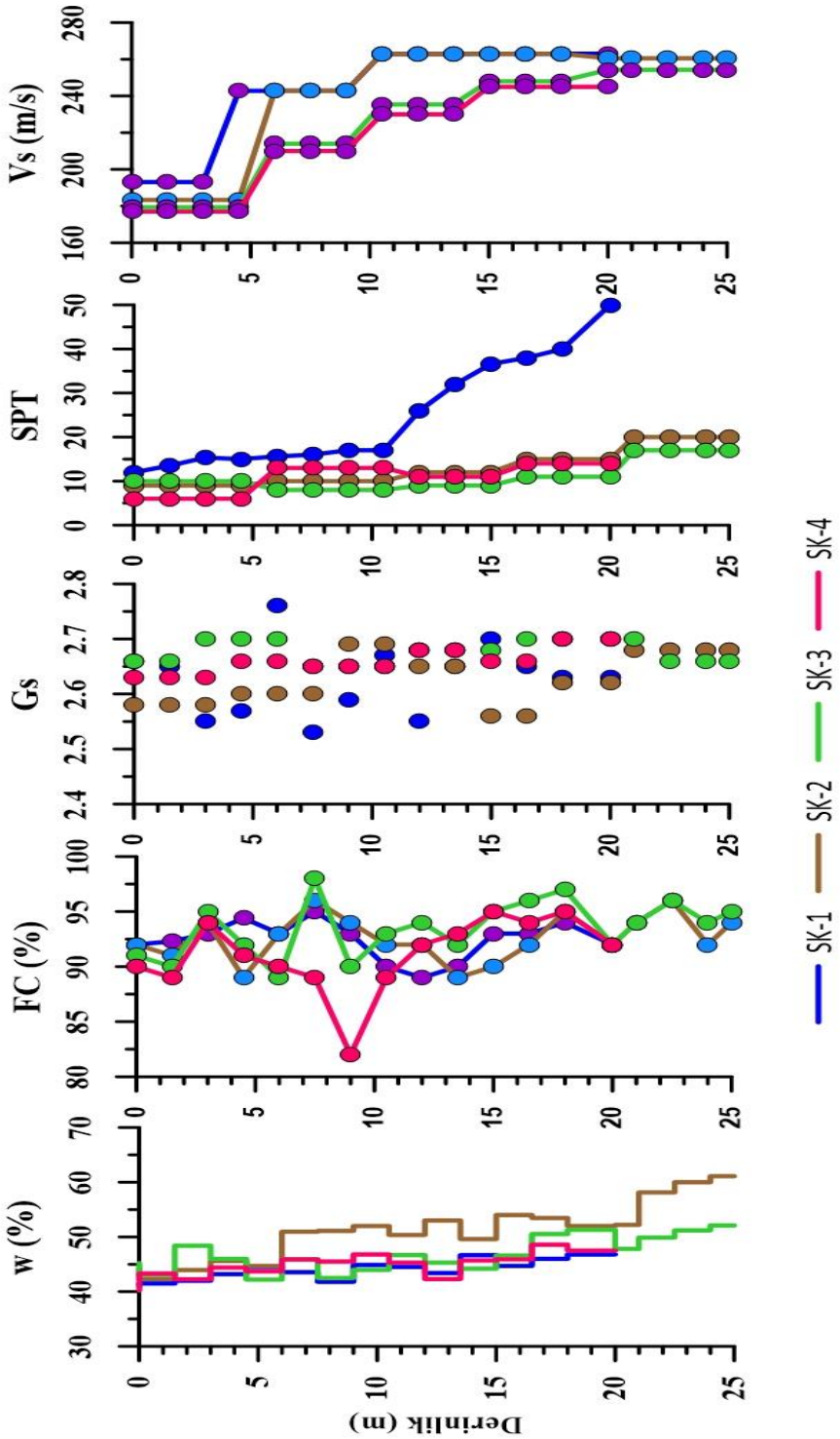
5.6.3. DeepSoil V6.1. ile 1D Boyutunda Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması

Zeminlerin sahaya özel yapılan zemin büyütme analizleri için deprem bölgesinde yapılan sondaj çalışmaları sonucunda elde edilen örselenmemiş numuneler ve sahanın depremsellik özelliklerini yansıtan deprem ivme kayıtlarının seçilmesi ve farklı ölçeklendirmelerin yapılmasından sonra Deepsoil programı ile 1D boyutunda zemin büyütme analizleri yapılmıştır.

DeepSoil programına, her sondaj kuyusundaki tabakalar belirlendikten sonra Çizelge 5.3'deki ve Şekil 5.37'de gösterilen parametreler tanımlanmıştır. Daha önce ölçeklendirmeleri yapılan deprem ivme kayıtları ile toplam 88 adet zemin büyütme analizi yapılmıştır.

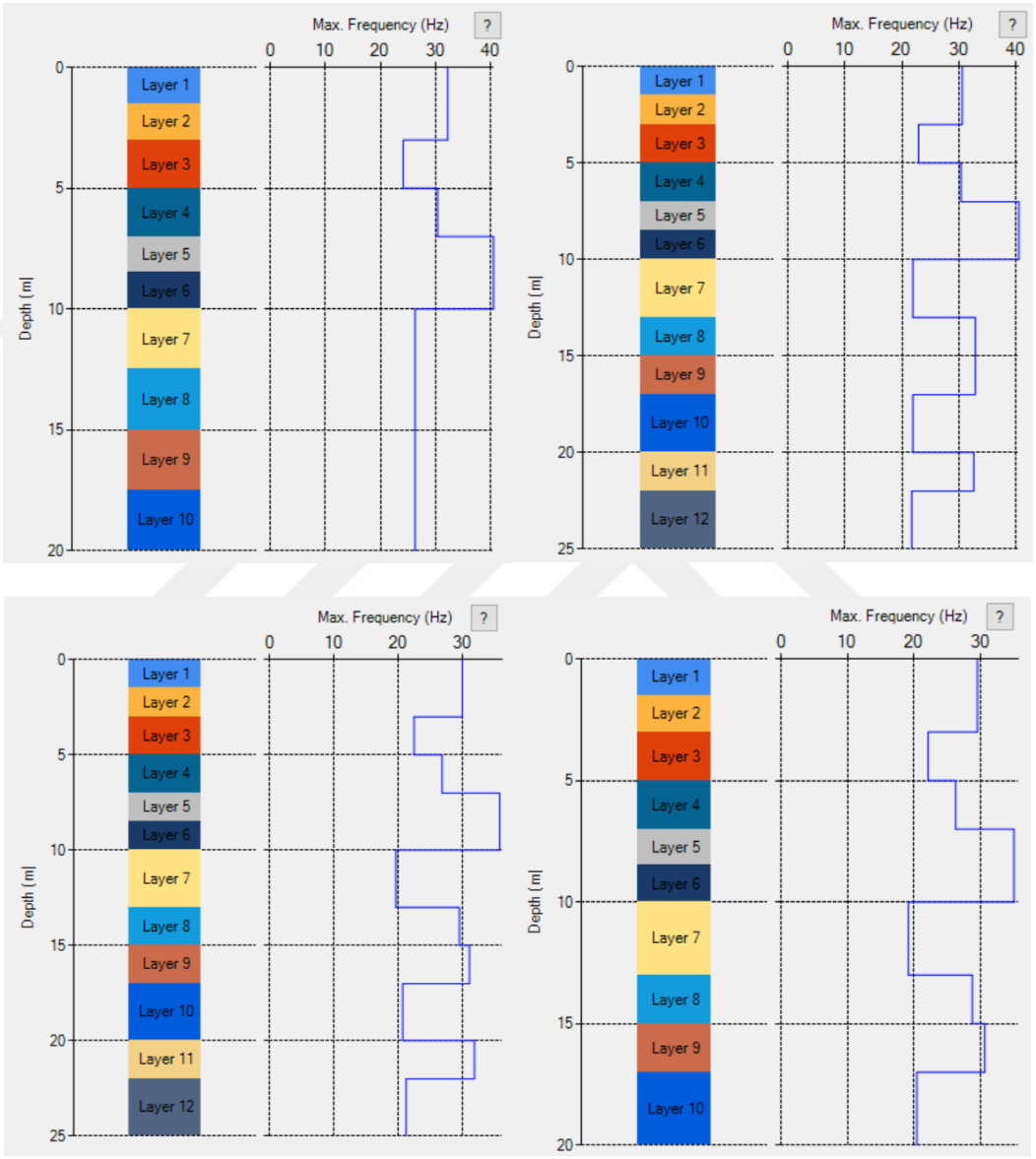
Çizelge 5.3. Analizleri yapılan sondaj kuyuları

SK No	Örselenmemiş Numune No	Tabaka No	Tabaka Kalınlığı (m)	w_n (%)	C_u (kPa)	PI (%)	Zemin Türü
SK-1	UD-1	*Tabaka-1*	1.50	41.48	50	17	ML
		Tabaka-2	1.50				
		Tabaka-3	2.00				
	UD-2	*Tabaka-4*	2.00	43.56	60	19	MH
		Tabaka-5	1.50				
		Tabaka-6	1.50				
	UD-3	*Tabaka-7*	2.50	44.53	65	34	CH
		Tabaka-8	2.50				
	UD-4	*Tabaka-9*	2.50	46.00	90	37	CH
		Tabaka-10	2.50				
SK-2	UD-1	*Tabaka-1*	1.50	43.95	40	9	CL
		Tabaka-2	1.50				
		Tabaka-3	2.00				
	UD-2	*Tabaka-4*	2.00	50.95	40	12	CL
		Tabaka-5	1.50				
		Tabaka-6	1.50				
	UD-3	*Tabaka-7*	3.00	50.35	45	16	MH
		Tabaka-8	2.00				
	UD-4	*Tabaka-9*	2.00	53.46	70	24	CH
		Tabaka-10	3.00				
	UD-5	*Tabaka-11*	2.00	58.13	70	27	CH
		Tabaka-12	3.00				
SK-3	UD-1	*Tabaka-1*	1.50	48.40	40	10	ML
		Tabaka-2	1.50				
		Tabaka-3	2.00				
	UD-2	*Tabaka-4*	2.00	45.92	40	16	CL
		Tabaka-5	1.50				
		Tabaka-6	1.50				
	UD-3	*Tabaka-7*	3.00	46.68	40	19	MH
		Tabaka-8	2.00				
	UD-4	*Tabaka-9*	2.00	50.52	40	21	MH
		Tabaka-10	3.00				
	UD-5	*Tabaka-11*	2.00	49.89	60	28	CH
		Tabaka-12	3.00				
SK-4	UD-1	*Tabaka-1*	1.50	42.24	30	7	ML
		Tabaka-2	1.50				
		Tabaka-3	2.00				
	UD-2	*Tabaka-4*	2.00	45.88	40	10	ML
		Tabaka-5	1.50				
		Tabaka-6	1.50				
	UD-3	*Tabaka-7*	3.00	45.30	40	14	CL
		Tabaka-8	2.00				
	UD-4	*Tabaka-9*	2.00	48.58	50	16	ML
		Tabaka-10	3.00				



Şekil 5.37. Zeminlere ait parametreler

Belirlenen tabakalanmaların ardından Şekil 5.38'te görüleceği üzere zemin parametrelerinin girilmesi ile sahaya özel elde edilen kayma modülü azalım eğrisi ve sönümleme eğrileri de programa manuel olarak tanıtılmıştır.



Şekil 5.38. Zemin profillerinin programa tanıtılması

Programa tanıtılan tabaka kalınlıkları belirlenirken frekans değeri önemlidir. Literatürde uygun frekans seçimi yapılmalıdır. Hudson vd. (1994) yılında şunu amaçlamışlardır, tüm zemin katmanının temel frekansı anakayadan giriş frekansına eşitlenmesi gerekmektedir. Zemin katmanının temel frekansı, en önemli zemin büyütmenin

olacağı frekans olarak tanımlanmaktadır. Buna göre aşağıda belirtilen formül ile tabaka hesaplanmaktadır;

$$f = \frac{V_s}{4H} \tag{5.5}$$

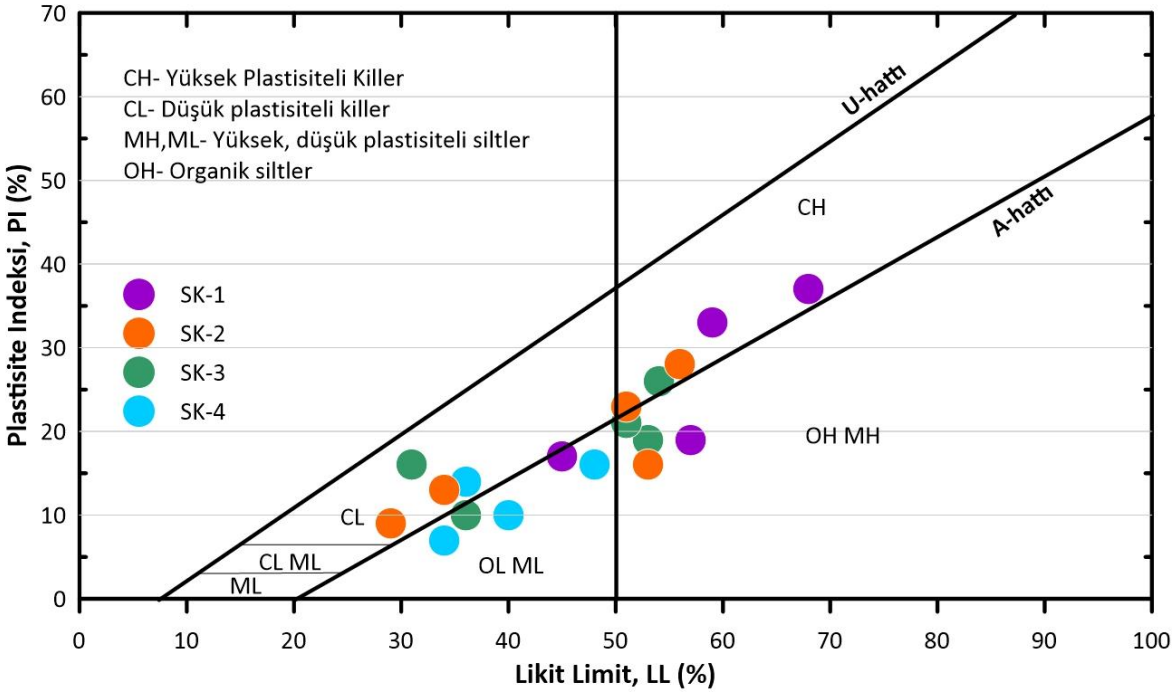
Burada V_s kayma dalgası hızı, H tabaka kalınlığı olarak belirlenmiştir. Depremin Fourier spektrumu ile formülden elde edilen değer değerlendirilmelidir. Burada toplam tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızı ile elde edilen frekans ve Fourier spektrumu karşılaştırılmalı ve aralık belirlenmelidir.

Bölgeden elde edilen veriler ve seçilen deprem kayıtları ile sahaya özel yapılan zemin büyütme analizlerinin ardından programdan elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

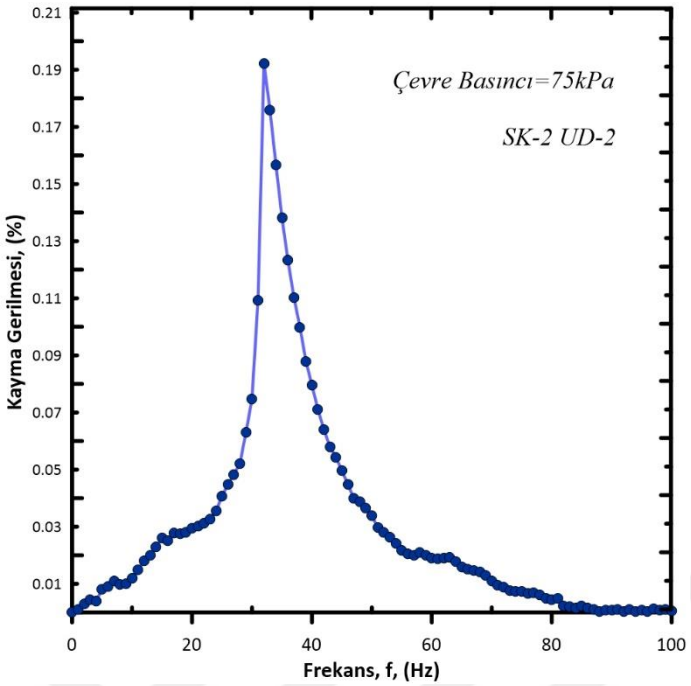
6.1. Örselenmemiş Numunelerin Dinamik Özellikleri

Saha çalışması sonrasında elde edilen örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan tanımlama deneyleri sonucunda her bir kuyudan elde edilen numuneler plastisite kartı üzerinde Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Genel olarak numunelerin A hattı üzerine yerleşmiş olduğu görülmektedir.



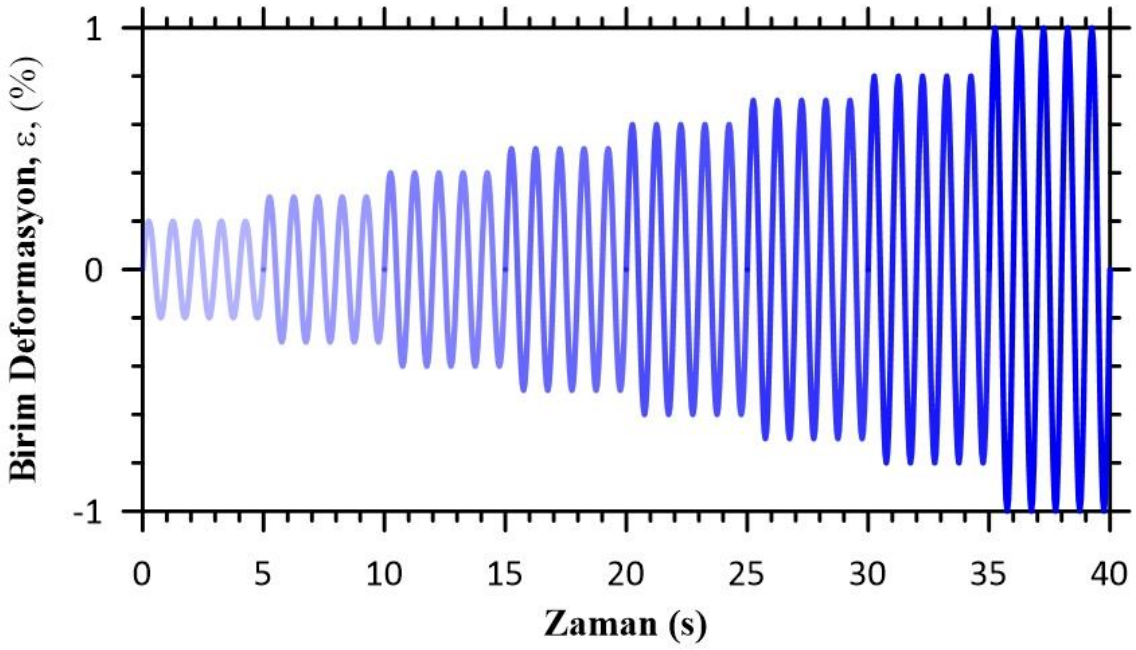
Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan numunelerin plastisite kartı üzerinde gösterimi

Daha sonra yapılan dinamik üç eksenli ve rezonant kolon deneyleri için belirlenen program ile yapılan analizler sonucunda her 5m için zemin tabakalarının dinamik parametreleri elde edilmiştir. Yapılan RC deneylerinde Şekil 2'ye bakıldığında Sk-2 UD-2 numunesine ait rezonans frekans grafiği görülmektedir.



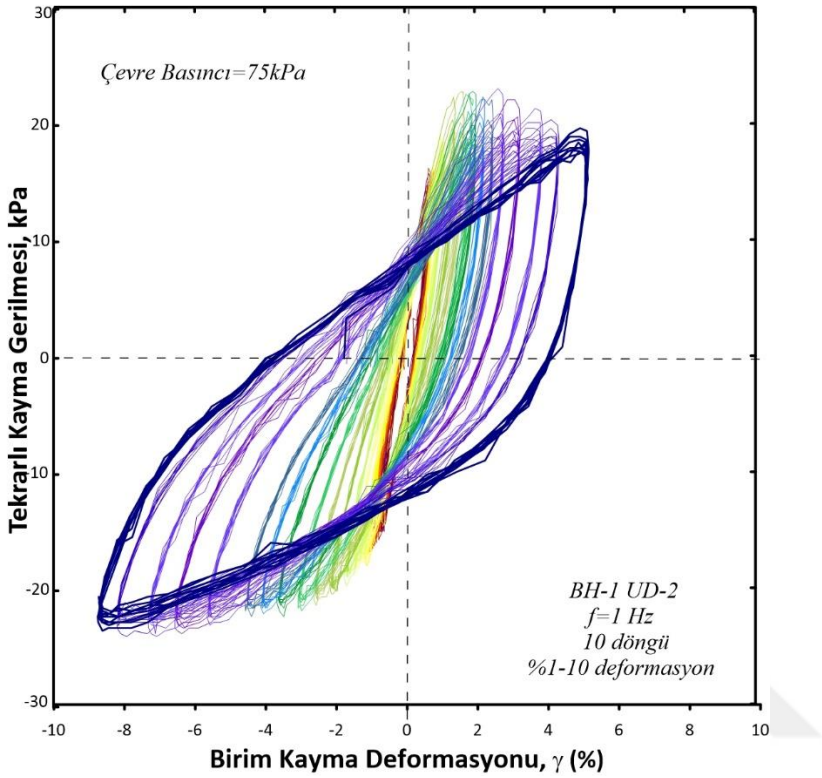
Şekil 6.2. Sk-2 UD-2 numunesine ait rezonans frekans grafiği

Dinamik üç eksenli deney sistemlerinde numuneye yapılan yükleme sinüs dalgası yüklemesi Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. TRX deneylerinde kullanılan yükleme tipi

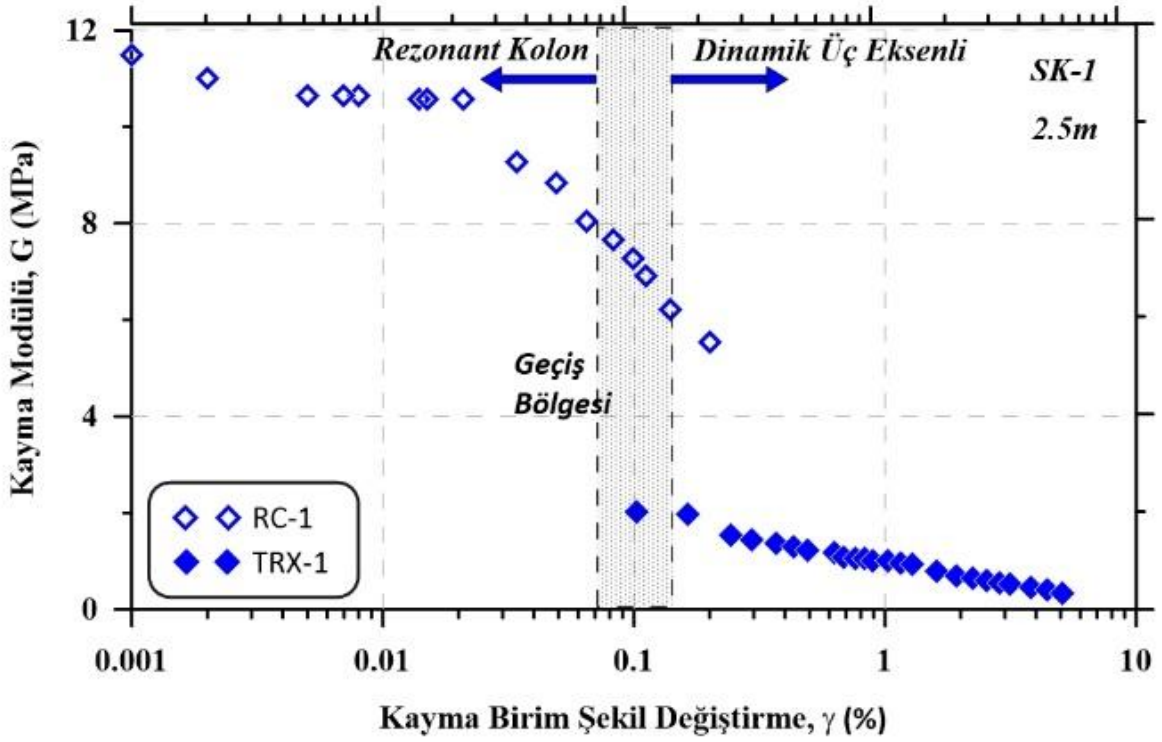
Dinamik üç eksenli deneylerde yapılan %1-10 deformasyon arasında yapılan Sk-1 Ud-2 numunesine ait histerezis eğrileri Şekil 6.4'de gösterilmektedir.



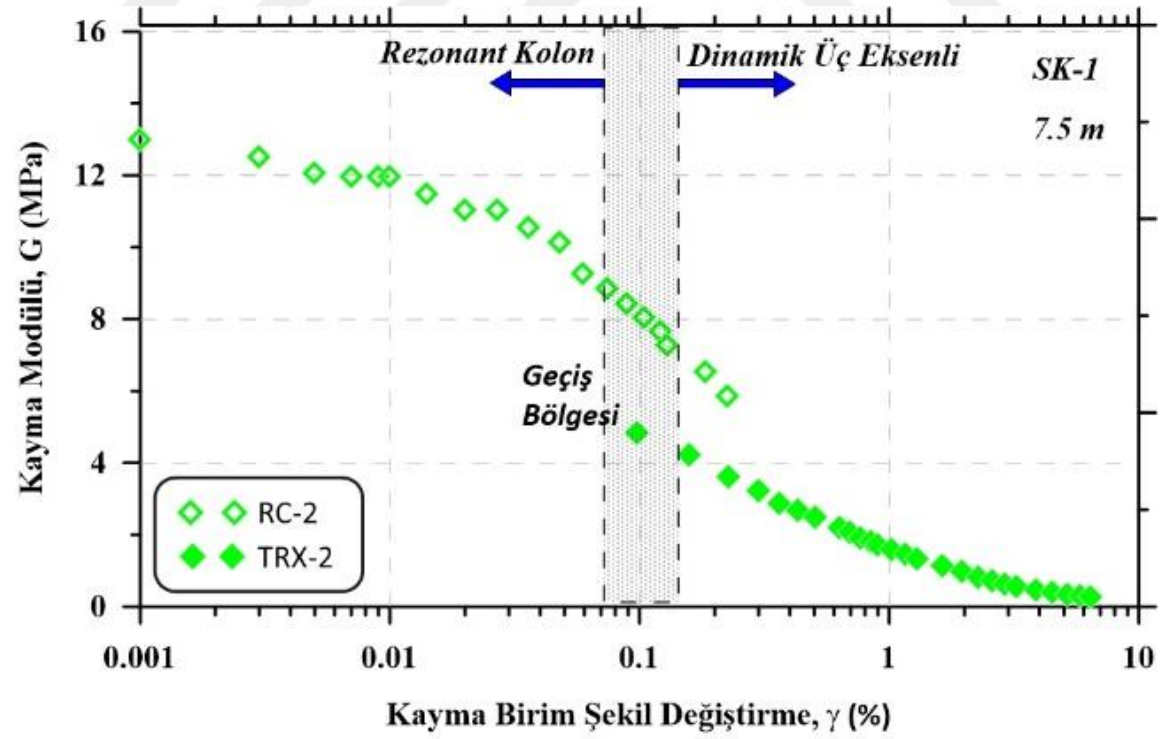
Şekil 6.4. Dinamik üç eksenli deney sisteminde elde edilen histerezis eğrileri

Yapılan bu dinamik deneyler sonucunda bölgenin dinamik özelliklerini yansıtan kayma modülü-birim şekil değiştirme ve sönümleme oranı eğrileri elde edilmiştir. Sk-1 sondaj kuyusunda her iki deney sisteminden elde edilen kayma modülü değerlerinde geçiş bölgesi olduğu görülmüştür. Her 5m'de elde edilen veriler değerlendirildiğinde iki deney sonuçlarının %0.1 geçiş bölgesinde derinliğe bağlı olarak daha da yakınlaştığı ve eğrinin çevre basıncı ile daha net elde edildiği görülmektedir.

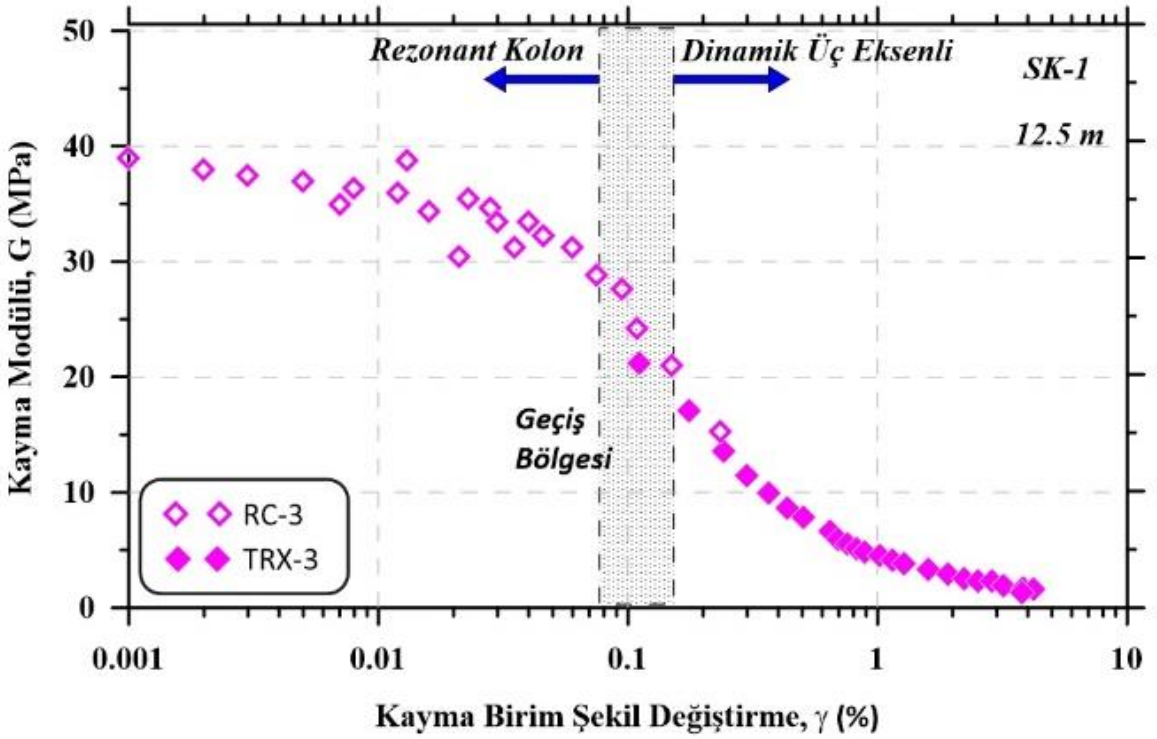
Şekil 6.5'te 0-5m arasında RC ve TRX deney sonuçlarına bakıldığında maksimum kayma modülü 12 MPa civarında olduğu, geçiş bölgesinde iki deney arasında fark olduğu görülmektedir. Şekil 6.6'da 5-10 m arasında yapılan deneylerde ise maksimum kayma modülü değerinin 13MPa değerinde olduğu ve geçiş bölgesinde kapanma meydana gelmiştir. Şekil 6.7 ve 6.8 incelendiğinde geçiş bölgesinin tamamen kapanmış olduğu ve iki deney sonuçlarının net bir şekilde birleştiği görülmektedir.



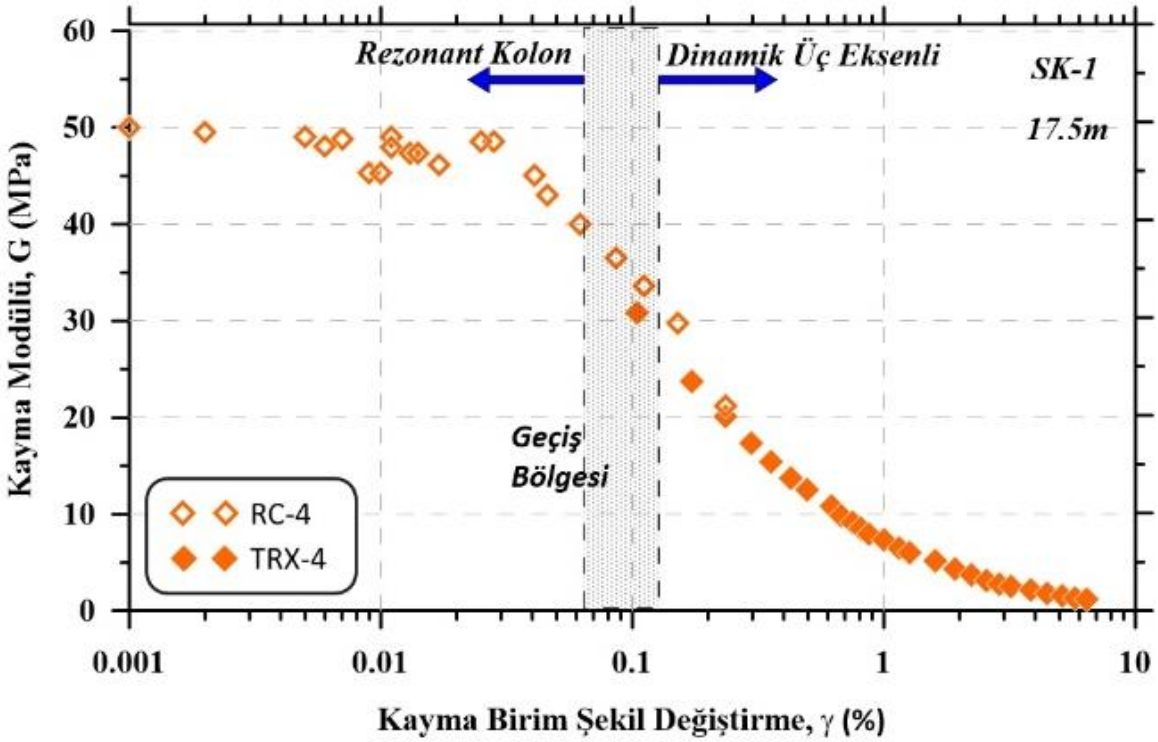
Şekil 6.5. Sk-1 sondaj kuyusuna 2.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları



Şekil 6.6. Sk-1 sondaj kuyusuna 7.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları



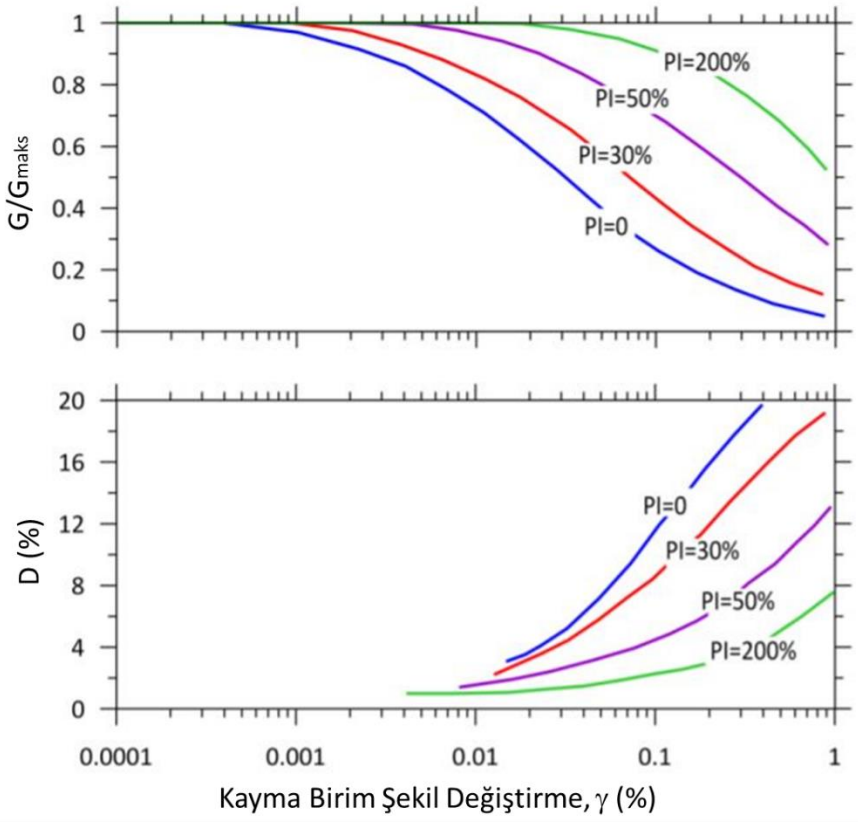
Şekil 6.7. Sk-1 sondaj kuyusuna 12.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları



Şekil 6.8. Sk-1 sondaj kuyusuna 17.5m'ye ait RC ve TRX deney sonuçları

Sk-1 sondaj kuyusunda kayma modülü değerleri derinliğe bağlı olarak artmaktadır. Bu değerler öncelikle modül azalım eğrilerine dönüştürülmüştür. Her bir sondaj kuyusunda elde edilen veriler analiz programına tanıtılmıştır.

Deney sonuçları literatürde yaygın olarak kullanılan üç adet referans model ile karşılaştırılmıştır. Vucetic ve Dobry 1991, Darendeli 2001 ve Amir-Faryar vd. 2016 tarafından önerilen referans eğriler ile sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı PI değerlerine göre önerilen model Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Ayrıca Darendeli (2001) modelinde 20 farklı alandan alınan 110 numune ile RC+TS deneyleri yapılmıştır. Amir-Faryar vd. (2016) ise evrensel iki matematiksel çalışma sonucunda model önerilmiştir. Bu modellere ait bilgiler Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

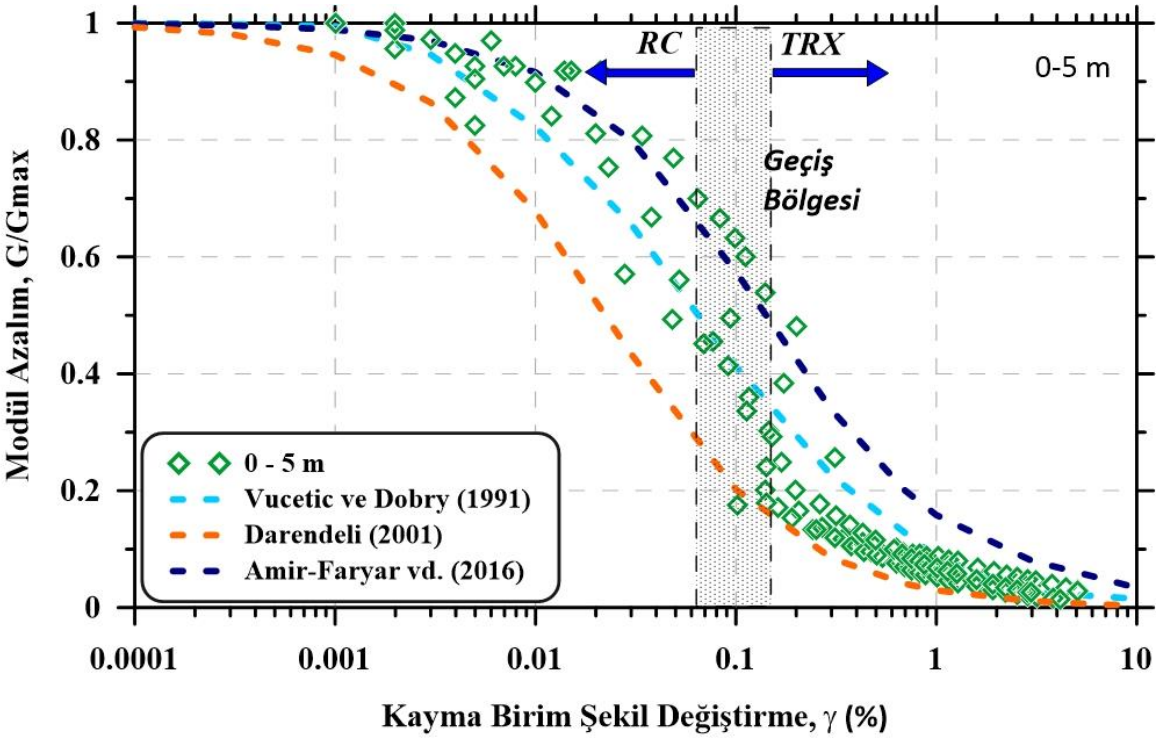


Şekil 6.9. Farklı PI değerleri ait Vucetic ve Dobry (1991) modeli (Stewart vd. 2014)

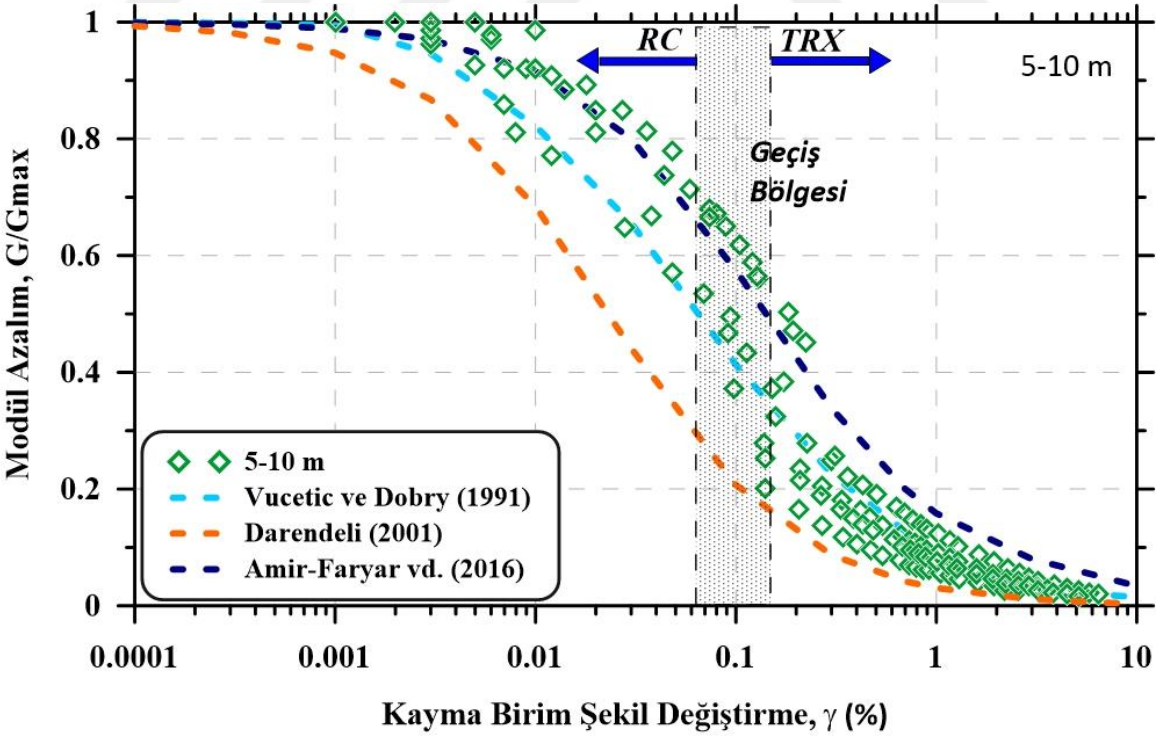
Çizelge 6.1. Referans modeller

Kayma Modülü	$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a}$	*20 farklı alandan 110 numune ile RC+TS deneyleri yapılmıştır.*	*Darendeli (2001)*
Sönümleme	$D_{Masing} = c_1 D_{Masing,a=1.0} + c_2 D_{Masing,a=1.0}^{\ 2} + c_3 D_{Masing,a=1.0}^{\ 3}$, $D_{Masing,a=1.0} = \frac{1}{\Pi}\left[4\frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma+\gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma+\gamma_r}} - 2\right]$,		
Kayma Modülü	FC = 0.0% $\frac{G}{Gmax} = \frac{1}{1+6.141\gamma^{0.9122}e^{(-0.1546\gamma+0.00983\gamma^2)}}$	*Evrensel iki matematisel model kullanılmıştır.*	*Amir-Faryar vd. (2016)*
Sönümleme	FC = 0% $D(\%) = \left[\left(12.13e^{0.795log_{10}\gamma}\right) \times \left(\log_{10}(\gamma+4.646)\right)^{-1.158}\right] - 0.455$		

Deney sonuçları incelendiğinde, Şekil 6.10'da 0-5m aralığında TRX deney sonuçlarının Darendeli 2001 referans eğrisine daha yakın sonuçlar elde edildiği ancak RC deney sonuçlarının ise Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.11'de 5-10m aralığında TRX deney sonuçlarının Vucetic ve Dobry 1991 referans eğrisi üzerine denk gelirken, RC deney sonuçları Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerine yatkın olduğu görülmektedir.

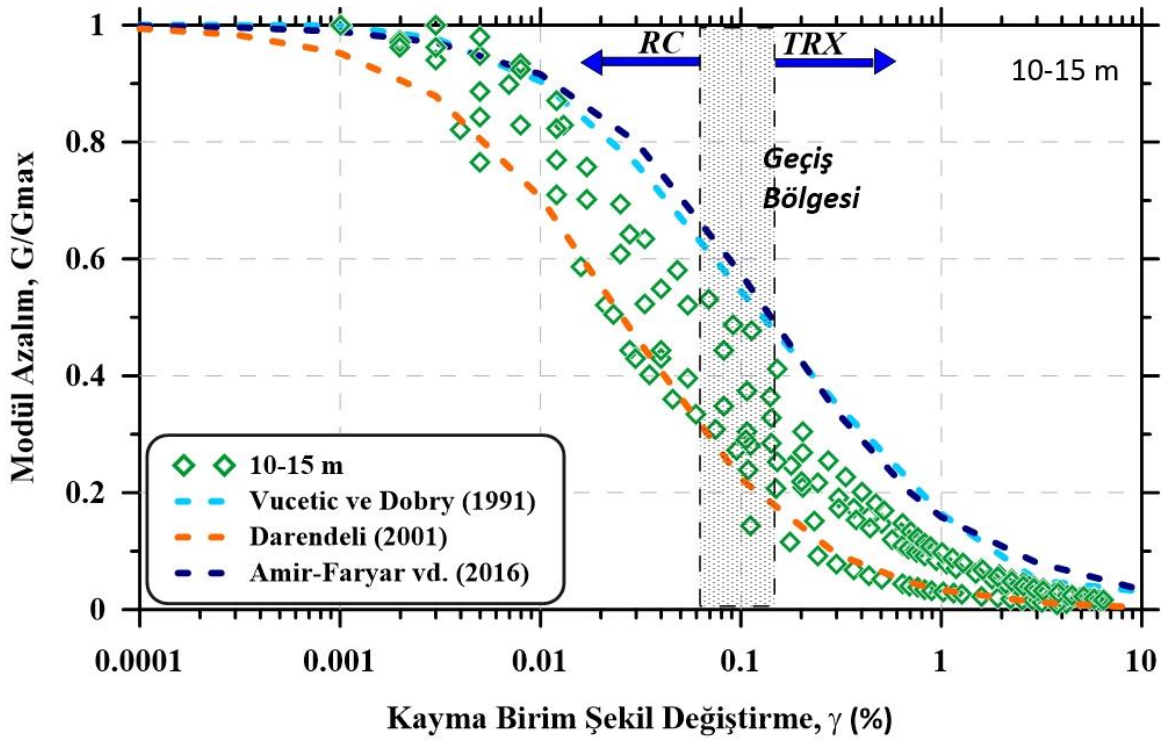


Şekil 6.10. 0-5m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller

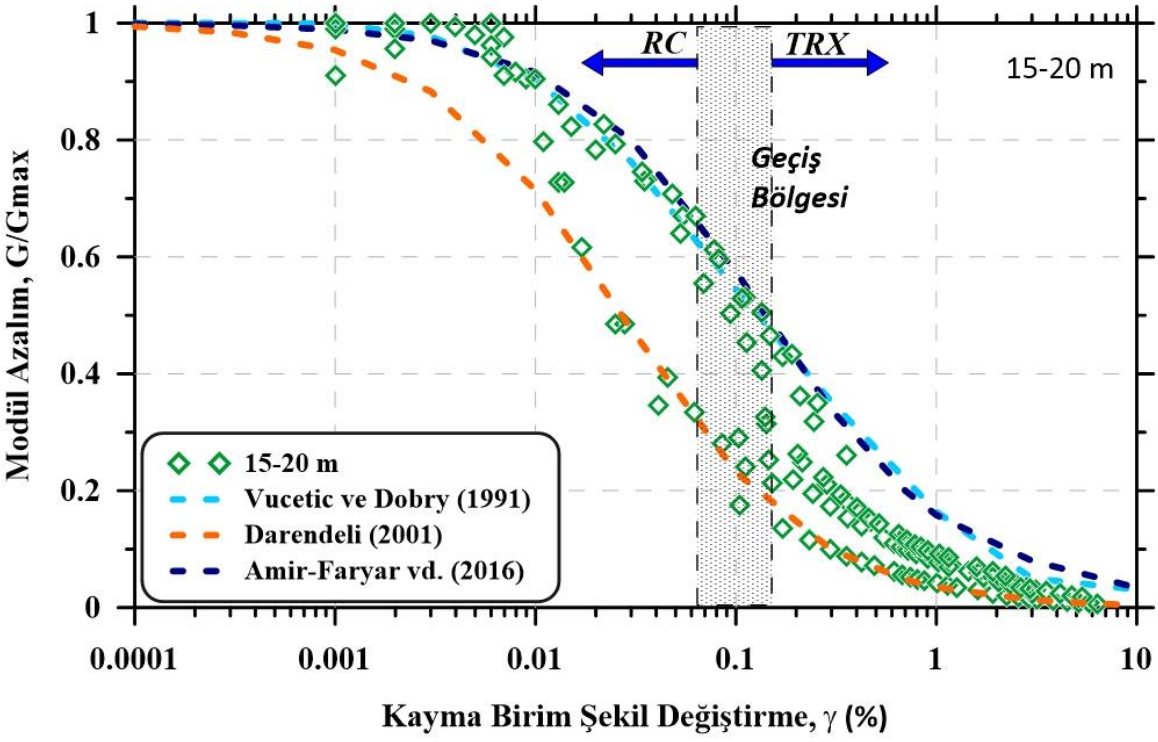


Şekil 6.11. 5-10m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller

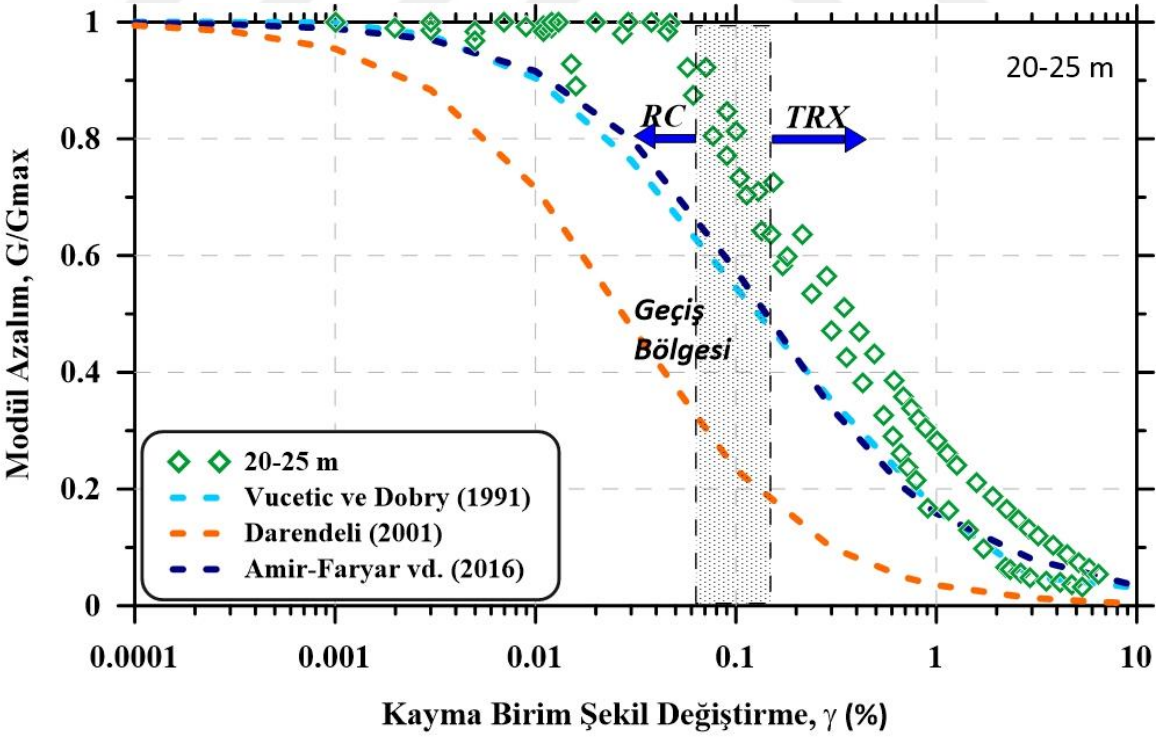
Şekil 6.12'de 10-15m aralığında Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerinin benzer davranış gösterdiği tüm deney sonuçlarının Darendeli 2001 ile diğer eğrilerin arasında davranış gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 6.13'de 15-20m aralığında TRX deney sonuçlarının Darendeli 2001 referans eğrisine yakın olduğu RC deney sonuçlarının ise Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerine benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Şekil 6.14'de 20-25m aralığında ise tüm deney sonuçlarının referans eğrilerden daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 6.12. 10-15m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller

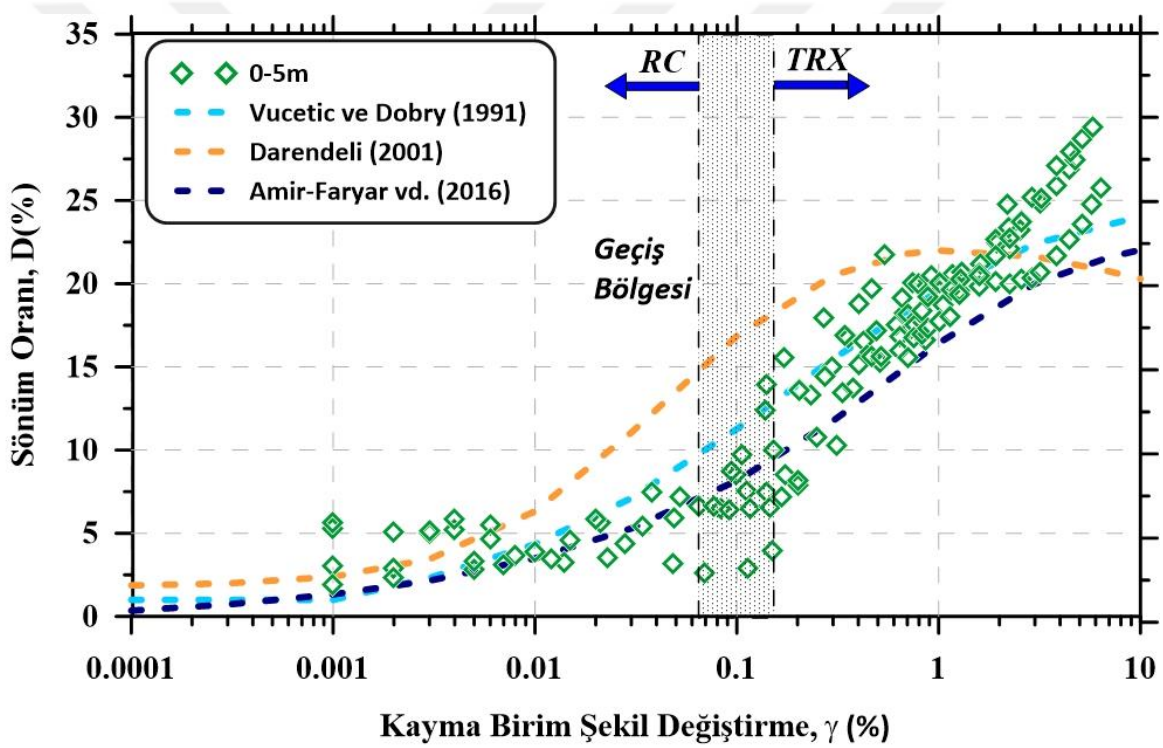


Şekil 6.13. 15-20m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller

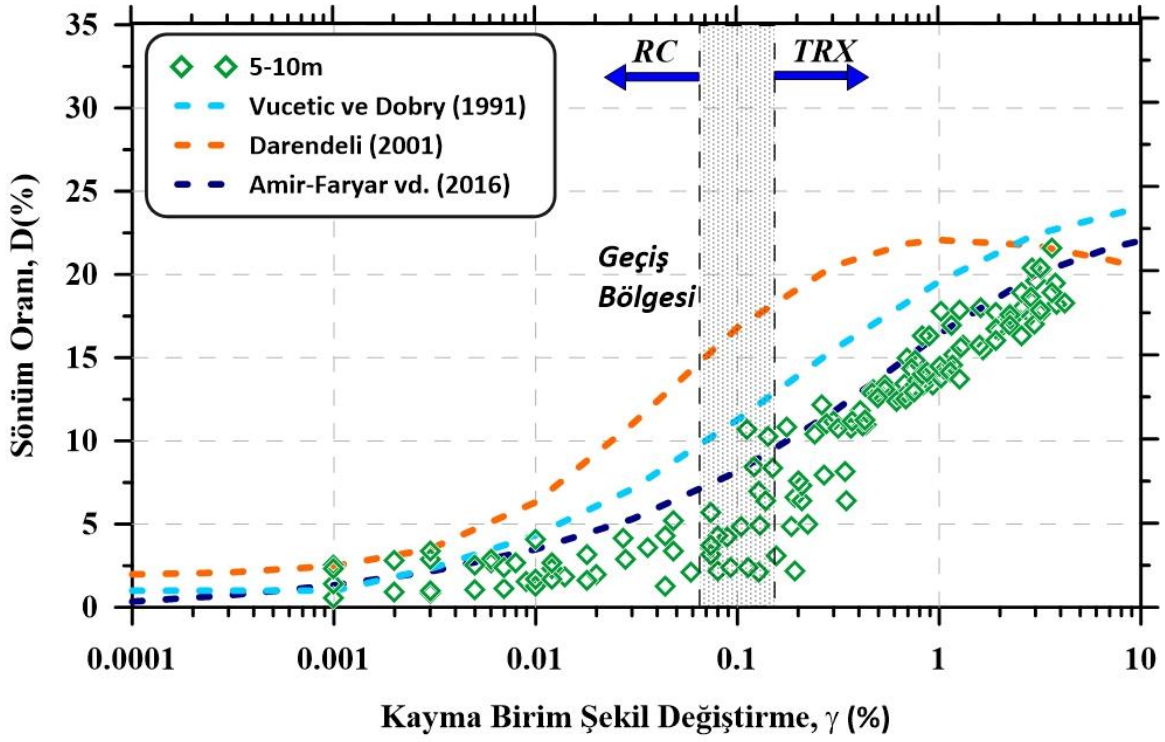


Şekil 6.14. 15-20m arasında elde edilen modül azalım değerleri ve referans modeller

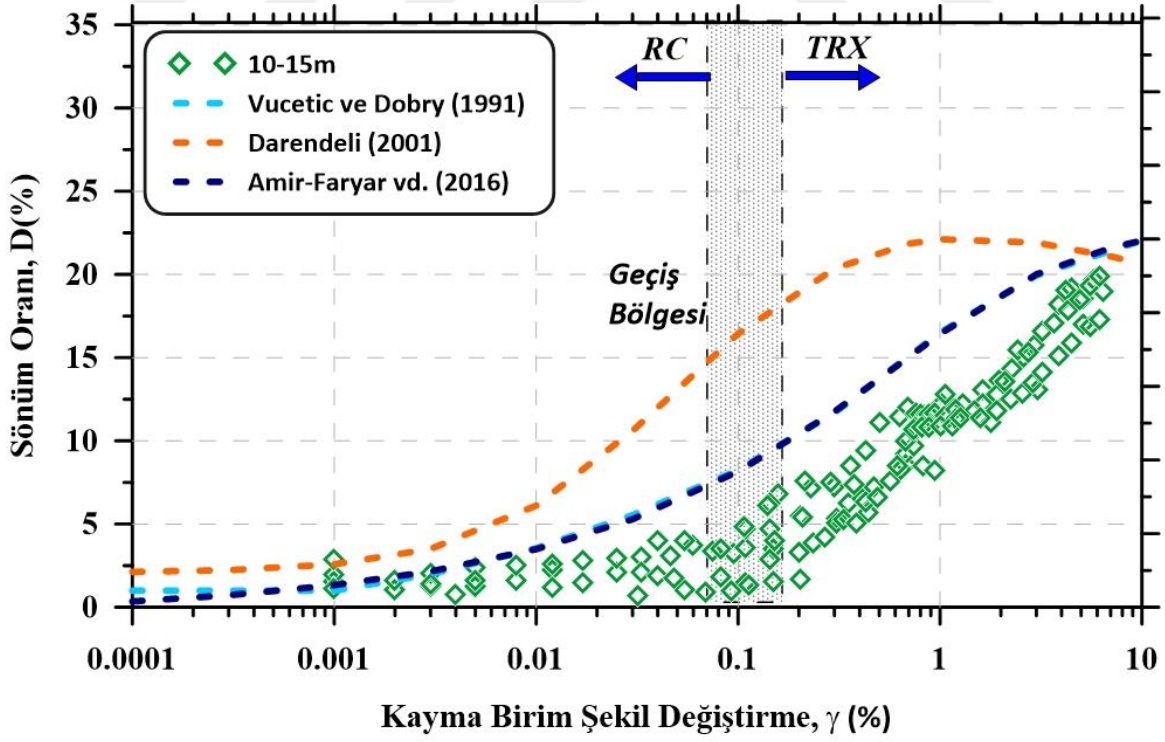
Sönümleme oranı eğrileri de aynı referans eğriler ile değerlendirilmiştir. Burada sönümleme değerlerinin Şekil 6.15'de görüleceği üzere 0-5m aralığında dağınık bir değerler olması nedeniyle her üç referans eğrisine uygun olduğu, ancak TRX deney sonuçlarının Vucetic ve Dobry 1991 referans eğrisine yatkın olduğu ancak yüksek deformasyon seviyelerinde ise yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Şekil 6.16'da 5-10m aralığında ise tüm deney sonuçlarının Amir-Faryar vd. 2016 referans eğrisine yatkın değerler olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.17'de 10-15m aralığında ise Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrileri benzer davranış göstermiş ve deney sonuçları bu referans eğrilerinden daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 6.15. 0-5m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller

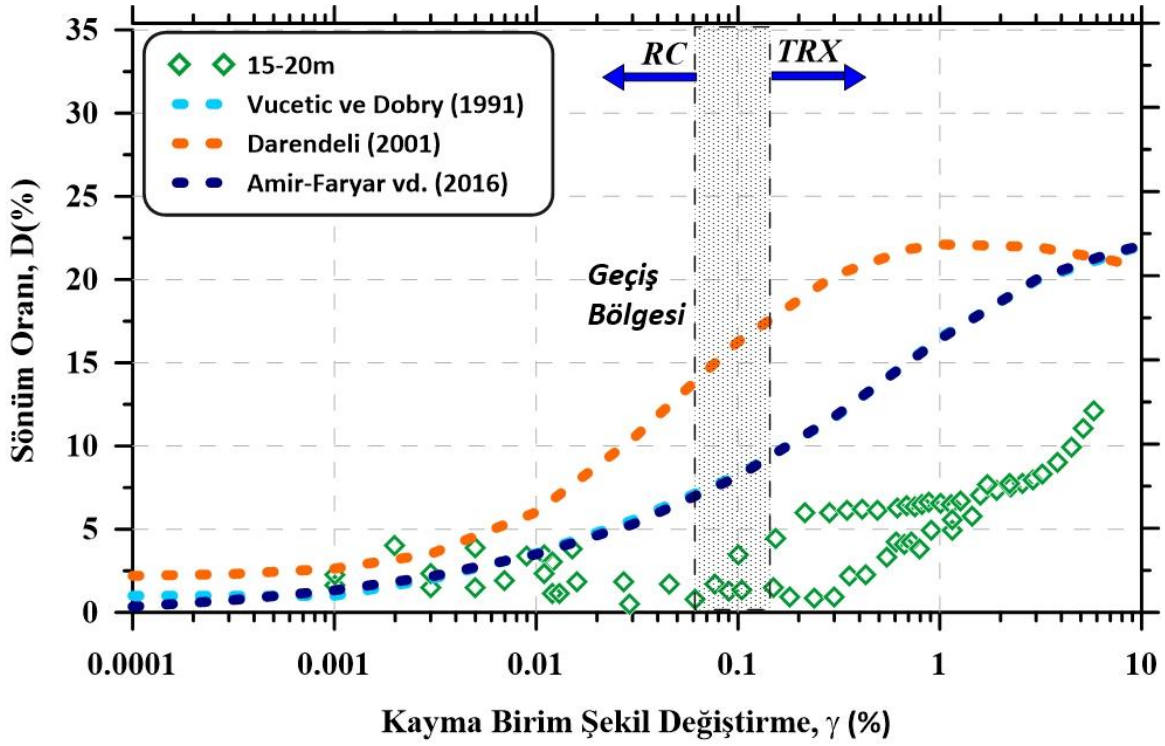


Şekil 6.16. 5-10m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller

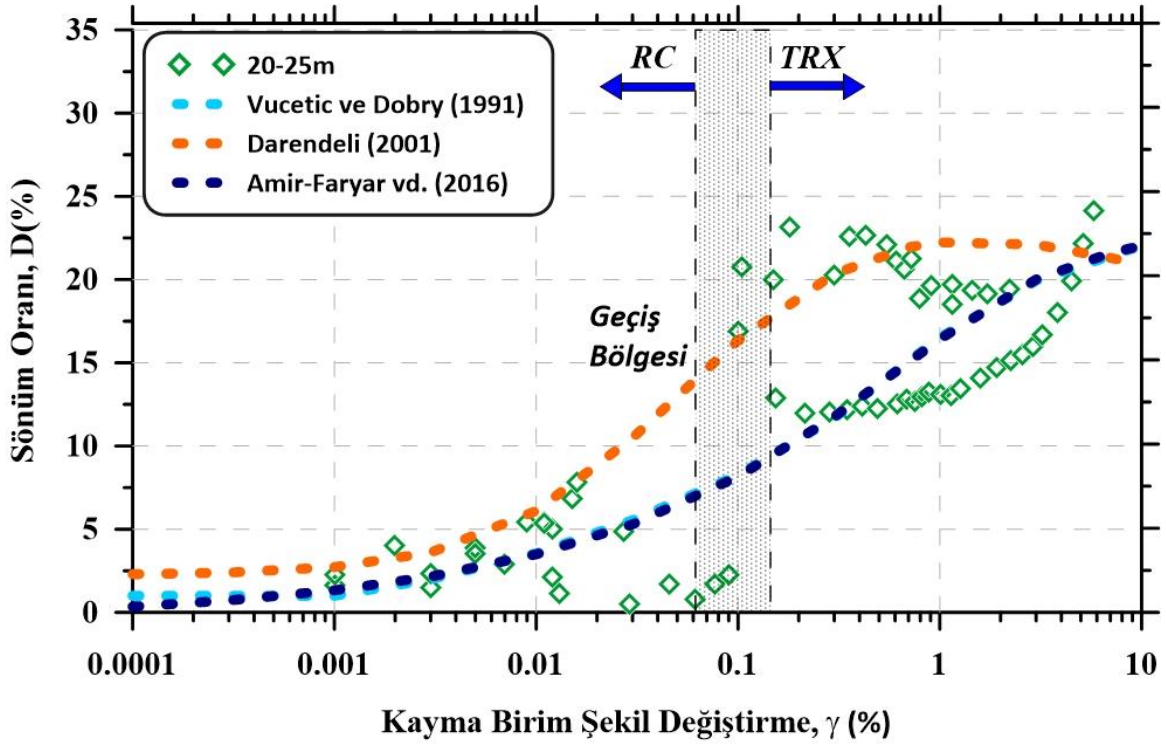


Şekil 6.17. 10-15m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller

Şekil 6.18'de 15-20m aralığında Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerinin yine benzer davranışta olduğu deney sonuçlarının daha düşük değerler olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.19'da 20-25m aralığında ise veri sayısının az olması nedeniyle dağınık olduğu görülmektedir.



Şekil 6.18. 15-20m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller

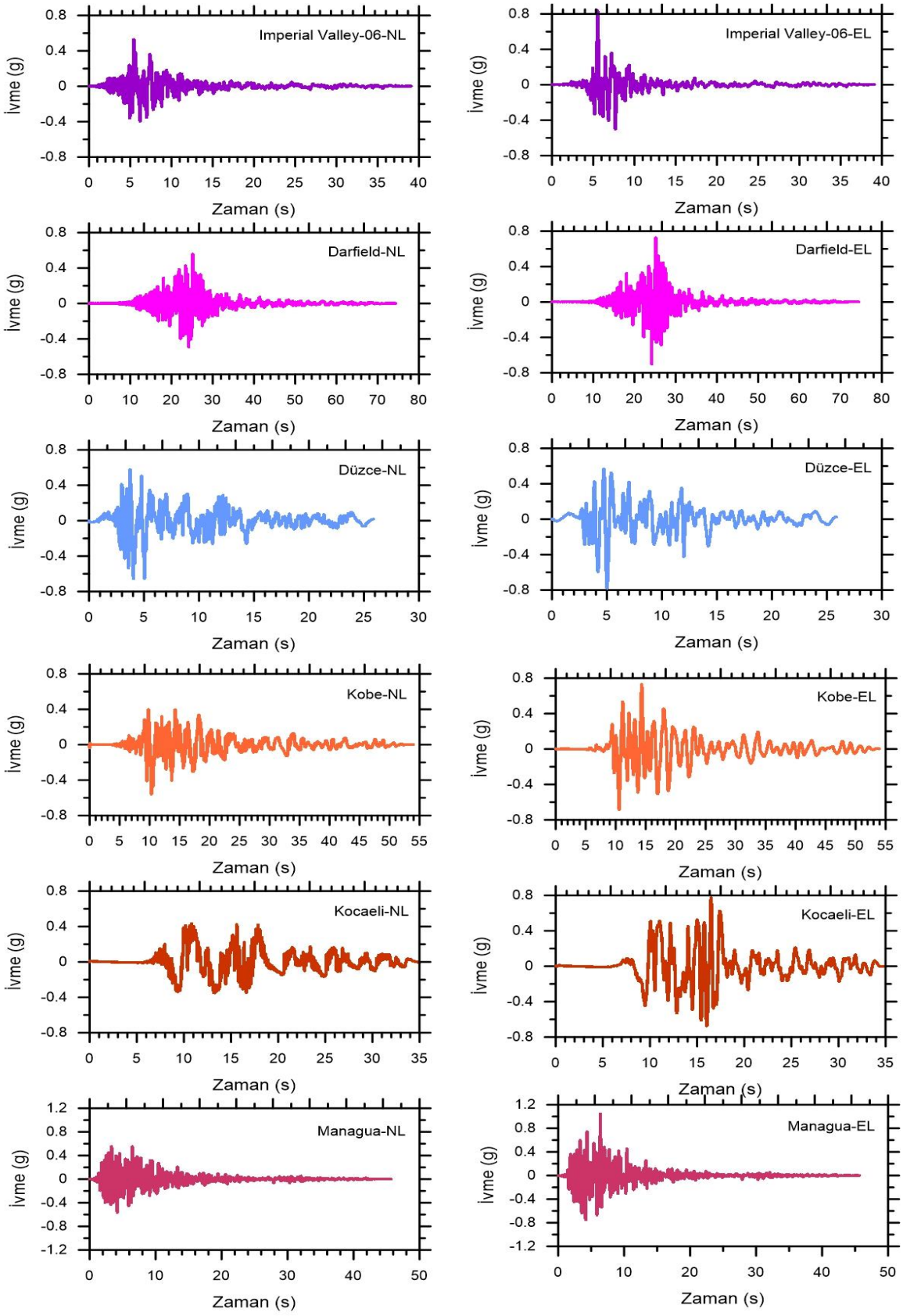


Şekil 6.19. 20-25m arasında elde edilen sönüm oranı değerleri ve referans modeller

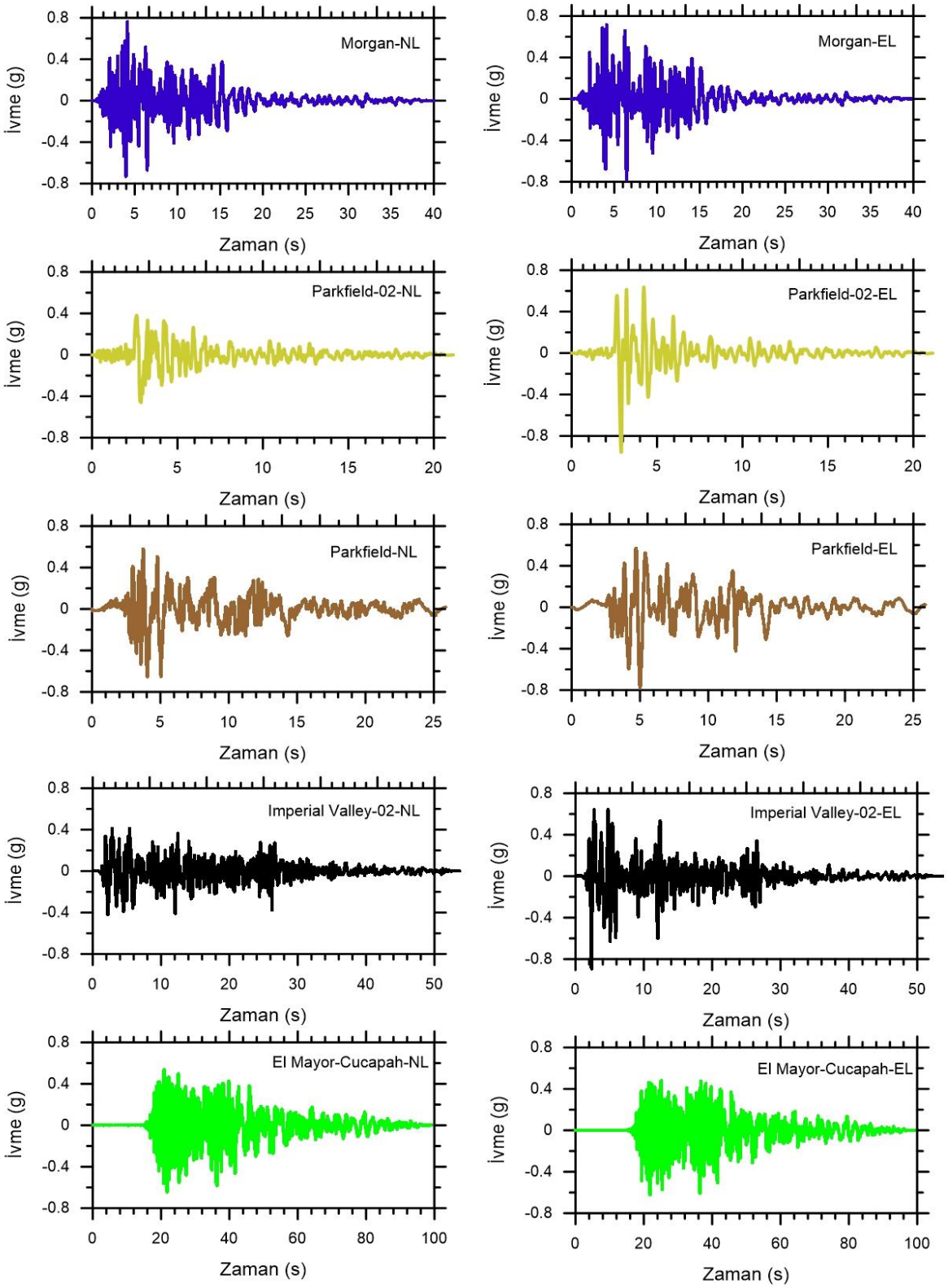
6.2. 1B Eşdeğer Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Sahaya özel elde edilen zemin dinamik parametreleri ile bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan 11 adet deprem ivme kaydı iki farklı ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş ve zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda 1B eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) analizler yapılmıştır.

SK-1 sondaj kuyusunda yapılan toplam 22 adet EL ve NL analizlerin yüzeyde oluşturduğu ivme değerleri Şekil 6.20'de gösterilmiştir.



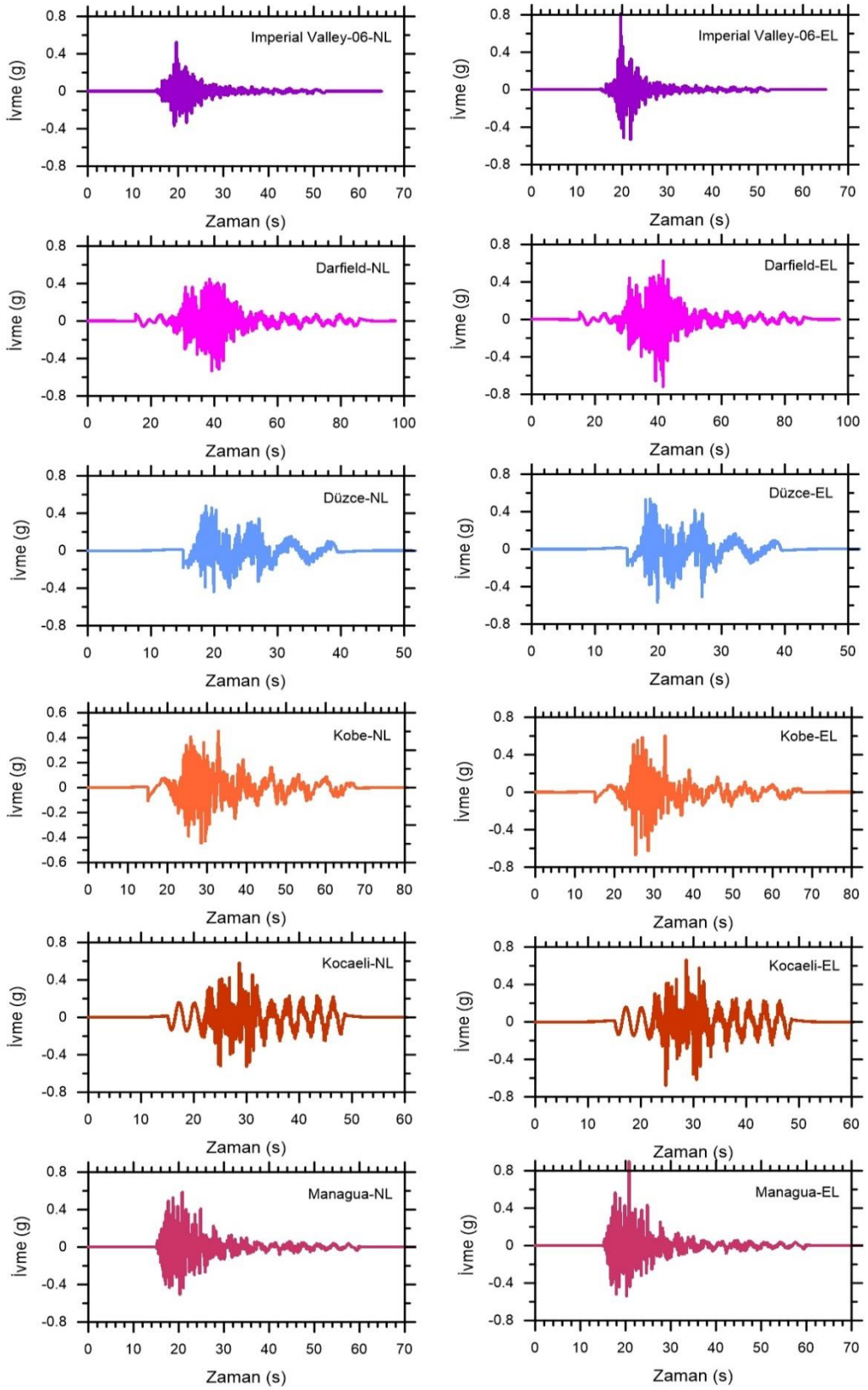
Şekil 6.20. Zaman tanım ölçeklendirme yöntemi ile EL ve NL analizi sonucunda yüzeyde oluşan ivme değerleri



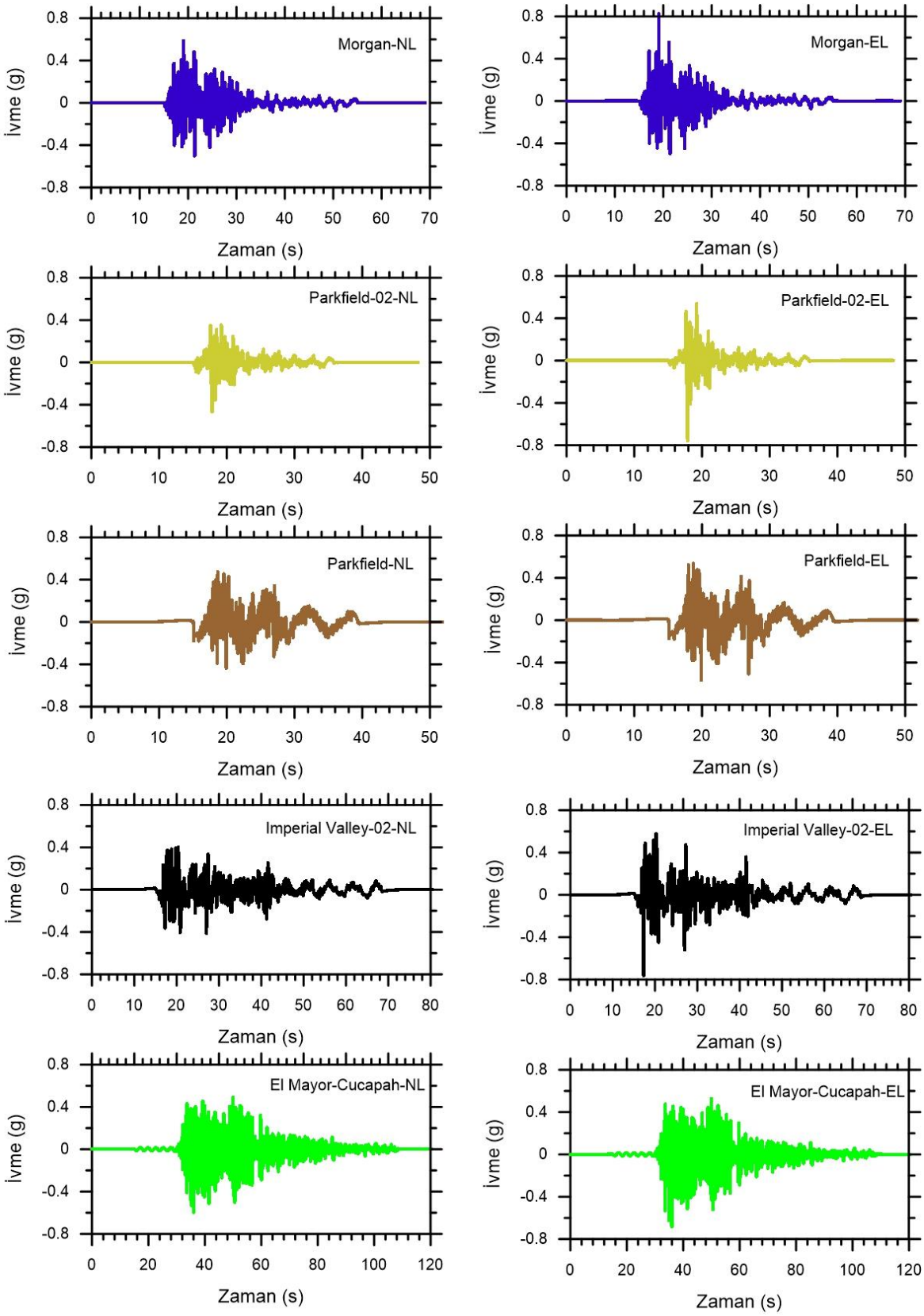
Şekil 6.20. Zaman tanım ölçeklendirme yöntemi ile EL ve NL analizi sonucunda yüzeyde oluşan ivme değerleri (devam)

Analizlerde en üst tabakada meydana gelen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde PGA yöntemi ile basit ölçeklendirme yapıldığında EL ve NL analiz sonuçlarında yüzeyde oluşan ivme değerlerinde değişimler olduğu görülmektedir. Özellikle bölgede daha önce meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremleri incelendiğinde pik ivme değerinin %50'ye yakın değişim gösterdiği görülmektedir.

İkinci ölçeklendirme yönteminde ise bölgenin spektrum karakteristiğine uyarlanan depremler ile yapılan EL ve NL analiz sonuçlarında da yüzeyde oluşacak ivme değerlerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 6.21 incelendiğinde EL analiz sonuçlarının NL analizlere göre daha yüksek ivme değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 6.21. Frekans tanım ölçeklendirme yöntemi ile EL ve NL analizi sonucunda yüzeyde oluşan ivme değerleri

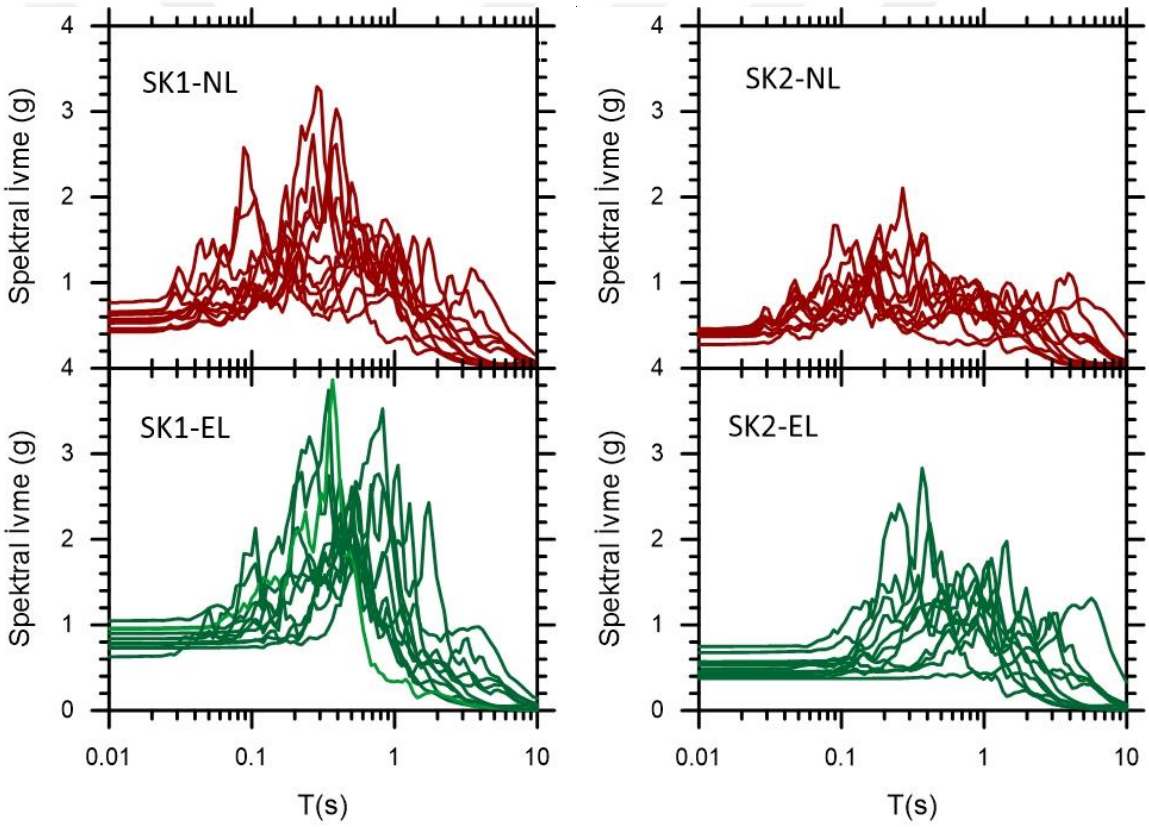


Şekil 6.21. Frekans tanım ölçeklendirme yöntemi ile EL ve NL analizi sonucunda yüzeyde oluşan ivme değerleri (devam)

6.3. Farklı Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Tepki Spektrumları

6.3.1. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları

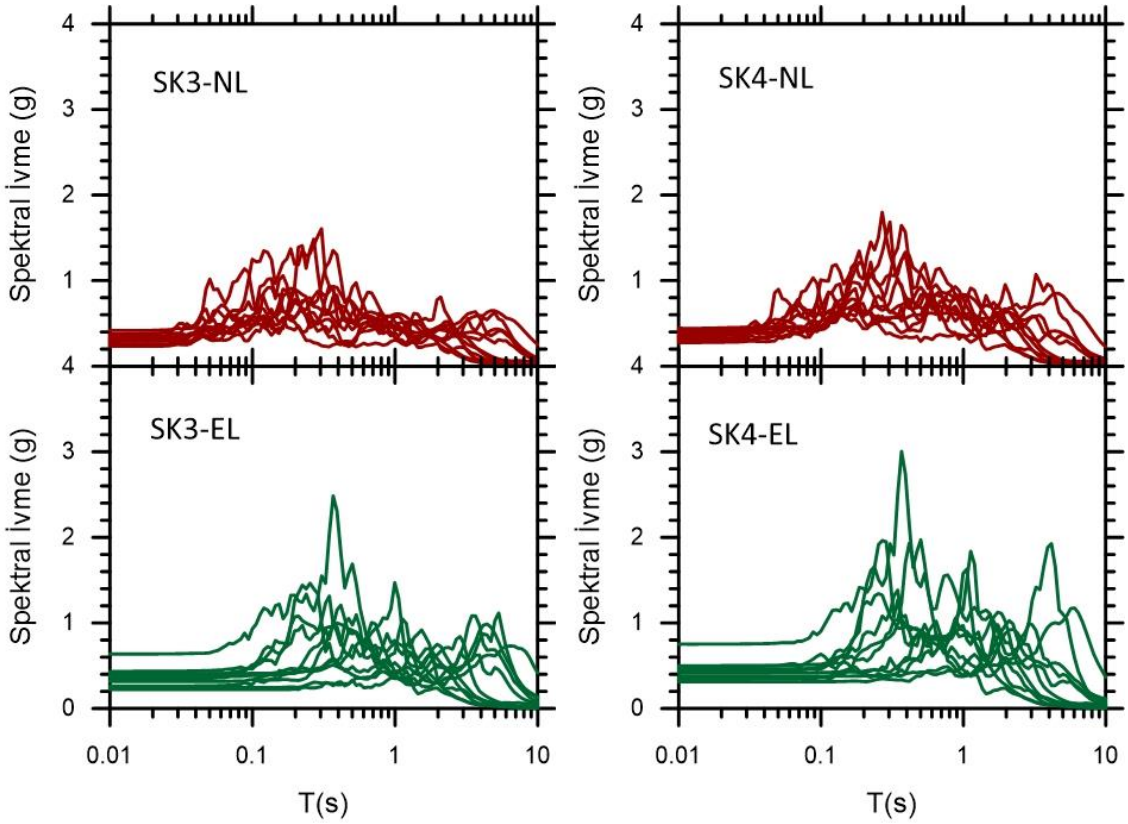
Bu bölümde eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yönteminde zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme yönteminden elde edilen ivmeler kullanılarak 11 deprem kaydına göre spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Şekil 6.22'de Sk-1 ve Sk-2 için EL ve NL analizlerinden elde edilen spektral ivme-periyot grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 6.22. Sk-1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme-periyot değerleri

Sk-1 sondajında yapılan analizlerde, NL analiz yönteminde pik ivmeler 0.25 sn'lerde 3.2 g olarak belirlenirken, EL analizlerde 0.3 sn'de 4.0 g'ye yakın değerlerin olduğu görülmüştür. Sk-2 sondajında ise NL analizlerde 0.25 sn'de 2.2 g ivme değerine ulaşırken, EL analizde ise 0.35sn'de 2.8 g olduğu belirlenmiştir.

Zaman tanım alanında yapılan Sk-3 ve Sk-4'e ait spektral ivme-periyot grafikleri Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



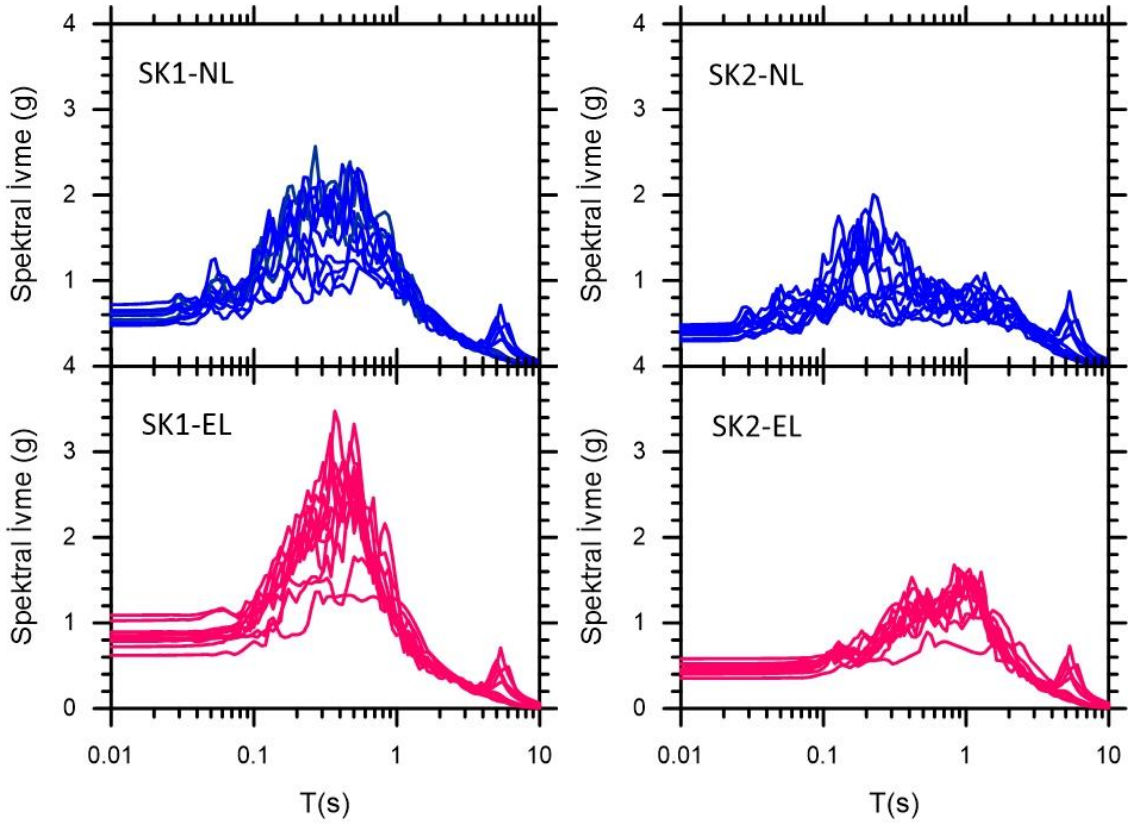
Şekil 6.23. Sk-3 ve Sk-4 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme-periyot değerleri

Yapılan EL ve NL analizlerde, Sk-3 sondaj noktasında NL analizde pik ivme 0.3 sn'de 1.6 g değeri olurken, EL analizde ise 0.4 sn'de 2.6 g değerinde olduğu görülmüştür. Sk-4 sondaj noktasında ise NL analizde 0.3 sn'de 2.8 g değerine ulaşırken, EL analizde ise 0.35 sn'de 3.0 g değerine ulaştığı belirlenmiştir.

6.3.2. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda elde edilen 11 adet deprem ivme kaydı ile yapılan 4 adet sondaj kuyusunda EL ve NL analizlerin spektral ivme-periyot grafikleri Şekil 6.24 ve 6.25'te gösterilmiştir.

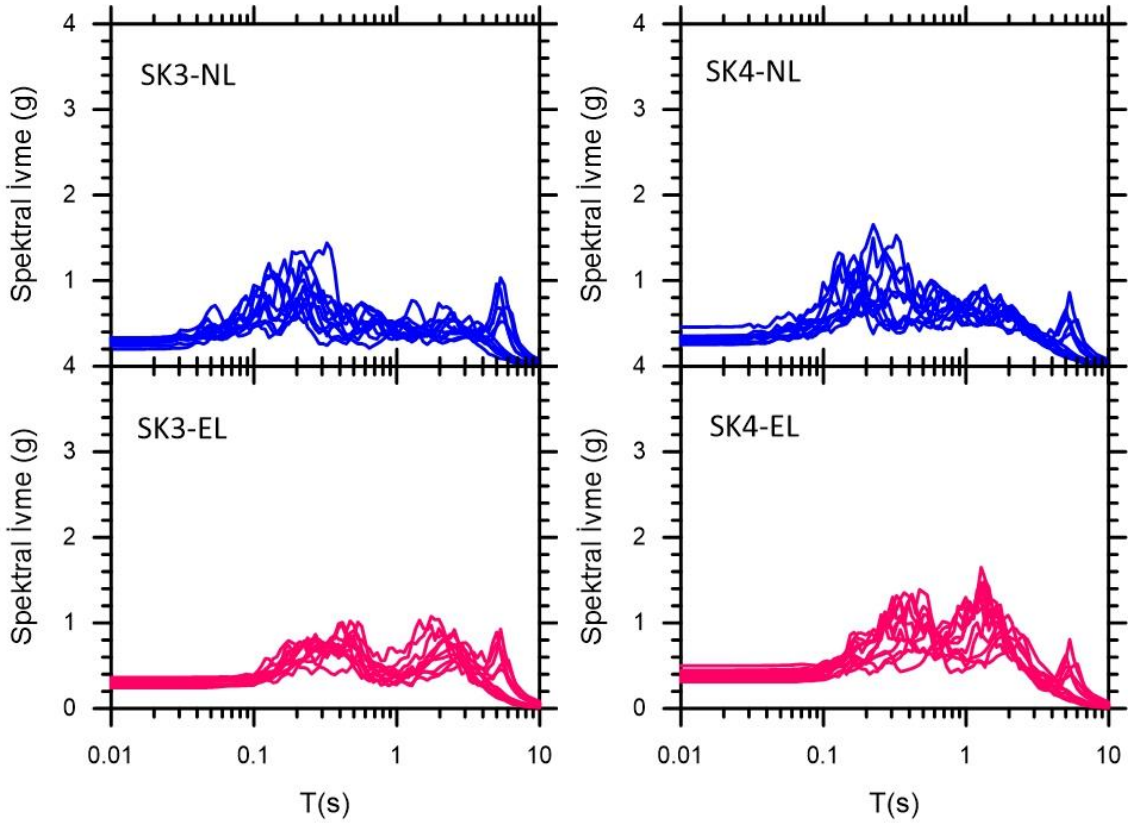
Sk1 ve Sk-2 için yapılan analizlerin spektral ivme-periyot grafikleri Şekil 6.24'te gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Sk-1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme değerleri

NL analiz ile Sk-1 incelendiğinde, pik ivme değerinin 0.15 sn'de 2.4 g değerine ulaştığı, EL analizde ise 0.3 sn'de 3.6 g değerinde olduğu görülmüştür. Sk-2 noktasında NL analizlerde ise 0.2 sn'de 2 g değerine ivmenin ulaştığı, EL analizde ise 1.0 sn'de 1.6 g değerinde olduğu belirlenmiştir.

Sk-3 ve Sk-4 için yapılan EL ve NL analizler Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Burada Sk-3 noktasında NL analizlerde 0.2 s'de 1.2 g değerinde pik yaparken, EL analizlerde hem 0.8 s hem de 1.2 s'de 1.0 g değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Sk-4 sondaj noktasında ise NL analizlerde 0.25 sn'de 1.4 g değerinde pik yaparken, EL analizde ise 1.5 sn'de 1.4 g değerinde pik noktasına ulaşmıştır.



Şekil 6.25. Sk-3 ve 4 sondajlarında yapılan EL ve NL spektral ivme değerleri

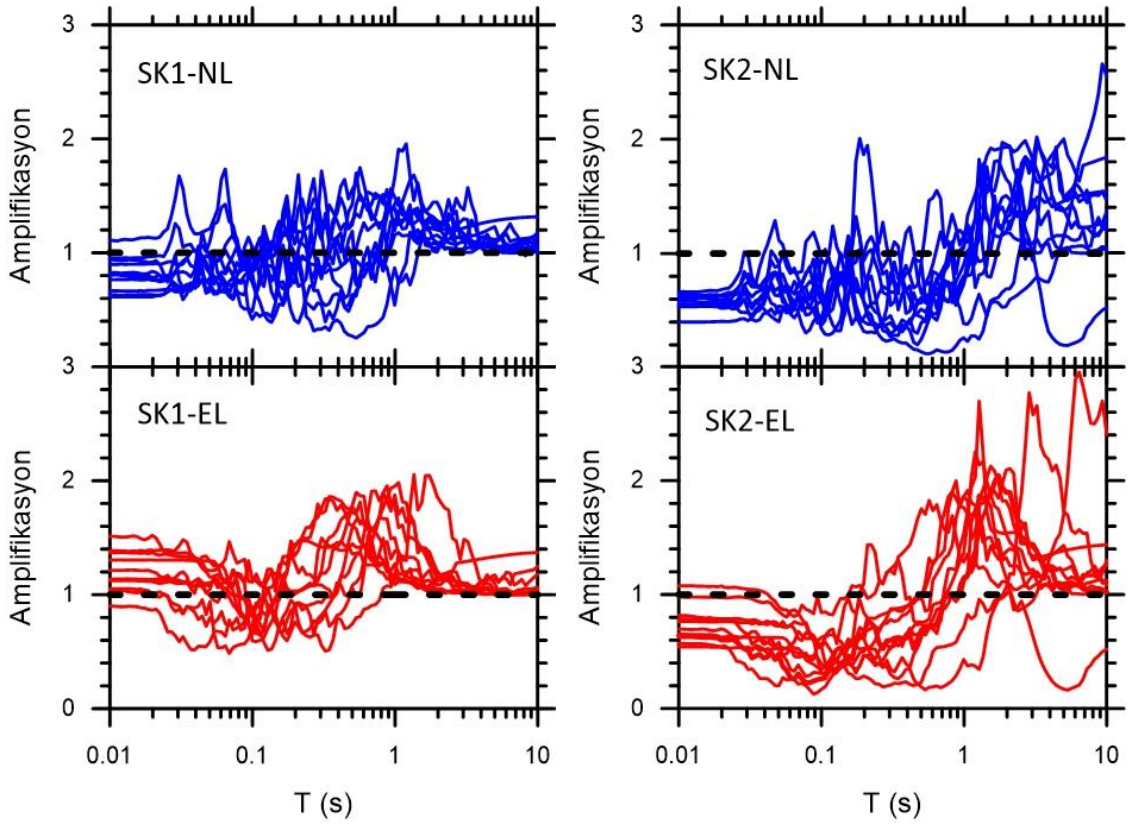
6.4. Farklı Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Zemin Büyütme Faktörleri

6.4.1. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Zemin Büyütme Faktörleri

Deprem bölgelerinde anakayadan yüzeye doğru hareket eden deprem dalgalarının zemin tabakalarından geçerken genliklerinde meydana gelen değişim sonucunda zemin büyütmesi meydana gelmektedir. Burada sahaya özel analizler sonucunda yapılan zemin büyütme analizlerinde her iki ölçeklendirme yöntemi ile 4 farklı sondaj kuyusunda büyütme "amplifikasyon" değerleri elde edilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile yapılan analizler şekil 6.26 ve 6.27'de gösterilmiştir.

Deprem dalgalarının farklı frekanslarda olması nedeniyle aynı zemin tabakasında farklı tepkiler vermektedir. Bu nedenle zemin büyütmesi, deprem dalgalarının frekans

içeriğine bağlıdır. Zemin büyütme faktörü depremin frekansına, zemin tabakasının özelliklerine ve deprem dalgasının hızına bağlı olarak değişmektedir. Maksimum büyütmenin görüldüğü periyot (T_0) zeminin hakim periyotu olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996).



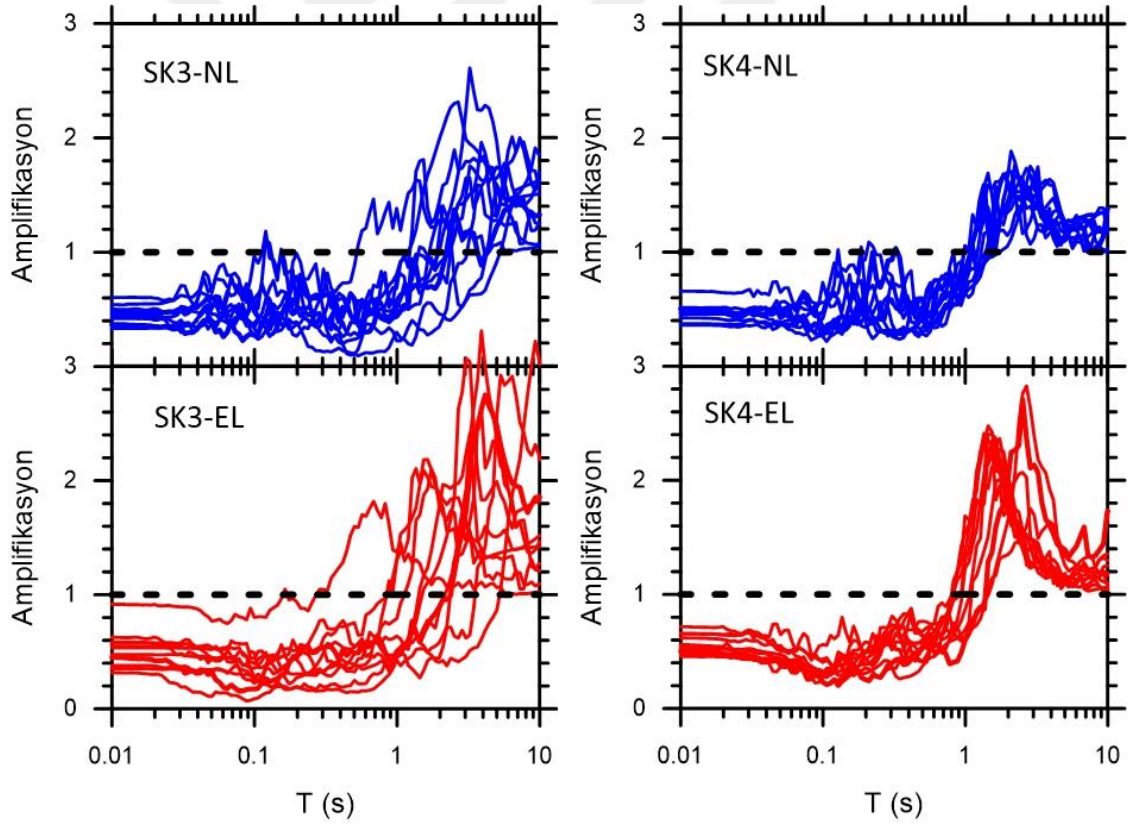
Şekil 6.26. Sk 1 ve Sk-2 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri

Sk 1 ve Sk-2 için yapılan analizler sonucu zemin büyütme faktörü Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Burada fatörün 1.0'den büyük olduğu periyot değerlerinde zemin büyütmesi meydana gelmektedir. Sk-1 sondaj noktasında NL analizde 11 adet depremin etkisi incelendiğinde, genel olarak 0.1-1.0 sn aralığında 1.8'e varan büyütme oranı olduğu ayrıca T:1.0 sn'de 2.0 olduğu görülmüştür. EL analizde ise genel trendin 0.3-2.0 sn'de yoğunlaştığı ve 2.0 oranına ulaştığı belirlenmiştir.

Sk-2 sondaj noktasında ise NL analizde 11 adet deprem ivme kaydının genek

yoğunlaştığı büyütme oranı T:1.0-10.0 sn arasında 2.0 oranı olduğu ve T:0.2 ve 10.0 sn'de farklı pik değerlerin olduğu birer deprem ivme kaydında görülmektedir. EL analizlerde ise NL analizlerden farklı olduğu T:0.2 sn'den başlayarak T:10.0 sn'ye kadar farklı deprem ivme kayıtlarında 3.0 oranına kadar ulaştığı belirlenmiştir.

Sk-3 ve Sk-4'te yapılan zemin büyütme oranı Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Sk-3 sondaj noktasında NL analizde T:0.4 sn'den başlayarak T:10.0 arasında 2.6 oranına varan bir büyütme olduğu belirlenmiştir. EL analizde ise NL analizden daha yüksek amplifikasyon faktörü değerlerine ulaşılmıştır. Sk 4 sondaj noktasında ise NL analizlerin T:1.0-10.0 sn periyot aralığında 1.8 oranına kadar büyütme oranı olduğu, EL analizlerde ise yine aynı periyot aralığında 2.8'e varan büyütme oranı olduğu görülmüştür.



Şekil 6.27. Sk 3 ve Sk-4 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri

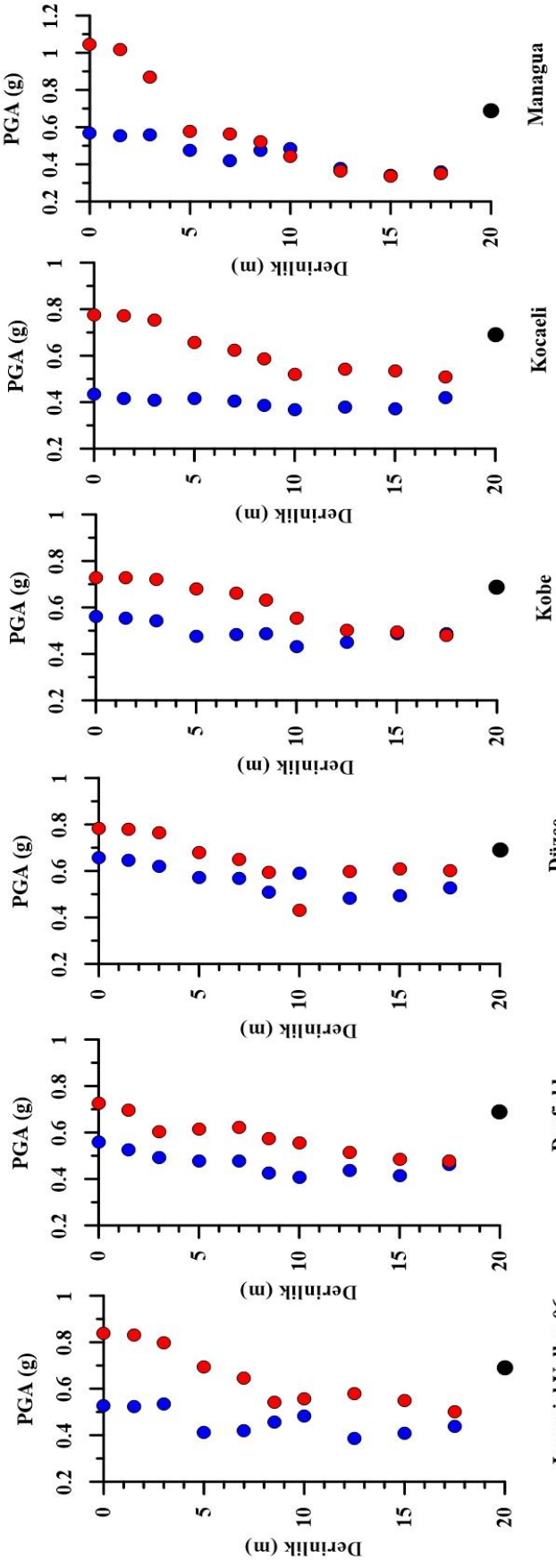
Çalışma kapsamında her bir depremin zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirmesi sonucunda derinliğe bağlı ivmenin değişimi ve aynı zamanda derinliğe bağlı şekil değiştirme miktarının değişimi elde edilmiştir.

Sk-1 sondaj noktasında yapılan bu derinliğe bağlı değişimler Şekil 6.28 ve 6.29'da gösterilmiştir. Öncelikle derinliğe bağlı olarak ivme değişimleri incelendiğinde 0.689 g olan anakayadan gelen ivme değerinin yüzeyde farklı deprem ivme kayıtlarında sönümleme ve büyütmeye maruz kalmıştır.

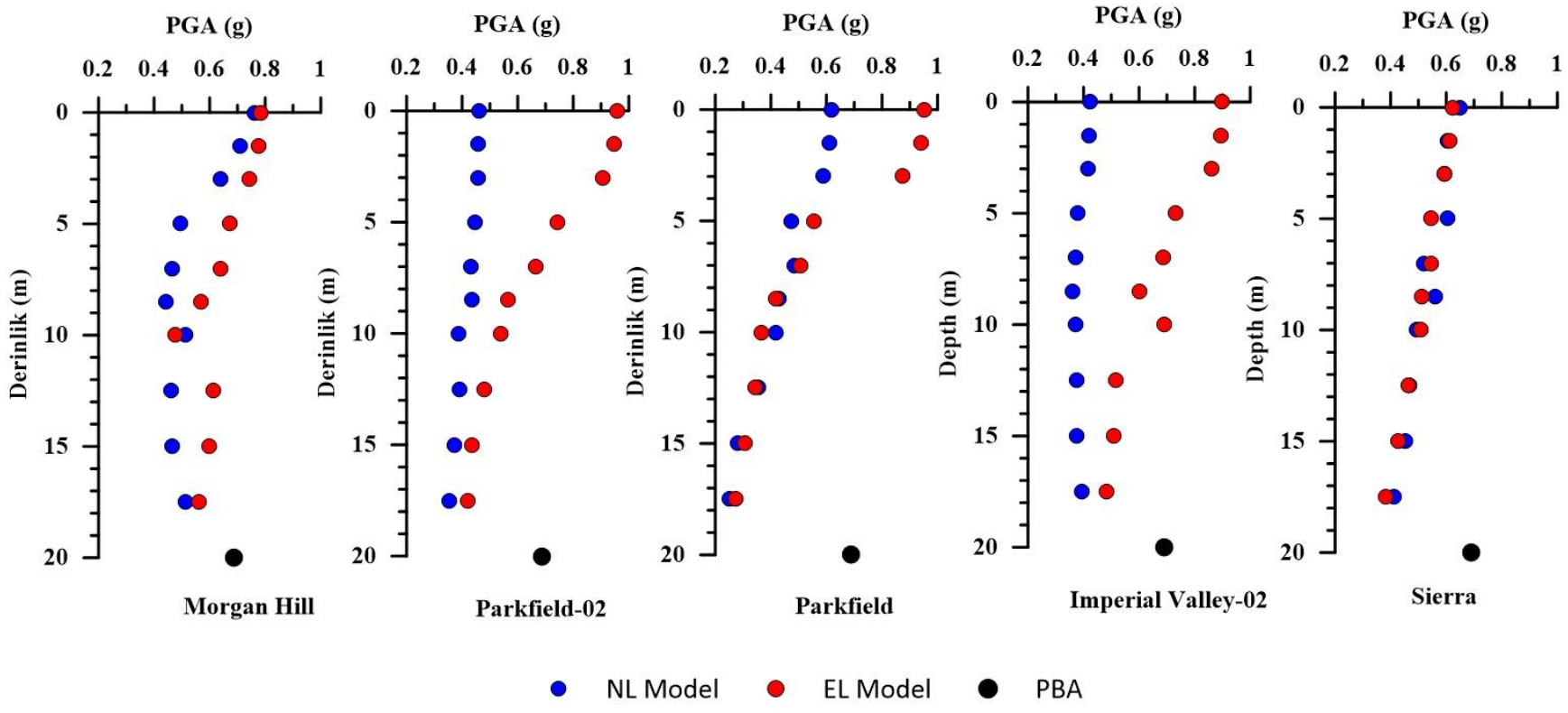
Burada yapılan değerlendirmede, Şekil 6.28'de EL ve NL analizlerde Morgan-Hill ve Sierra depremlerinde büyük benzerliklerin olduğu, Parkfield 02, Imperial Valley 02 ve Managua depremlerinde büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılığın yüzeyde hissedilen ivmenin 2 kata varan büyüklükte olması EL ve NL analizlerin farklılığını göstermektedir. EL modellerin NL modellerden daha yüksek ivme değerlerinin yüzeyde hesapladığı görülmektedir.

Çalışmada Sk-1 sondaj noktasında 11 adet depremin derinlik boyunca deformasyon miktarı değişimi Şekil 6.29'da gösterilmiştir. Bölgede meydana gelen depremler incelendiğinde Düzce depreminde her iki analiz modelinin benzer davranış gösterdiği, 8-14m aralığında %3 deformasyon miktarına ulaştığı belirlenmiştir. Yine bölgede meydana gelen Kocaeli depreminde ise 8-13m aralığında EL modelde %2 deformasyon meydana gelirken, NL modelde önemli bir deformasyon görülmemiştir.

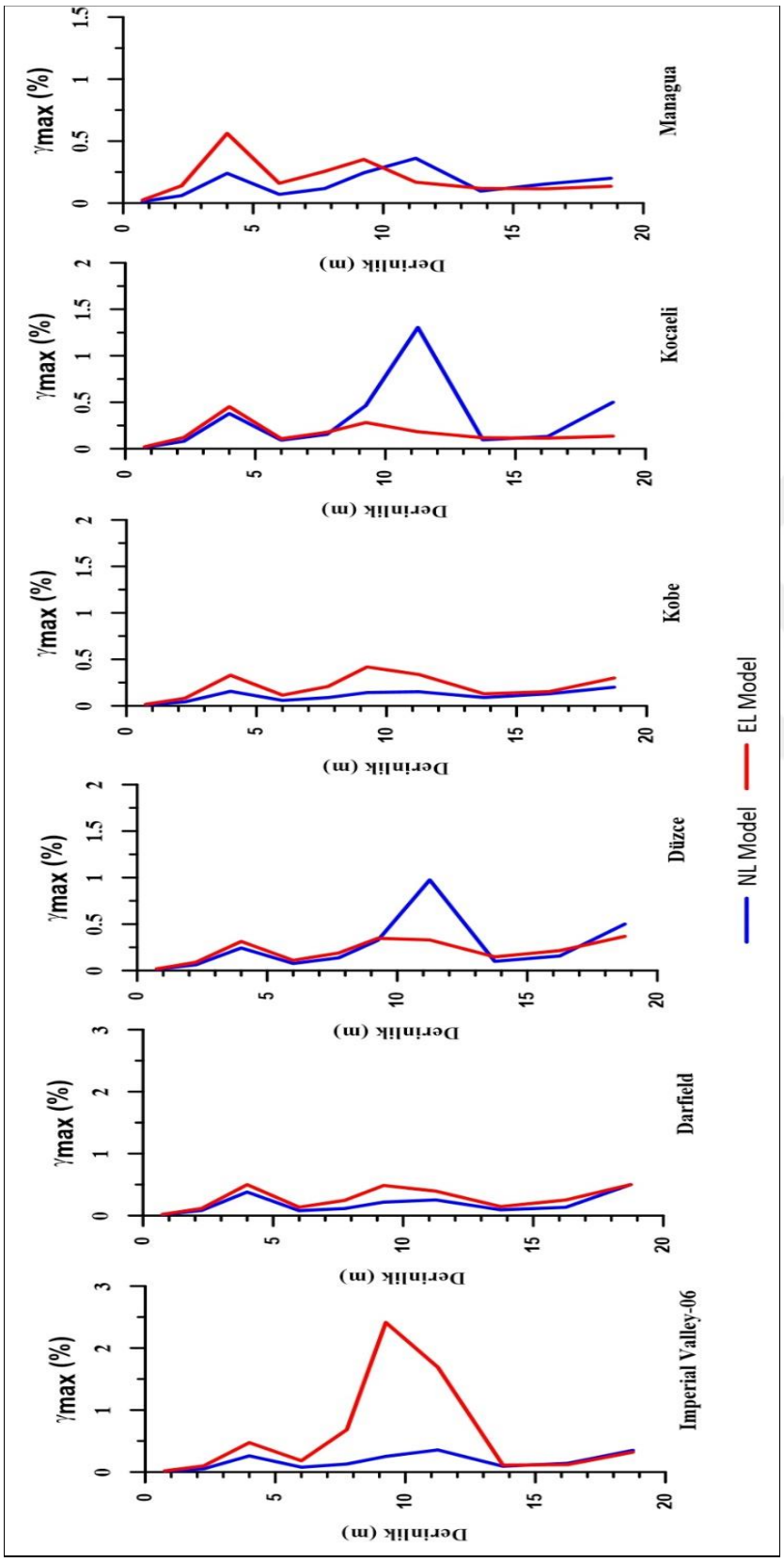
Burada Darfield, Düzce, Managua, Morgan Hill, Parfield ve Sierra depremlerinde EL ve NL analizlerin büyük benzer deformasyon değişimleri olduğu görülmüştür. Kobe ve Kocaeli depremlerinde ise 8-13m aralığında deformasyonun EL modelde yüksek olduğu belirlenmiştir.



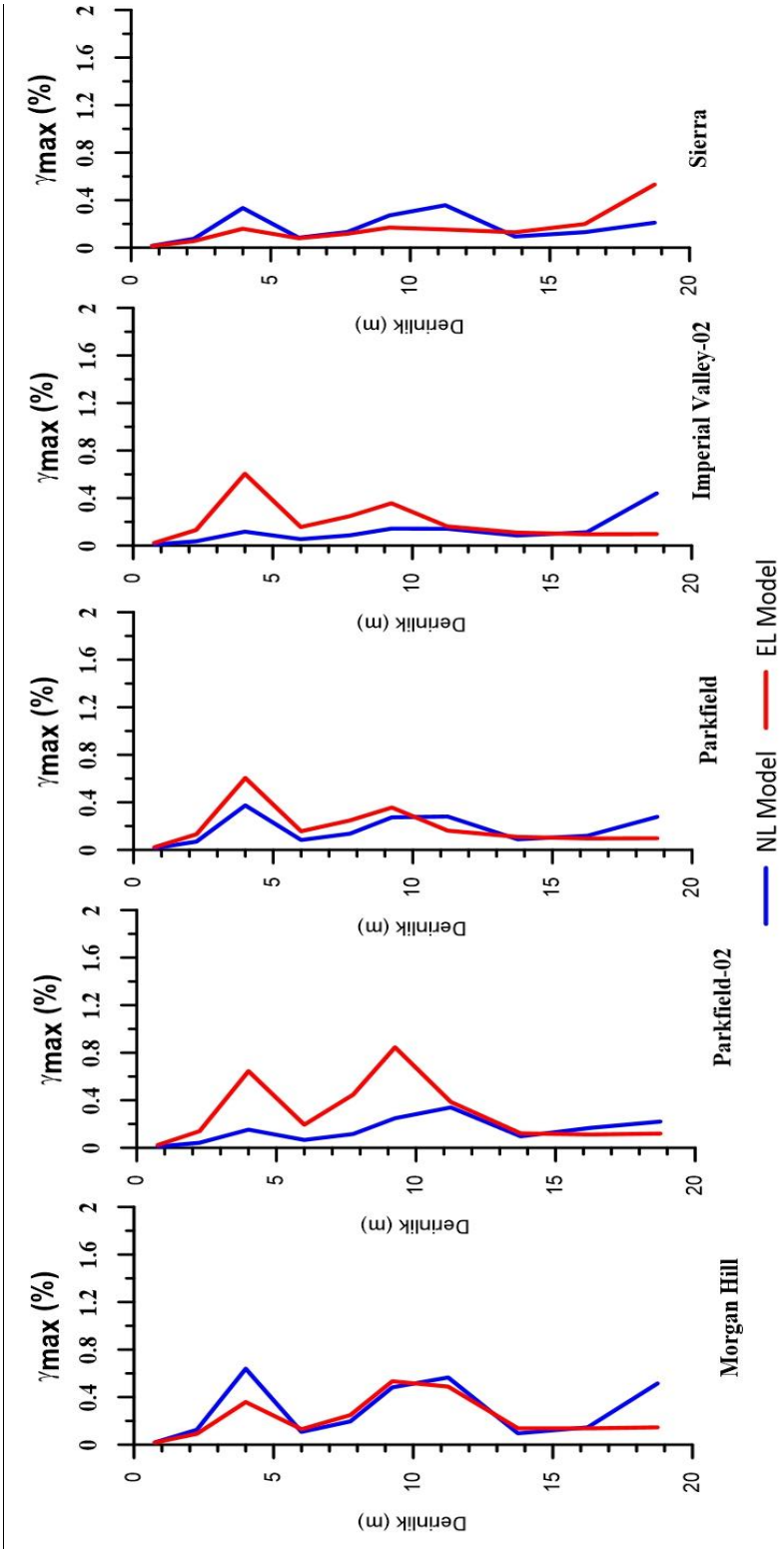
Şekil 6.28. Sk-1 noktasında EL ve NL yapılan analizde ivmenin derinliğe bağlı değişimi



Şekil 6.28. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde ivmenin derinliğe bağlı değişimi (devam)



Şekil 6.29. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

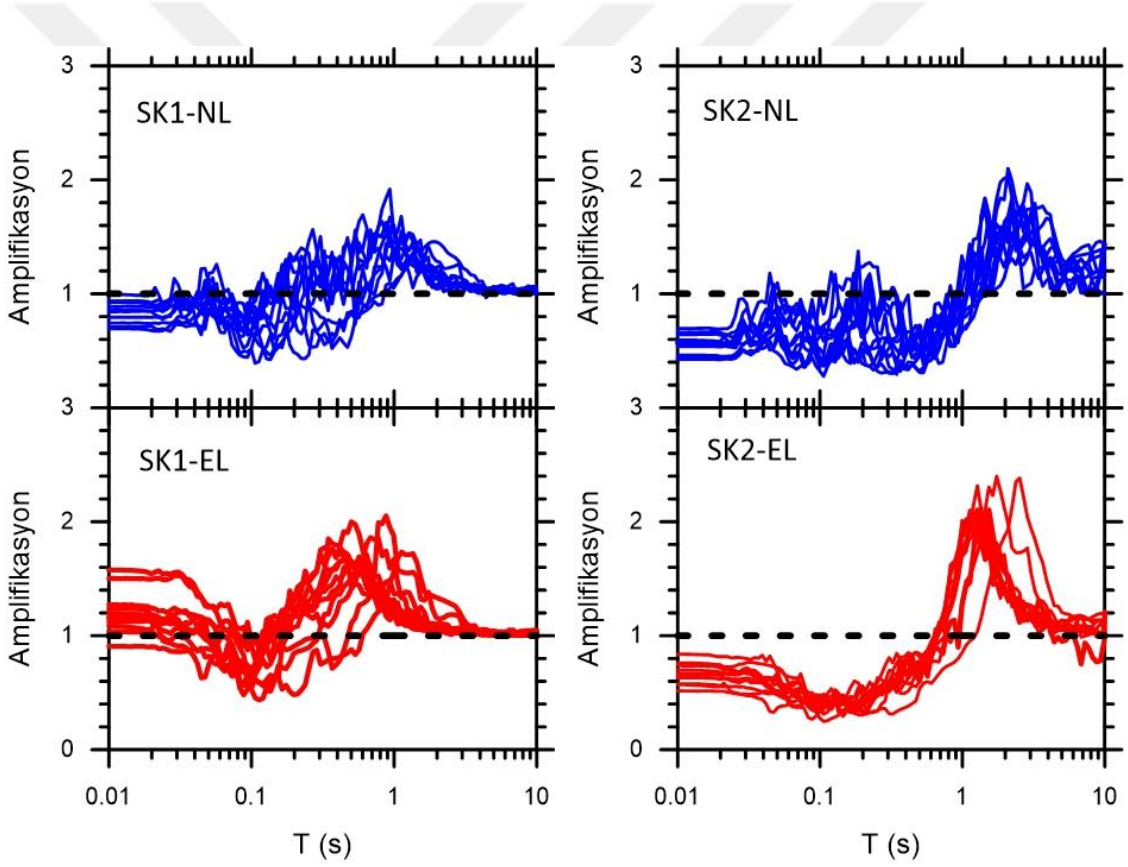


Şekil 6.29. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi (devam)

6.4.2. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Zemin Büyütme Faktörleri

Yapılan NL ve EL analizler sonucunda farklı deprem ivme kayıtlarında farklı zemin büyütme faktörlerinin oluştuğu görülmektedir.

Frekans tanım alanında yapılan deprem ölçeklendirme yöntemi ile yapılan analizlerde depremlerin frekasında meydana gelen değişim nedeniyle benzer davranışta olduğu Şekil 6.30 ve 6.31'de gösterilmektedir. Analizlerde EL analizlerde NL analizlere göre daha yüksek büyütme faktörü değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir.

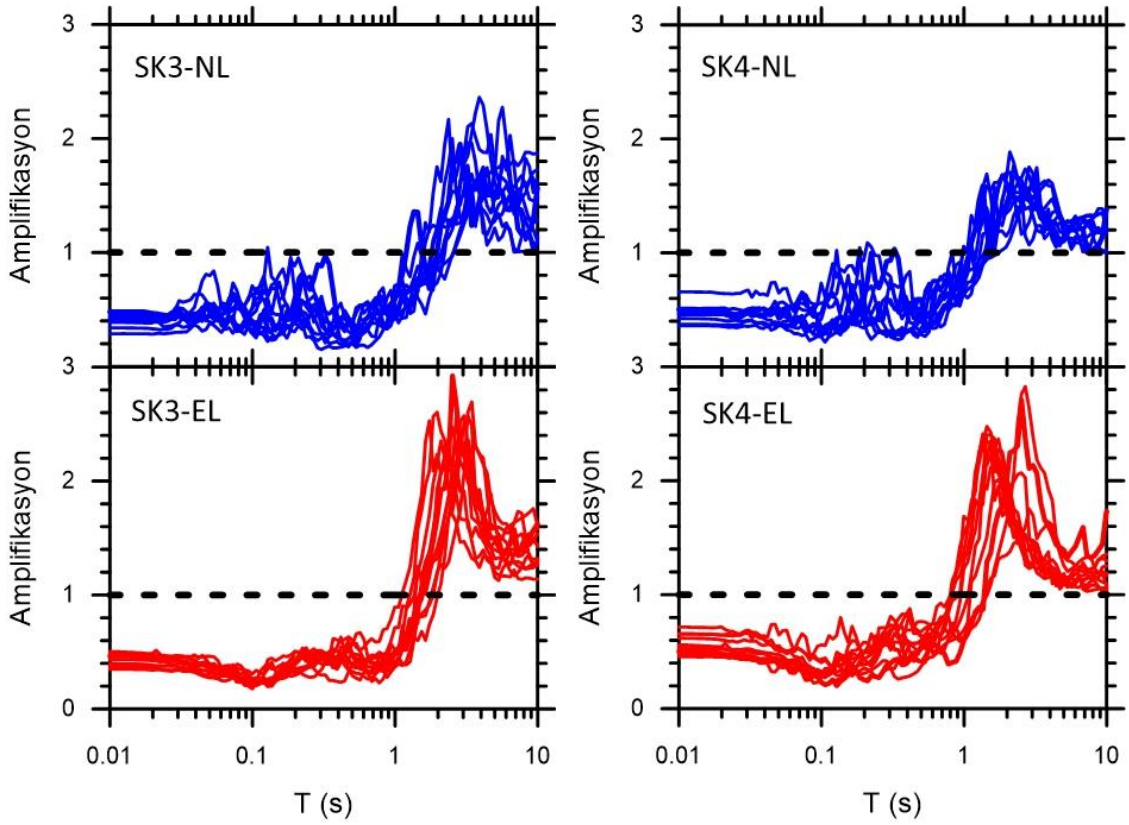


Şekil 6.30. Sk 1 ve 2 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri

Sk 1 ve 2 için yapılan analizlerde, Sk 1'de NL analiz yönteminde T:0.1-1.0 sn arasında 1.8 oranında büyütme olduğu görülmektedir. EL analizde ise T:0.1-1.0 sn arasında ivmelerin büyütme faktörü oluşturduğu ve 2.0 oranına kadar ulaşmıştır. Sk-2 sondaj

noktasında ise NL analizde T:1.0 sn'den sonra 2.0 oranına kadar ulaştığı, EL analizinde ise T:1.0-10.0 sn arasında 2.4 oranına kadar büyütme faktörü olduğu belirlenmiştir.

Yine frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda Sk 3 ve 4 için yapılan analizler Şekil 6.31'de gösterilmiştir.



Şekil 6.31. Sk 3 ve 4 sondajlarında yapılan EL ve NL zemin büyütme (amplifikasyon) faktörü değerleri

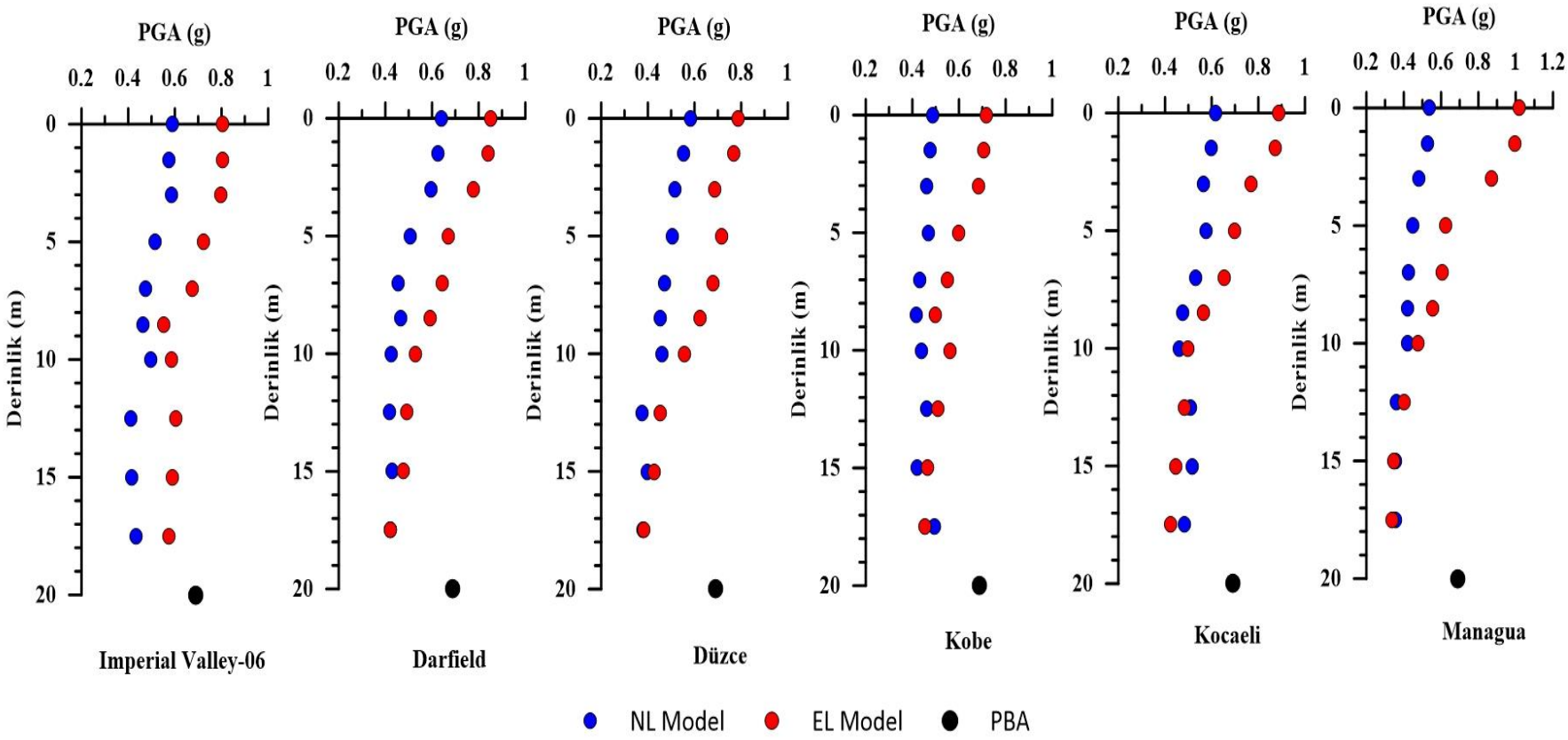
Sk-3 sondaj noktasında NL analizlerde yüksek periyot değerlerinde, T:1.0-10.0 sn arası, 2.4 oranında büyütme olduğu, EL analizde ise yine yüksek periyot değerlerinde 3.0 oranına ulaşan büyütme faktörü olduğu belirlenmiştir. Sk-4 sondaj noktasında ise NL analizde yüksek periyotta 1.8 oranına ulaşırken, EL analizlerde ise 3.0'e ulaşan oranda büyütme faktörü olduğu görülmüştür.

Çalışmada bir diğer deprem ölçeklendirme yöntemi olan frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda derinliğe bağlı ivmenin değişimi ve aynı zamanda derinliğe bağlı şekil değiştirme miktarının değişimi elde edilmiştir. Sk-1 sondaj noktasında yapılan bu derinliğe bağlı değişimler Şekil 6.32 ve 6.33'de gösterilmiştir. Derinliğe bağlı olarak ivme değişimleri incelendiğinde 0.689 g olan anakayadan gelen ivme değerinin yüzeyde farklı deprem ivme kaytılarında sönümleme ve büyütmeye maruz kaldığı görülmektedir.

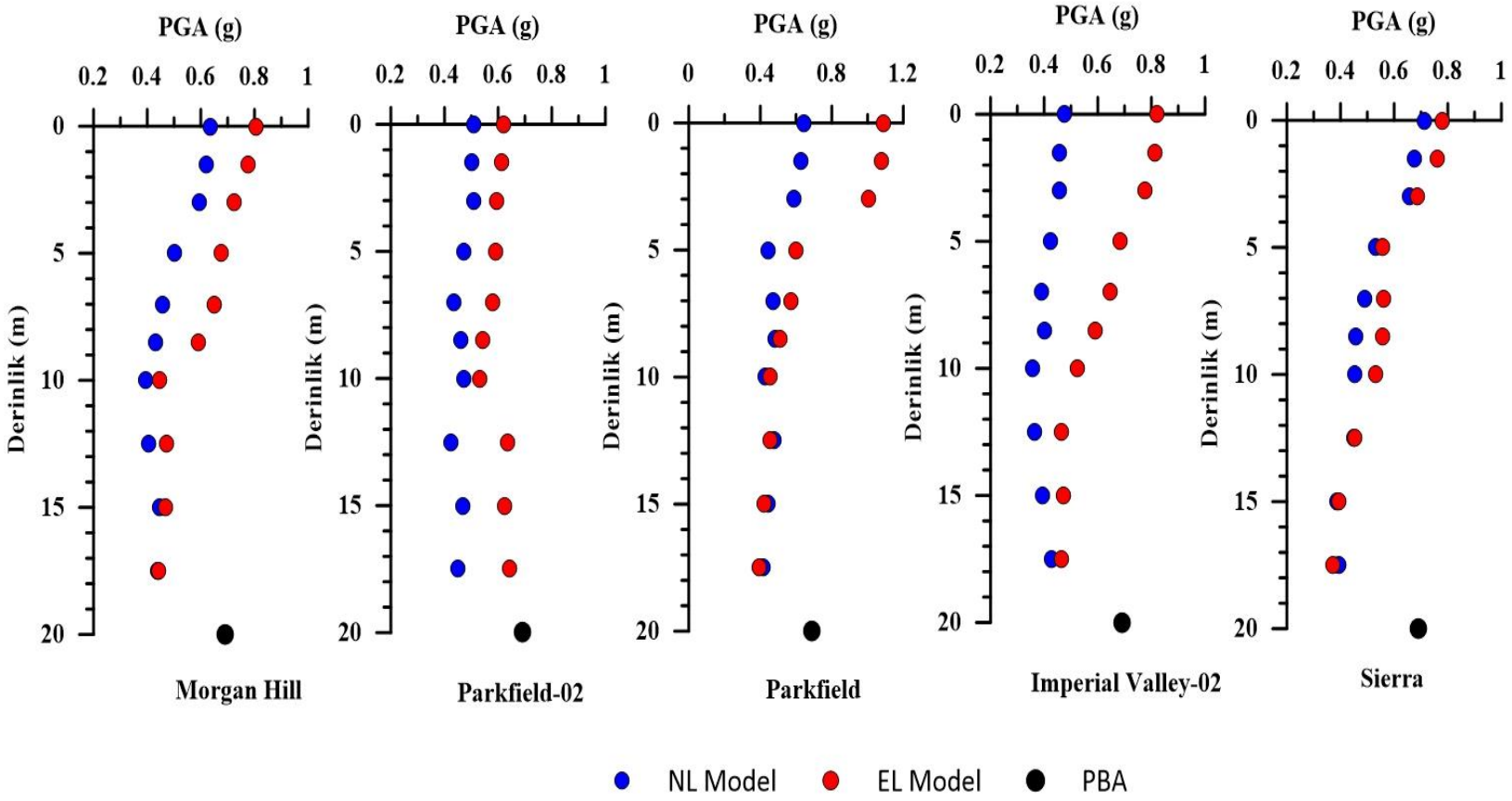
Şekil 6.32 incelendiğinde, EL ve NL analizlerde Parkfield 02 ve Sierra depremlerinde büyük benzerliklerin olduğu, Parkfield ve Imperial Valley 02 depremlerinde büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılığın yüzeyde hissedilen ivmenin 2 kata varan büyüklükte olması EL ve NL analizlerin farklılığını göstermektedir. EL modellerin NL modellerden daha yüksek ivme değerlerinin yüzeyde hesapladığı görülmektedir.

Aynı zamanda Sk-1 sondaj noktasında 11 adet depremin derinlik boyunca deformasyon miktarı değişimi Şekil 6.33'te gösterilmiştir. Çalışma bölgesinde geçmiş yıllarda meydana gelen Düzce ve Kocaeli depremleri incelendiğinde, NL analizlerde EL analizlere göre 8-13 m aralığında yüksek deformasyonların oluştuğu görülmektedir. Imperial Valley 06 depreminde ise EL analizde NL analize göre 7-14m aralığında yüksek deformasyon oluştuğu, Sierra depreminde ise NL modelde EL modele göre 7-14m aralığında yüksek deformasyonların oluştuğu belirlenmiştir.

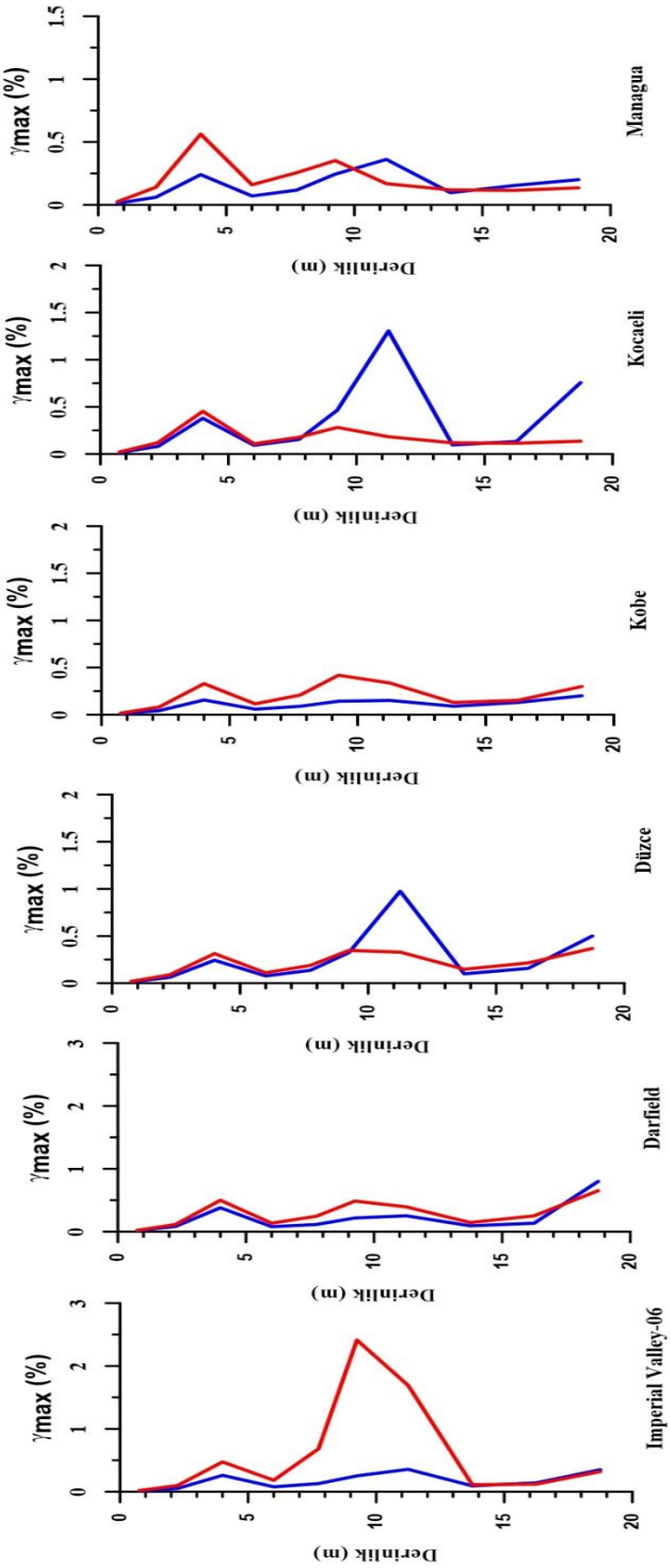
Yapılan analizler sonucunda Darfield, Kobe, Managua ve Parkfield 02 depremlerinde EL ve NL analizlerin büyük benzer deformasyon değişimleri olduğu görülmüştür.



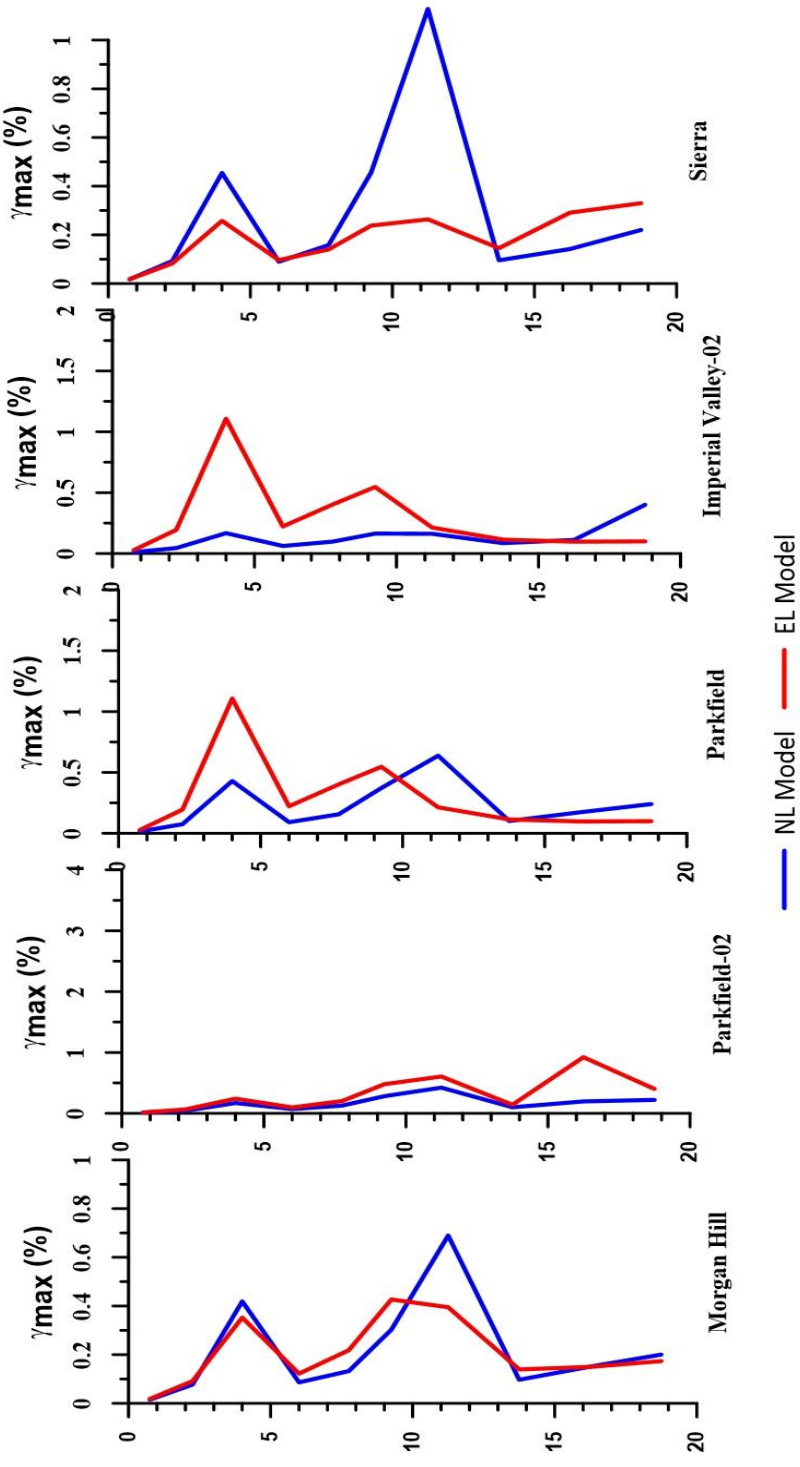
Şekil 6.32 Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi



Şekil 6.32. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi (devam)



Şekil 6.33. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

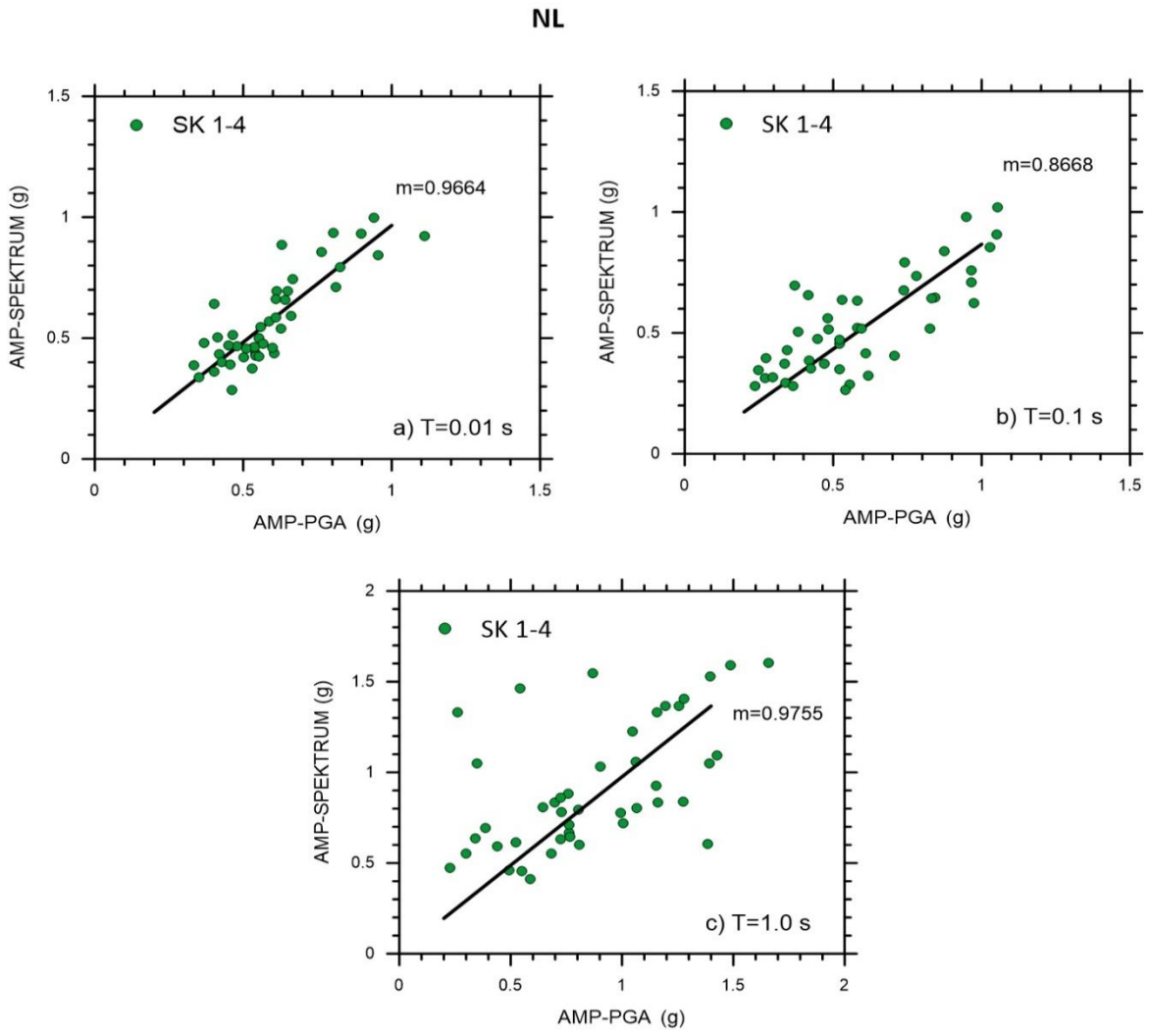


Şekil 6.33. Sk-1 noktasında EL ve NL analizde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi (devam)

6.4.3. EL ve NL Analizlerin Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması

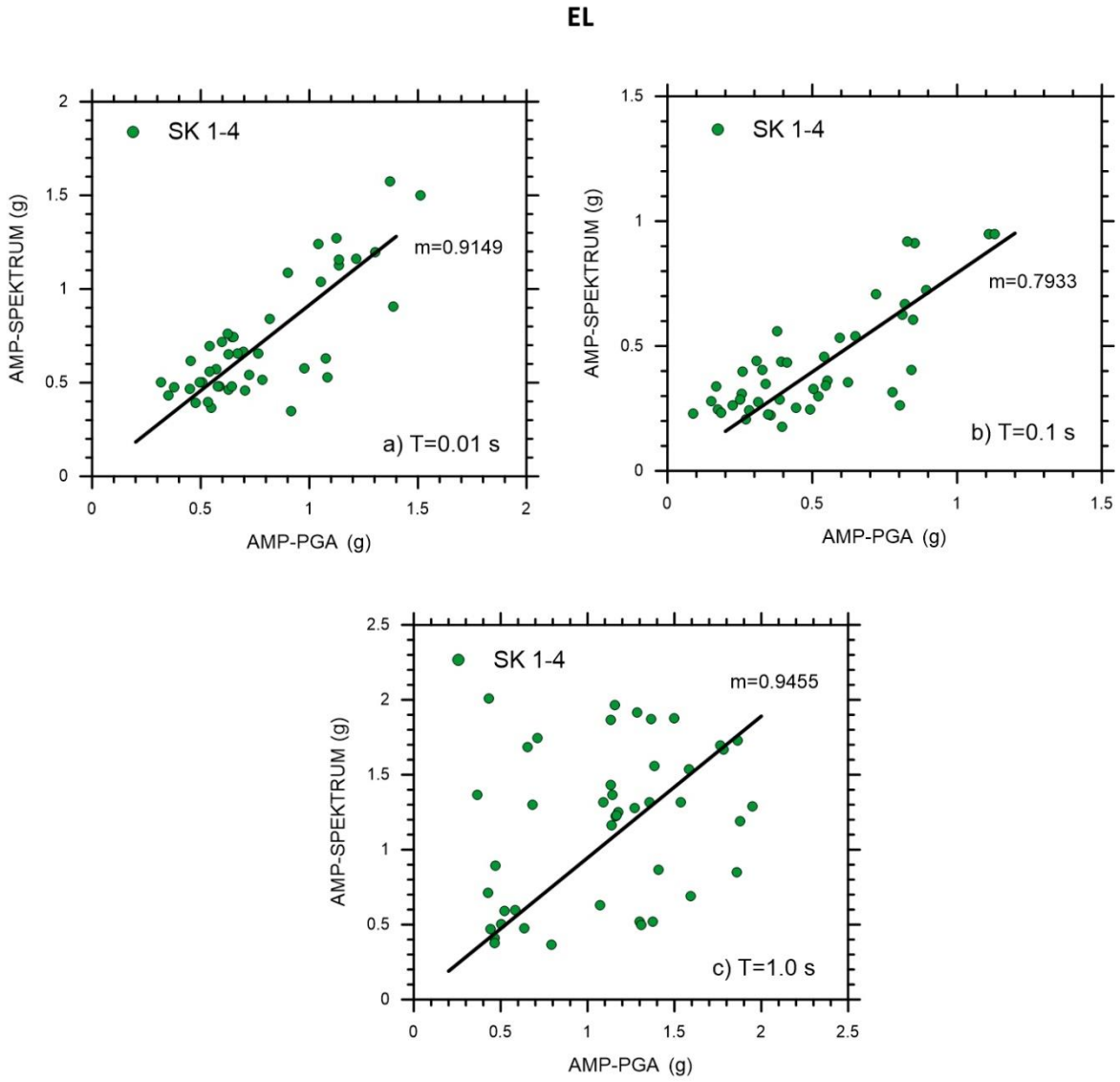
Yapı tasarımında kullanılan T:0.01, T:0.1 ve T:1.0 sn periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme yöntemi NL ve EL analizler olarak karşılaştırılmış ve Şekil 6.34 ve 6.35'te gösterilmiştir.

Öncelikle NL analizde T:0.01s ve T:1.0 s'de 0.9664 ve 0.9755 oranında benzerlik elde edilirken T:0.1 s'de 0.8668 oranında benzerlik elde edilmiştir. Yapı tasarımında zemin büyütme etkisi farklı periyotlarda farklı ölçeklendirme yöntemlerine göre değişkenlik göstermektedir.



Şekil 6.34. Doğrusal olmayan (NL) analizde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması

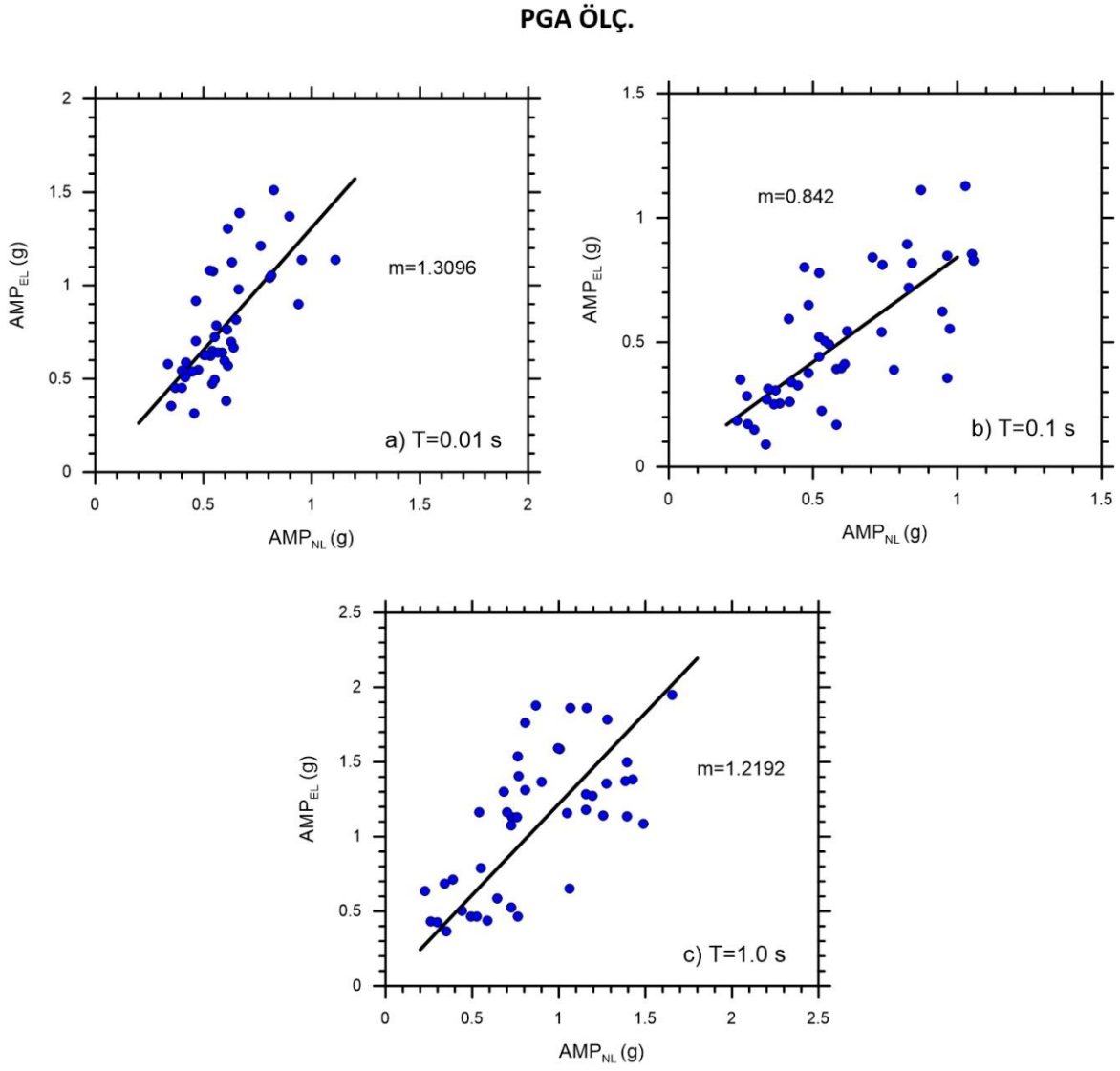
Diğer analiz yönteminde ise EL yaklaşımında, T:0.01s ve T:1.0s'de 0.9149 ve 0.9455 oranlarında benzerlik elde edilirken T:0.1s'de ise 0.7933 oranında benzerlik olduğu görülmüştür. Hem analiz yönteminin hem ölçeklendirme yönteminin farklı periyotlarda zemin büyütme faktörlerinde etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.35. Eşdeğer doğrusal (EL) analizde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması

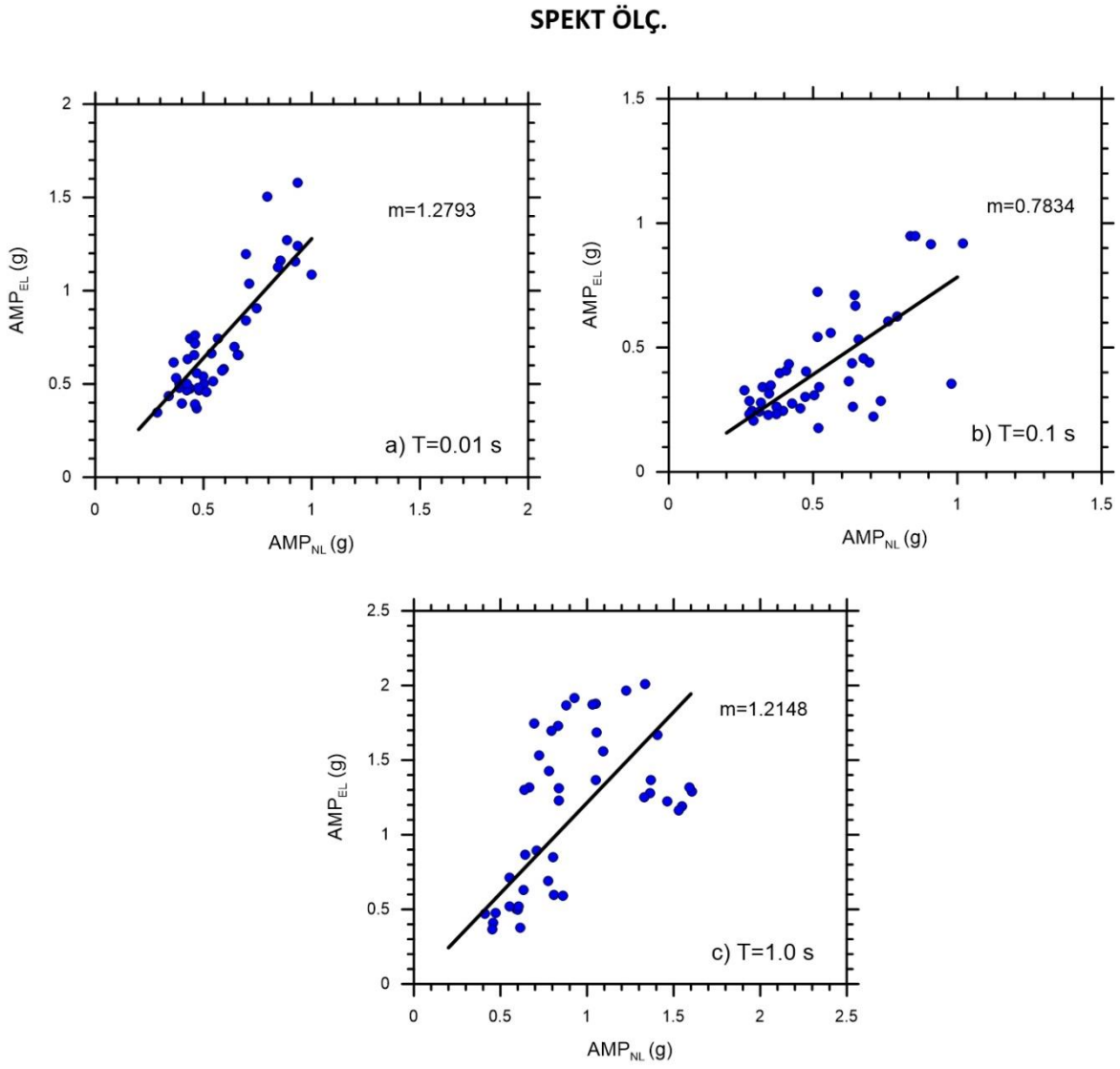
6.4.4. Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması

Yapılan bir diğer değerlendirmede ise zemin büyütme faktörü (amplifikasyon) değerleri NL ve EL olarak iki farklı ölçeklendirme yönteminde karşılaştırılmıştır. Öncelikle zaman-tanım alanında yapılan analizler tüm sondajlardan elde edilen veriler yine üç farklı periyot değerlerinde (T:0.01s, T:0.1s, T:1.0s) karşılaştırılmış ve Şekil 6.36'da gösterilmiştir. Burada T:0.01s'de yapılan karşılaştırmada NL-EL analizler 1.3096 oranında, T:0.1s'de 0.842 oranında ve T:1.0s'de 1.2192 oranında benzerlik olduğu görülmüştür.



Şekil 6.36. Zaman-tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörlerinin karşılaştırılması

Bir diğer ölçeklendirme yönteminde ile yapılan analizlerde, frekans-tanım alanında, yine üç periyot değerlerinde NL-EL analiz sonuçlarından zemin büyütme faktörleri karşılaştırılmış ve Şekil 6.37'de gösterilmiştir. 4 sondaj noktasından elde edilen verilere bakıldığında, T:0.01s'de 1.2793 oranında, T:0.1s'de 0.7834 oranında, T:1.0s'de 1.2148 oranında benzerlik olduğu görülmüştür.



Şekil 6.37. Frekans-tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörlerinin karşılaştırılması

6.5. Zemin Büyütme Analizi ve TBDY 2018'e Göre Performansının Değerlendirilmesi

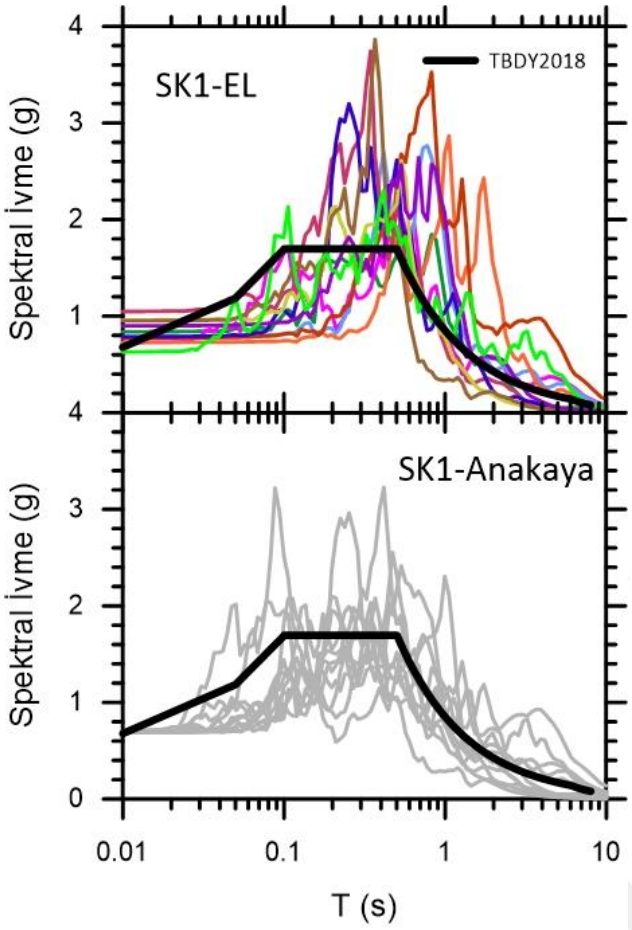
Sahaya özel yapılan 4 adet sondaj kuyusunda 11 adet deprem ivme kaydı ile iki farklı ölçeklendirme yöntemi kullanılarak yapılan zemin büyütme analizleri sonucunda yüzey tepki spektrumları elde edilmiştir. TBDY 2018'in bölgeye interaktif web uygulaması ile önermiş olduğu tepki spektrumu ile her bir sondaj kuyusundan elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

6.5.1. Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçları

Çalışma sonucunda 4 adet sondaj noktasından elde edilen veriler ile yapılan analizler incelenmiş ve öncelikle eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfı karşılaştırılmış değerlendirmelerde bulunulmuştur. Sk-1 sondaj noktasında zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile elde edilen yüzey tepki spektrumları Şekil 6.38'de gösterilmiştir.

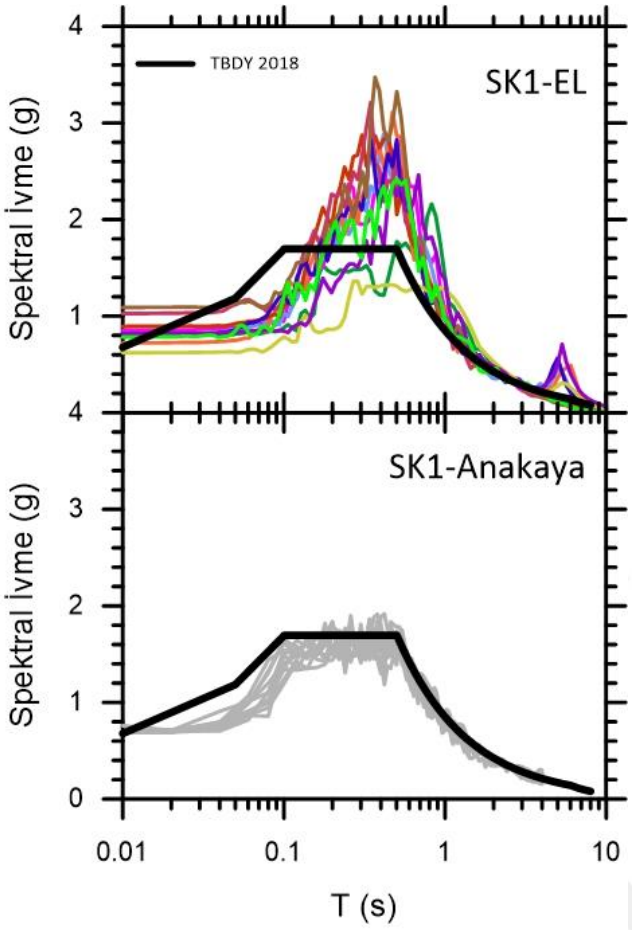
Şekil 6.38 incelendiğinde her bir deprem analizinden elde edilen spektral ivmelerin 0.6 g ile 1.1 g arasında başlangıç değerlerinin olduğu, 0.3 sn'deki periyotta 3.8 g değerlerine kadar ulaştığı görülmektedir. EL analizde anakaya spektral ivmelerine göre yüzeyde artış olduğu belirlenmiştir. TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfı incelendiğinde ise yüzeyde oluşan spektral ivmeleri tam anlamıyla kapsamadığı belirlenmiştir. Zarfın ilk köşe noktasının doğru olsada plato bölgesinin düşük ivme değerlerinde kaldığı görülmüştür.

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile yapılan EL analiz sonuçları Şekil 6.39'da gösterilmiştir. Burada anakaya spektral ivmelerinin spektrum zarfı ile beraber olması ölçeklendirme yönteminden kaynaklanmaktadır. Yüzeyde oluşan spektrum ivme değerleri ise 3.4 g değerine kadar ulaştığı görülmektedir. TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfı incelendiğinde, zarfın plato bölgesinin yine düşük ivme değerlerinde kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.38. Sk-1 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

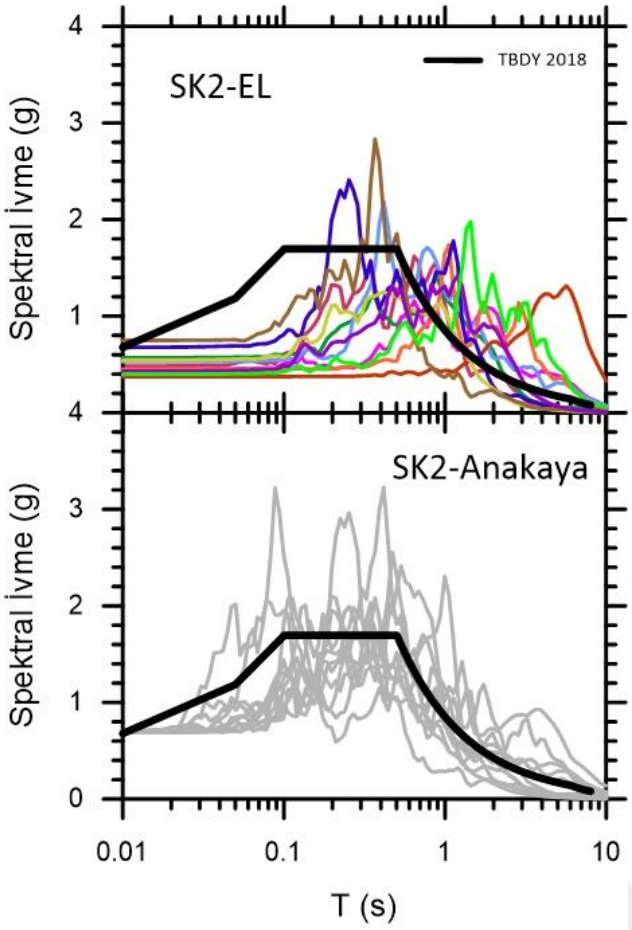
Sk-1 sondaj noktasındaki her iki ölçeklendirme ile yapılan EL analizler karşılaştırıldığında, zaman tanım alanında ölçeklendirilen ivmelerin diğer ölçeklendirmeye göre daha yüksek spektral ivme değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Burada Şekil 6.38'de 3.8 g değerlerine ulaşırken, diğer yöntemde 3.4 g değerinde kalmıştır. Ayrıca TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfı kıyaslandığında Sk-1 için her iki yöntemde de zarfın plato bölgesinin düşük ivme değerlerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.39. Sk-1 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Sk-2 sondaj noktasında yapılan EL analizler öncelikle zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda Şekil 6.40'da gösterilmiştir. Başlangıç spektral ivmelerin 0.4-0.8 g arasında değiştiği görülmektedir. Burada spektral ivmelerin T:0.2 sn'den sonra artış gösterdiği 0.4 sn'de 2.8 g değerine ulaştığı belirlenmiştir. Genel olarak ivmelerin dağılımı incelendiğinde yüksek periyot değerlerinde olduğu görülmüştür.

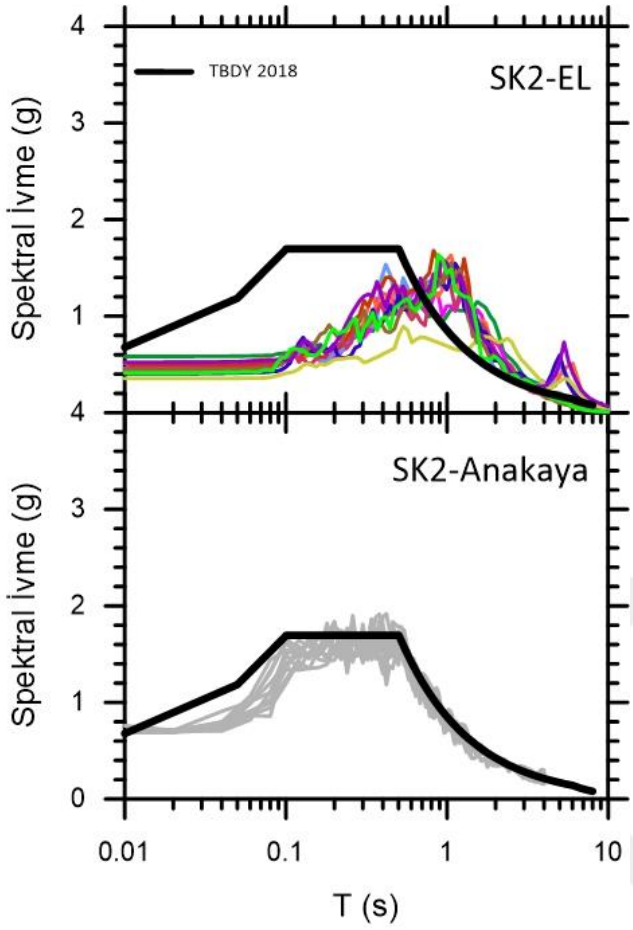
TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfı ile Sk-2 noktasındaki EL analizler karşılaştırıldığında, bölgeyi ifade etmek açısından spektrum zarfının ivme değerlerinin yeterli olsada periyot değerleri açısından düşük kaldığı görülmüştür. Zarfın yüksek periyot değerlerinde eksik kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.40. Sk-2 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda Sk-2 sondaj noktasına ait EL analizler Şekil 6.41'de gösterilmektedir. Spektral ivmelerin 0.4-0.6 g arasında başladığı belirlenmiştir. Ayrıca spektral ivme değerlerinin T:1.0 sn'de pik yaparak 1.6 g değerlerine ulaştığı görülmektedir.

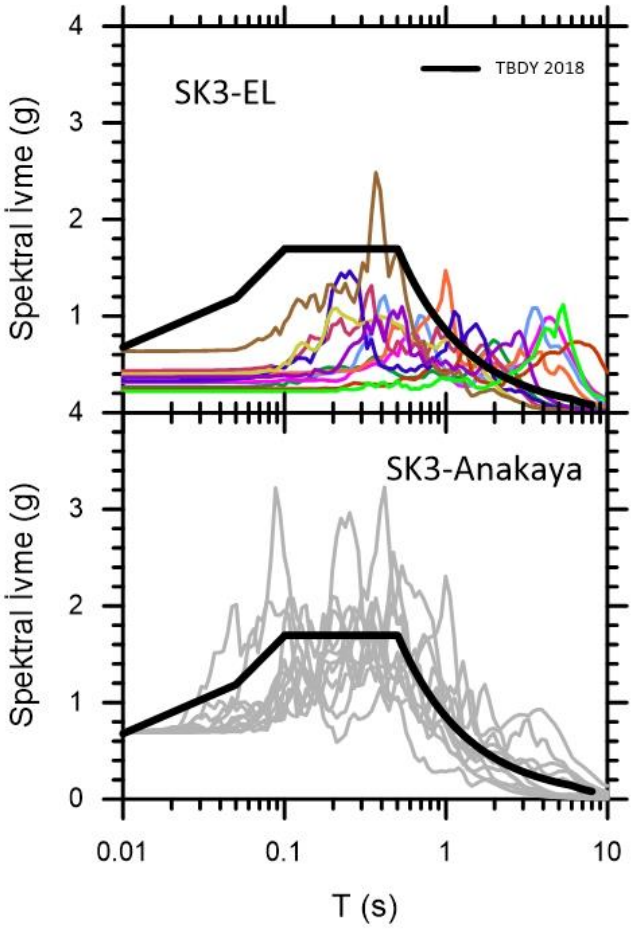
TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfının ise ivmelerin değeri olarak çok iyi temsil ettiği ancak plato bölgesinin daha yüksek periyot değerlerine kayması gerekmektedir. Her iki yöntemde de genel olarak spektral ivme değerlerini iy tahmin ederken periyot değerlerinde düşük kalmıştır.



Şekil 6.41. Sk-2 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Sk-3 sondaj noktasında yapılan zaman tanım alanında ölçeklendirme ile analizler Şekil 6.42'de gösterilmiştir. Burada başlangıç spektral ivmelerin 0.2-0.8 g arasında değiştiği görülmektedir. Genel olarak spektral ivmelerin anakayaya göre daha düşük değerlerde olduğu, bu durumda bölgede ivmelerde sönümleme meydana geldiği belirlenmiştir. Spektral ivmenin T:0.1 sn'den sonra arttığı ve 2.2 g değerinde pik yaptığı görülmüştür.

TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfının spektral ivmeleri genel olarak temsil ettiği ve plato bölgesinin ivme değerlerinin yeterli olduğu ancak periyot değerlerinin biraz daha artması gerektiği belirlenmiştir.

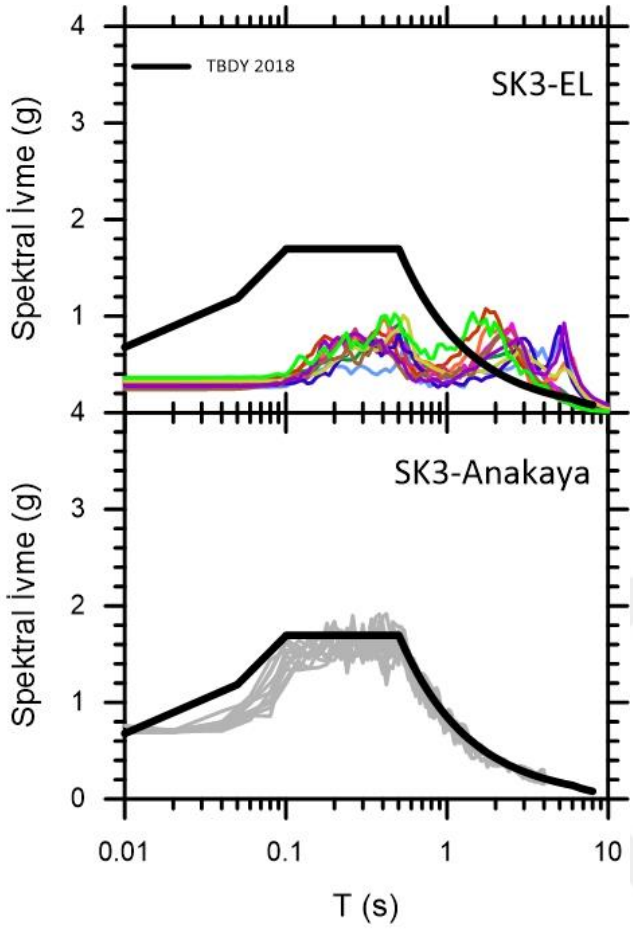


Şekil 6.42. Sk-3 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile yapılan EL analizler Şekil 6.43'te gösterilmektedir. Başlangıç spektrum ivme değerlerinin 0.2-0.4 g arasında değişitiği belirlenmiştir. Bu analizde de anakaya ivmelerine göre sönümleme meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak yüksek periyotlarda büyütme meydana gelmiştir.

Spektral ivmelerin genel olarak 1.0 g'den düşük değerde olduğu ve yönetmelik zarfının spektral ivmeleri genel olarak temsil etsede daha düşük değerlerde ve yüksek periyotlarda bölgeyi daha net temsil edeceği görülmektedir.

İki farklı ölçeklendirmede ise zaman tanım alanındaki ivmelerin daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

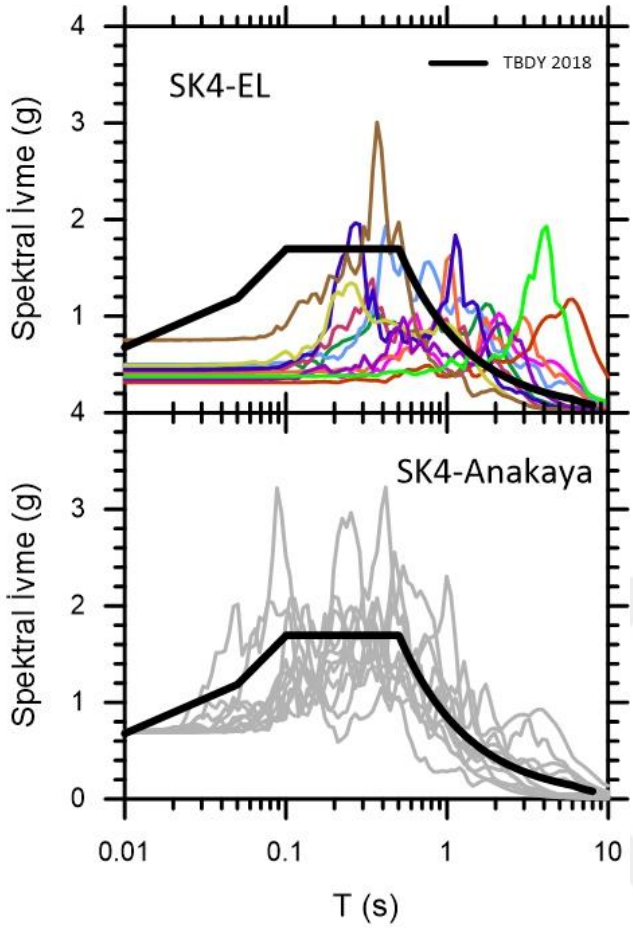


Şekil 6.43. Sk-3 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Eşdeğer doğrusal analizlerde bir diğer sondaj noktası olan Sk-4 zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile analizler Şekil 6.44'te gösterilmektedir. Burada spektral ivmelerin genel olarak anakayaya göre sönümlenmiş olduğu görülsede yüksek periyot değerlerinde büyütme olduğu belirlenmiştir.

Başlangıç spektral ivmelerin 0.2-0.8g arasında değiştiği ve T:0.4 sn'de pik noktasına ulaştığı 3.0 g değerinde olduğu görülmektedir. Bölgenin spektrum zarfı incelendiğinde plato bölgesinin yüksek periyot değerlerini tam temsil etmediği ancak spektral ivme değerlerinin yeteri kadar temsil edildiği belirlenmiştir.

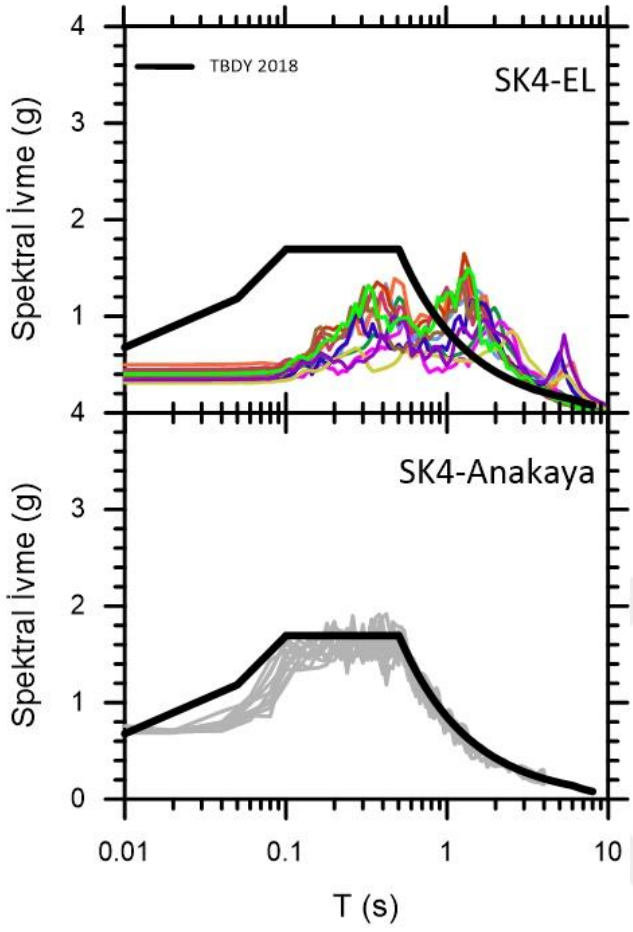
Bir diğer analiz yönteminde yapılan analizlde ise Şekil 6.45'te görüldüğü üzere



Şekil 6.44. Sk-4 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

düşük periyot değerlerinde sönümleme, yüksek periyotlarda ise büyütme meydana geldiği görülmektedir. TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfının yüksek periyotlarda tam temsil etmediği bu sondaj noktasında da belirlenmiştir.

İki farklı ölçeklendirme ile yapılan analizler karşılaştırıldığında zaman tanım alanında daha yüksek spektral ivme değerlerinin olduğu belirlenmiştir. Burada her iki analizde de yönetmeliğin spektral ivme değerlerinden ziyade periyot değerlerinde düşük kaldığı görülmektedir.

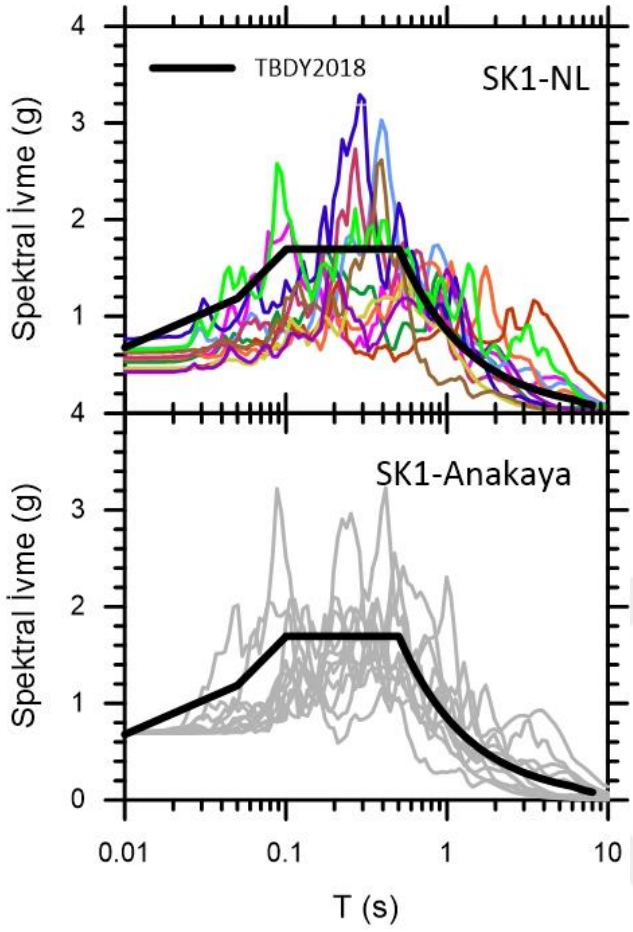


Şekil 6.45. Sk-4 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile EL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

6.5.2. Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Çalışmada sondaj verileri ile her iki ölçeklendirme yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan analizler yapılmış ve elde edilen spektral ivme değerleri ile TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spktrum zarfı ile karşılaştırılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Doğrusal olmayan analizlerde Sk-1 sondaj noktasında yapılan ve zaman tanım alanında ölçeklendirilen ivmeler kullanılan analiz sonuçları Şekil 6.46'da gösterilmiştir. Burada başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.4-0.8 g arasında değiştiği, T:0.3 sn'de 3.2 g değerinde pik yaptığı belirlenmiştir.



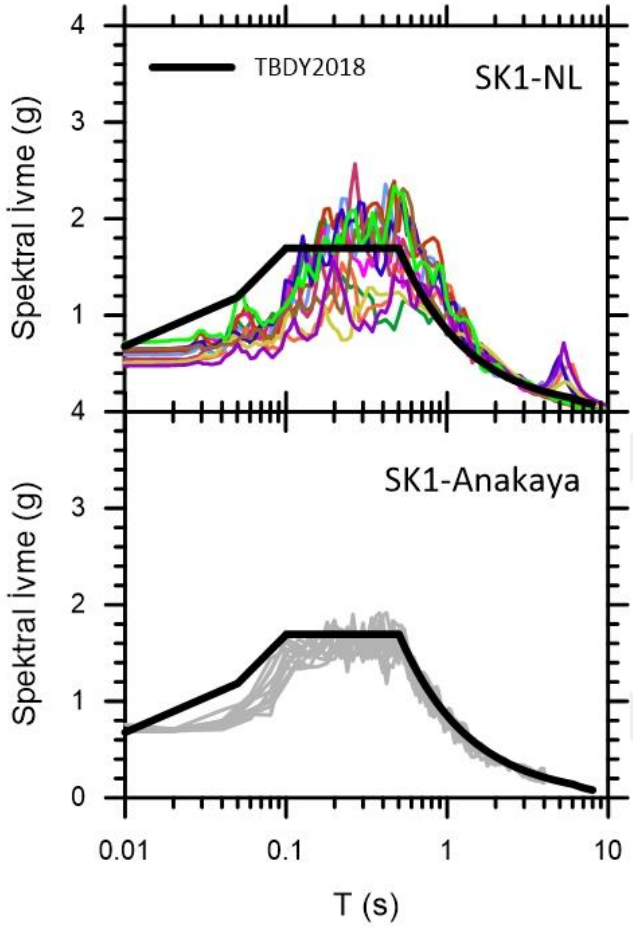
Şekil 6.46. Sk-1 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Bu analizde yönetmelik zarfını değerlendirecek olursak, zaarfın köşe koordinatlarının yeterli olduğu gibi görülsede spektral ivme değerleri açısından düşük kaldığı görülmektedir.

Sk-1 sondaj noktasında diğer ölçeklendirme yöntemi ile elde edilen ivmelerin NL analiz sonuçları Şekil 6.47'de gösterilmektedir. Burada başlangıç spektral ivmelerin 0.4-0.8 g arasında değiştiği belirlenmiştir. T:0.1 sn'den sonra artışa geçen spektral ivmelerin 0.25 sn'de 2.6 g değerinde pik yaptığı görülmektedir.

İki yöntem karşılaştırıldığında zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirmede daha yüksek spektral ivme değerlerinin olduğu ve her iki şekilde de yönetmelik zarfının düşük

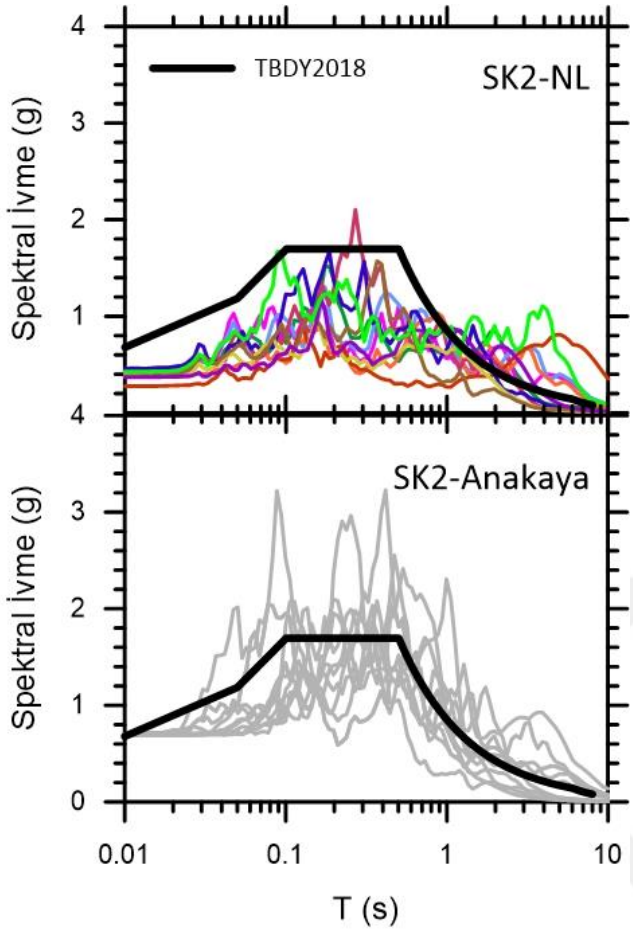
ivme değerlerinde kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.47. Sk-1 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Çalışmada Sk-2 sondaj noktasında zaman tanım alanında ölçeklendirilen ivme kayıtları ile yapılan analiz Şekil 6.48'de gösterilmektedir. Burada spektral ivme değerlerinin 0.2-0.6 g arasında başlanıç değerlerinde olduğu ve T:0.3 sn'de pik değere ulaştığı ve 2.0 g değerinde olduğu belirlenmiştir. Anakaya ivmelerine bakıldığında bazı deprem ivmelerinin sönümlendiği, yüksek periyotlarda büyütmeye maruz kaldığı belirlenmiştir.

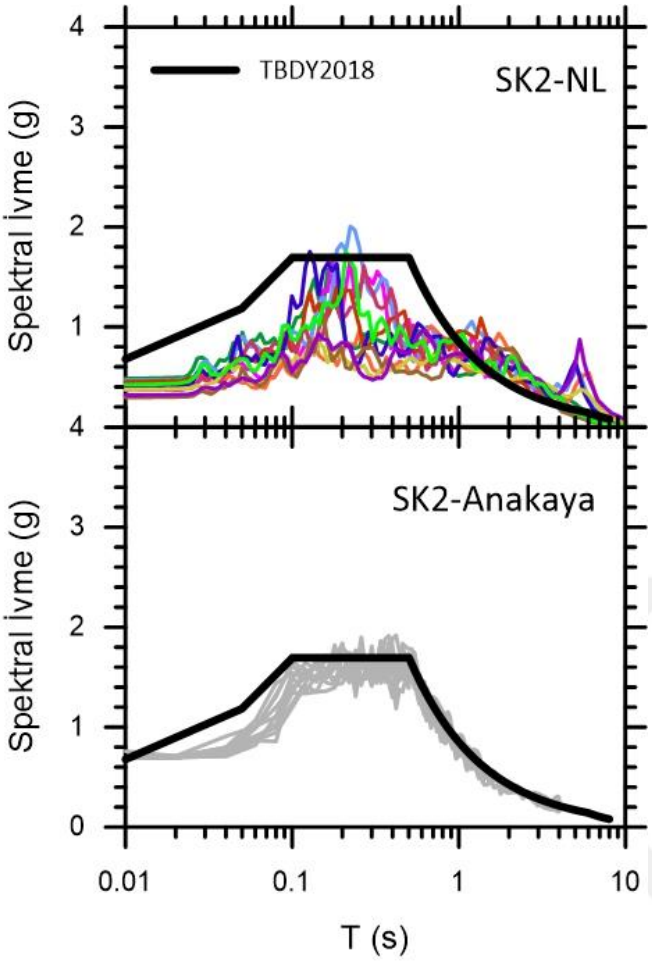
Bölgeye önerilen spektrum zarfı değerlendirildiğinde, yüzeyde oluşan ivmeleri oldukça iyi tahmin ettiği belirlenmiştir. Burada yapılan NL analizlerin yeterli seviyede yönetmelik ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.48. Sk-2 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile Sk-2 sondaj noktasında ait NL analiz Şekil 6.49'da gösterilmiştir. Başlangıç spektral ivmenin 0.3-0.5 g arasında değiştiği belirlenmiştir. İvmelerin T:0.1 sn'den sonra artışa geçtiği ancak en fazla anakaya seviyelerinde olduğu görülmüştür. Burada TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfı ile genel olarak uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

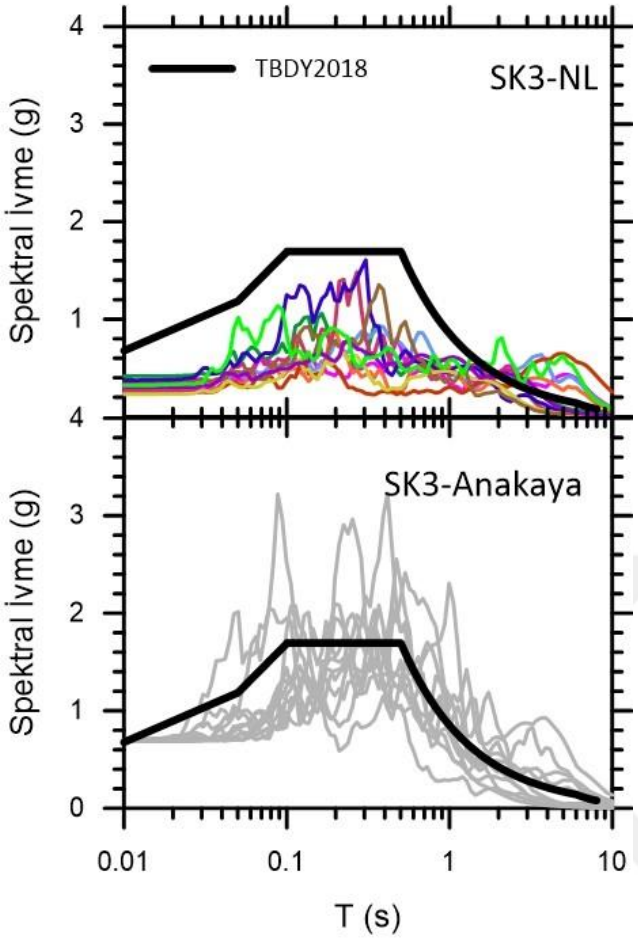
Her iki ölçeklendirme yöntemi karşılaştırıldığında zaman tanım alanında elde edilen ivmeler ile yapılan analizlerde daha yüksek ivme değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Her iki şekilde de Sk-2 için yüksek periyotlar haricinde genel olarak uyumludur.



Şekil 6.49. Sk-2 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Sk-3 sondaj noktasında yapılan ve öncelikle zaman tanım alanında ölçeklendirilen deprem ivmeleri ile yapılan NL analizler Şekil 6.50'de gösterilmiştir. Burada başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.2-0.4 g arasındadır. İvme değerleri T:0.03 sn'den sonra artışa geçtiği 0.3 sn'de pik değere ulaşarak 1.6 g olmuştur. Anakaya ivmelerine göre düşük periyotlarda sönümleme olduğu belirlenmiştir.

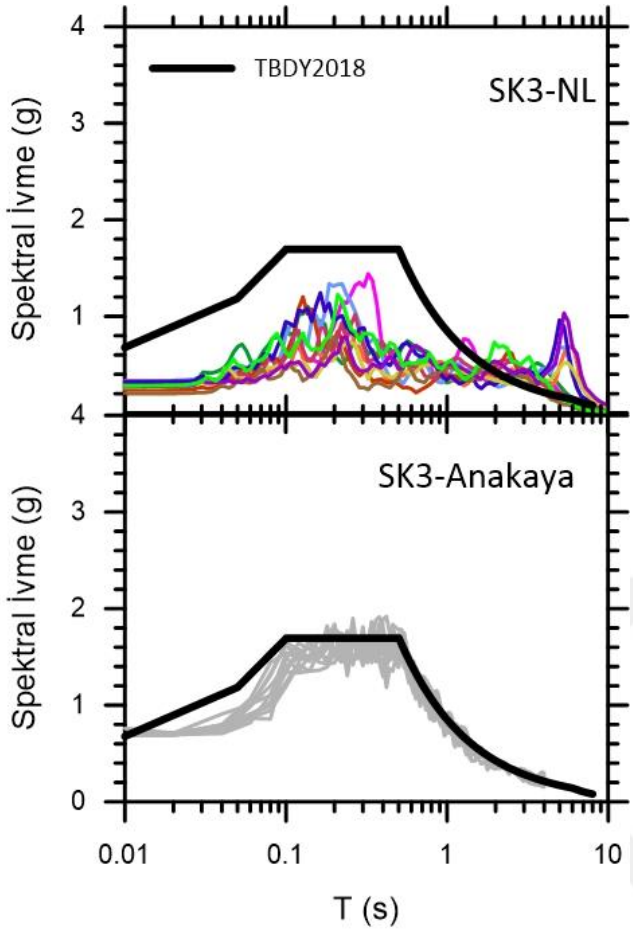
TBDY 2018'e göre değerlendirildiğinde, T:2.0 sn'ye kadar spektrum zarfının altında kaldığı ve yönetmeliğin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu periyot değerinden sonra ise zarftan daha yüksek ivme değerleri olduğu görülmektedir.



Şekil 6.50. Sk-3 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda kullanılan ivmeler ile Sk-3 sondaj noktasında yapılan NL analiz Şekil 6.51'de gösterilmiştir. Başlangıç spektral ivmelerin 0.2-0.4 g arasında değiştiği belirlenmiştir. Spektral ivmelerin T:0.03 sn'den itibaren artışa geçtiği ve 0.3 sn'de pik değer olan 1.4 g olduğu görülmüştür.

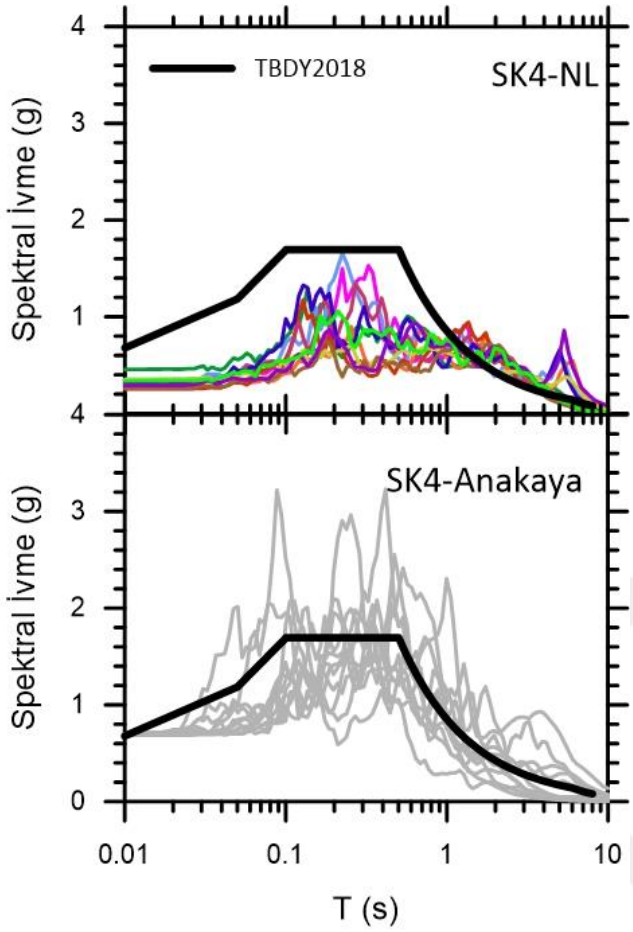
Yapılan bu analizlerin bölgeye yönetmeliğin önerdiği spektrum zarfı ile değerlendirildiğinde, spektrumun plato köşe noktalarının doğru periyot değerlerinde olsa da, yüksek ivme değerlerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.51. Sk-3 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan son sondaj ise Sk-4'te zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile yapılan NL analiz Şekil 6.52'de gösterilmektedir. Başlangıç spektral ivmelerin 0.2-0.5 g arasında değişitiği ve T:0.04 sn'den sonra artışa geçerek 0.25 sn'de pik değer olan 1.6 g değerine ulaştığı belirlenmiştir. Anakaya ivmelerine göre ivme değerlerinde sönümleme gerçekleştiği görülmektedir.

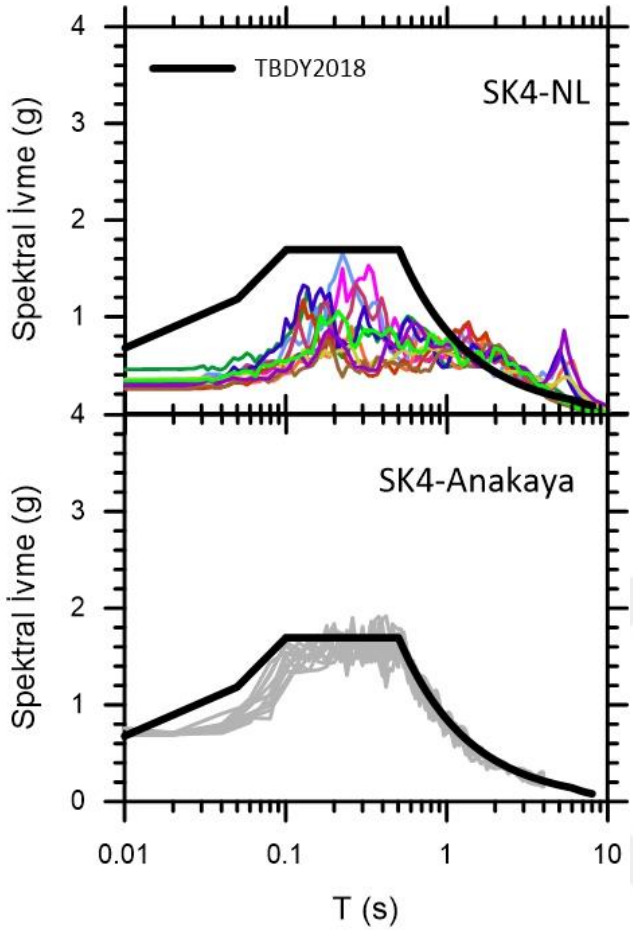
Bu sondaj noktasında yapılan NL analiz yönetmeliğin önermiş olduğu spektrum zarfı ile değerlendirildiğinde ise, genel olarak ivme değerlerini temsil ettiği ancak plato bölgesinin başlangıç kısmının biraz yüksek değerde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.52. Sk-4 zaman tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Diğer analizde ise frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile kullanılan ivmeler sonucunda NL analiz sonucu Şekil 6.53'te gösterilmektedir. Burada başlangıç ivme değerlerinin 02.-0.5 g arasında değiştiği görülmektedir. Spektral ivmenin T:0.2 sn'den sonra 1.6 g değerine ulaştığı görülmektedir. Anakaya ivmelerine göre sönümleme meydana gelmdiği belirlenmiştir.

Yönetmeliğin performansı değerlendirildiğinde bu analiz sonucunda elde edilen ivmelerin spektrum zarfının plato bölgesinin altında kaldığı bölgeyi bu anlamda iyi temsil ettiği belirlenmiştir. Burada sadece yüksek periyot değerlerinde zarfı geçtiği belirlenmiştir.



Şekil 6.53. Sk-4 frekans tanım alanında ölçeklendirme ile NL analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Sakarya ili Adapazarı ilçesi pilot bölge alınarak zemin davranış analizleri yapılmıştır. İlk aşamada arazi çalışmaları sonucunda örselenmemiş numuneler elde edilmiş ve arazi deneyleri yapılmıştır. Ardından laboratuvarda yapılan dinamik deneyler ile sahaya özel zemin tabakalarının dinamik kayma modülü-birim şekil değiştirme ve sönümleme oranı değerleri elde edilmiştir. Bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan 11 adet deprem ivme kaydı seçilerek ölçeklendirilmiştir. Analiz yöntemi olarak ise hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Çalışma kapsamında Sakarya ili Adapazarı ilçesinde yapılan saha çalışmaları sonucunda 4 adet sondaj noktası belirlenmiş ve örselenmemiş numuneler elde edilmiştir. Ayrıca her 1.5m'de SPT deneyleri yapılmıştır. Derinliğe bağlı olarak sondaj noktalarında kayma dalgası hızı (Vs) ölçümleri yapılmıştır.

- Elde edilen numunelerin öncelikle tanımlama deneyleri yapılmış ardından her zemin tabakasının sahaya özel dinamik parametreleri olan kayma modülü-birim şekil değiştirme ve sönümleme oranı eğrileri elde edilmiştir.

- Yapılan RC ve TRX deneylerinin sonuçları Matlab programlama dili yardımıyla deney sonuçları birleştirilmiş ve en uygun eğriler elde edilmiştir.

- Bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan ve TBDY 2018'in önerdiği şekilde 11 adet deprem seçilmiş, ardından hem frekans tanım alanında hem de zaman tanım alanında ölçeklendirilmiştir.

- Deepsoil programı ile sahaya özel eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan toplam 88 adet zemin büyütme analizi yapılmıştır.

- Yapılan çalışmanın genel olarak tanıtılmasından sonra her bir aşamada elde edilen

sonuçlar detaylandırılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ise;

- RC ve TRX deney sonuçları farklı deformasyon seviyelerindeki kayma modülü ve sönümleme oranı değerlerini hesaplamaktadır. Bu iki deney sonucundan elde edilen veriler derinlik ve çevre basıncı arttıkça birbirini daha net takip etmektedir. Deney sonuçlarında çevre basıncının etkisi çok net görülmüştür.

- Laboratuvarda elde edilen kayma modülü azalım eğrileri literatürde kullanılan üç adet referans eğri ile karşılaştırılmıştır. Burada her 5m için deney sonuçları ile referans eğriler karşılaştırıldığında 0-5m aralığında TRX deney sonuçlarının Darendeli 2001 referans eğrisine daha yakın sonuçlar elde edildiği ancak RC deney sonuçlarının ise Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. 5-10m aralığında TRX deney sonuçlarının Vucetic ve Dobry 1991 referans eğrisi üzerine denk gelirken, RC deney sonuçları Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerine yatkın olduğu görülmektedir. 10-15m aralığında Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerinin benzer davranış gösterdiği tüm deney sonuçlarının Darendeli 2001 ile diğer eğrilerin arasında davranış gösterdiği belirlenmiştir. 15-20m aralığında TRX deney sonuçlarının Darendeli 2001 referans eğrisine yakın olduğu RC deney sonuçlarının ise Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerine benzer davranış gösterdiği görülmektedir. 20-25m aralığında ise tüm deney sonuçlarının referans eğrilerden daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir.

- Sönümleme oranı eğrileri de aynı referans eğriler ile değerlendirilmiştir. Burada sönümleme değerlerinin 0-5m aralığında dağınık bir değerler olması nedeniyle her üç referans eğrisine uygun olduğu, ancak TRX deney sonuçlarının Vucetic ve Dobry 1991 referans eğrisine yatkın olduğu ancak yüksek deformasyon seviyelerinde ise yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. 5-10m aralığında ise tüm deney sonuçlarının Amir-Faryar vd. 2016 referans eğrisine yatkın değerler olduğu belirlenmiştir. 10-15m aralığında ise Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrileri benzer davranış göstermiş ve deney sonuçları bu referans eğrilerinden

daha düşük olduğu görülmektedir. 15-20m aralığında Vucetic ve Dobry 1991 ve Amir-Faryar vd. 2016 eğrilerinin yine benzer davranışta olduğu deney sonuçlarının daha düşük değerler olduğu belirlenmiştir. 20-25m aralığında ise veri sayısının az olması nedeniyle dağınık olduğu görülmektedir.

- Çalışamda yapılan EL ve NL analizler sonucunda yüzey tabakalarına ulaşan ivme-zaman grafikleri elde edilmiş ve ivme değerlerinde büyük değişimlerin olduğu gözlemlenmiştir. Sakarya ili yakınlarında daha önce meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremlerinin yüzeyde oluşan ivme değerleri incelendiğinde anakayada ivme değerlerinden %50'ye yakın bir değişimin olduğu tespit edilmiştir.

- Analizlerde EL analiz sonuçlarında yüzey pik ivme değerlerinin NL analizlere göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

- Yapılan EL ve NL zemin büyütme analizlerinde, iki farklı ölçeklendirme yöntemi ile yapılmıştır. Basit ölçeklendirme yönteminde (PGA) EL analiz yöntemlerinin NL analiz yöntemlerine göre daha yüksek büyütme faktörü değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Özellikle yüksek periyot değerlerinde zemin büyütme faktörünün 3'e kadar ulaştığı gözlenmiştir.

- Diğer ölçeklendirme yöntemi olan frekans tanım alanında (Spektrum) ile yapılan analizlerde depremlerin frekasında meydana gelen değişim nedeniyle benzer davranışta büyütme faktörü değerleri görülmüştür. Analizlerde EL analizlerin NL analizlere göre daha yüksek büyütme faktörü değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir.

- Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirmede deprem ivmelerinin aynı frekansa göre ölçeklendirilmesinden dolayı her bir deprem ivme kaydında benzer büyütme faktörleri görülmektedir. Sk 2,3,4'te 3 kata varan büyütme faktörleri görülmüştür. Ayrıca yüksek periyot değerlerinde ani pikten sonra düşüşe geçtiği belirlenmiştir. Sk-1 sondaj kuyusunda çok büyümesede Sk 2,3,4 sondaj kuyularında T:1.0'den sonra artış olduğu belirlenmiştir.

- Yapı tasarımında önemli periyot değerleri olan T:0.01, T:0.1 ve T:1.0 sn'deki analiz

değerleri karşılaştırılmıştır. Burada EL ve NL analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile iki farklı ölçeklendirme yöntemi karşılaştırılmıştır. Öncelikle NL analizde T:0.01s ve T:1.0 s'de 0.9664 ve 0.9755 oranında benzerlik elde edilirken T:0.1 s'de 0.8668 oranında benzerlik elde edilmiştir. EL analizlerde ise T:0.01 s ve T:1.0 s'de 0.9149 ve 0.9455 oranında, T:0.1 s'de 0.7933 oranında benzerlik elde edilmiştir.

- Yapı tasarımında zemin büyütme etkisi farklı periyotlarda farklı ölçeklendirme yöntemlerine göre değişkenlik göstermektedir. Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile EL-NL analizler karşılaştırıldığında; T:0.01 s ve 1.0 s'de 1.3096 ve 1.2192 oranında, T:0.1 s'de ise 0.842 oranında benzerlik elde edilmiştir. Diğer ölçeklendirme yöntemi olan frekans tanım alanında EL-NL analizler karşılaştırıldığında, T:0.01 s ve 1.0s için 1.2793 ve 1.2148 oranında, T:1.0 s'de 0.7834 oranında benzerlik elde edilmiştir.

- Sahaya özel yapılan zemin büyütme analizleri sonucunda yüzey tepki spektrumları TBDY 2018'in bölgeye önerdiği tepki spektrumu ile karşılaştırılmıştır. AFAD tarafından yayınlanan interaktif web uygulamasından alınan bölgenin tepki spektrumu toplam 4 adet sondajın iki farklı ölçeklendirme ve iki farklı analiz yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

- Yapılan değerlendirme sonucunda NL analizlerde her sondaj kuyusunda başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.4g ile 0.8g arasında değişitiği, pik spektral ivme değerinin ise 0.25sn'de 3.2g olarak belirlenmiştir.

- Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile yapılan analizlerde TBDY 2018'e göre değerlendirecek olursak, EL analizlerin başlangıç spektral ivmenin 0.6g ile 1.2g arasında değiştiği, pik spektral ivme değerinin yaklaşık 0.35 sn'de 3.9g seviyelerine ulaştığı belirlenmiştir. TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfı yapılan analizler ile değerlendirildiğinde zarfın plato bölgesinin düşük kaldığı görülmüştür. Ayrıca köşe frekanslarının büyük farklılık göstermesi nedeniyle yüksek periyotlardaki spektral davranış daha düşük değerlerle temsil edilmiştir.

- Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile yapılan analizlerde ise NL analizlerde Sk-1 sondaj kuyusunda başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.4g ile 0.8g arasında değiştiği görülmektedir. Analizler sonucunda pik spektral ivme değerinin ise 0.25sn'de 2.4g olarak belirlenmiştir. Diğer üç sondaj kuyularında ise 0.2g ile 0.6g arasında başlangıç spektral ivmenin değiştiği, pik ivmenin ise 0.2 sn'lerde yaklaşık 1.5g olduğu belirlenmiştir. TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi EL analizlerde ise Sk-1 sondaj kuyusunda başlangıç spektral ivmesi 0.6g-1.2g arasında değişkenlik gösterirken, pik spektral ivmesi ise 0.4sn civarında 3.2g olarak görülmektedir. Sk-2 ve Sk-4 sondaj kuyularında 0.4g-0.6g arasında başlangıç spektral ivme değerleri olduğu, pik spektral ivmenin ise 1.0 sn civarında 1.6g olduğu belirlenmiştir. Sk-3 sondaj kuyusunda ise 0.2g-0.4g arasında başlangıç spektral ivmesi olduğu, pik spektral ivmesinin ise hem 0.4sn'lerde hem de 2.0 sn civarında olduğu görülmektedir. TBDY 2018'in bölgeye önermiş olduğu spektral ivme zarfı ile analizler değerlendirildiğinde NL analizlerde, Sk-1 hariç diğer sondaj kuyularında plato bölgesinin yeterli olduğu ancak Sk-1 sondaj kuyusunda daha düşük ivme değerlerini gösterdiği belirlenmiştir. EL analizlerde ise Sk-2 ve Sk-4 sondaj kuyularının yeterli plato seviyelerini gösterdiği ancak Sk-1'de analizlere göre düşük ivme değerlerini, Sk-3'te ise yüksek ivme değerlerini gösterdiği görülmektedir. Ayrıca köşe frekanslarının yeterince uygun olmadığı düşük periyotları temsil ettiği belirlenmiştir.

- Değerlendirmeler sonucunda sahaya özel analizlerin deprem bölgelerinde yapılacak olan tasarımlar için önemli olduğu, bölgenin dinamik özelliklerinin temsil edilmesi açısından saha deneyleri ve örselenmemiş numunelerin doğru verilere ulaşmada önemli bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

- Farklı dinamik deneylerin yapılması ile geniş aralıkta birim deformasyon değerlerine karşılık gelen kayma modülü ile sönümle oranı değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır.

- Bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan depremlerin seçilmesi ve ölçeklendirilmesi zemin büyütme analizlerini etkilemektedir. Bu ölçeklendirme

yöntemlerinden zaman-tanım ve frekans-tanım alanında yapılan ölçeklendirmeler analiz sonuçlarını etkilemektedir.

- Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda yüzeydeki ivme değerleri ile yüzey tepki spektrumları değişmektedir.

- TBDY 2018'in bölgeye önerdiği tasarım tepki spektrumu ile yapılan analizlerden elde edilen tepki spektrumları arasında farklılık olduğu görülmüştür. TBDY 2018'in geniş bir veri havuzu ile geniş bölgeyi temsil etmesi nedeniyle bu farklılıklar meydana gelmektedir. Sahaya özel analizlerde elde edilen tepki spektrumları bu nedenle önemlidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Afacan, K. B., 2014, "Evaluation of Nonlinear Site Response of Soft Clay Using Centrifuge Models", Doktora Tezi, University of California, Los Angeles, 147p.

Afacan, K.B., Güler, E., 2019, Yeni Deprem Yönetmeliği Performansının Zemin Büyütme Analizi ile Belirlenmesi", 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ankara, Turkey, 8-11 October 2019.

Afacan, K. B., Yniesta, S., Shafiee, A., Stewart, J. P., & Brandenberg, S. J., 2019, Total Stress Analysis of Soft Clay Ground Response in Centrifuge Models. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 145(10), 04019061. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002115

Afad, 2021, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. www.afad.gov.tr

Ateş, A., 1999 Düzce Depreminde Zemin Yapı Rezonans Uyuşumuna Bağlı Oluşan Yapı Hasarlarının Araştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 4. 911-925.

Amir-Faryar, B., Aggour M.S., McCuen, R.H. 2017, Universal model forms for predicting the shear modulus and material damping of soils, Geomechanics and Geoengineering, 12(1), 60-71, DOI: 10.1080/17486025.2016.1162332

Andrus, R.D., Zhang, J-P., Ellis, B., Juang, C., 2013, Guide for Estimating the Dynamic Properties of South Carolina Soils for Ground Response Analysis, Clemson University.

Ansal, A., Tönük, G., Kurtuluş, A., 2011, Zemin Büyütme Analizleri ve Sahaya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi. 1.Turkey Earthquake Engineering and Seismology Conference:1–8.

Banerjee, S., Balaji, P., 2018, Effect of Anisotropy on Cyclic Properties of Chennai Marine Clay, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 4:27, https://doi.org/10.1007/s40891-018-0144-8

Basa, F., Yurdakul, M.E., Sarıaslan, R., Osmançelebioğlu, F., 1998, Sakarya İlinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynaklar, Rapor No:10195, MTA

Başaran, V., 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY2019) Göre Afyonkarahisar İçin Deprem Yüklerinin Değerlendirilmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Sayı 18, s. 1028-1035.

Bayat, M., Ghalandarzadeh, A., 2017, Stiffness Degradation and Damping Ratio of Sand-Gravel Mixtures Under Saturated State. International Journal of Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/s40999-017-0274-8

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Beliceli, A. 2006, Eskişehir Yerleşim Yeri Zemin Büyütme Etkisinin Makaslama Dalga Hızına (V_S) Bağlı Olarak Belirlenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi.

Bilican, Ö., Bozdoğan, K.B., Keskin, E., 2021, Tek Boyutlu Zemin Büyütme Analizlerinde Transfer Fonksiyonunun Değiştirilmiş Sonlu Elemanlar Taşıma Matrisi Yöntemi ile Elde Edilmesi. Turkish Journal of Earthquake Research. 3(1). 53-74.

Bol, E., 2003, Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Özellikleri. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.

Civelek, E., 2021, Eşdeğer ve Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri ile Zeminlerin Dinamik Davranışının Belirlenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.

Darendeli, MB., 2001, Development of a new family of normalized modulus. Ph.D. The University of Texas, Austin.

Dutta, T.T., Saride, S., Jallu, M. 2017, Effect of saturation on dynamic properties of compacted clay in a resonant column test. Geomechanics and Geoengineering. 12.(3). 181-190

El Mohtar, C., Drnevich, V.P., Santagata, M., Bobet, A., 2013, Combined Resonant Column and Cyclic Triaxial Tests for Measuring Undrained Shear Modulus Reduction of Sand With Plastic Fines. Geotechnical Testing Journal. 36:4 doi:10.1520/GTJ20120129

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., 2011, 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Adapazarı (NK 36-13) Paftası, Seri No:14, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.

Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M., Ünay,E., 1998, Doğu Marmara Bölgesinin Neojen-Kuvaternerdeki Evrimi, MTA dergisi, No:120, Ankara.

Fırat, S., Isık, N.S., Arman, H., Demir, M., Vural, I., 2016, Investigation of the soil amplificattion factor in the Adapazarı region. Bull Eng Geol Environment 75:141-152

Fırat, S., Demir, M., 2016, Adapazarı Bölgesi Zemin Büyütme Faktörünün İncelenmesi. Türk Bilim Araştırma Vakfı. 9(3). 1-9.

Garcia, S.R., Romo, M.P., Nazuno, J.F., 2013, Characterization of ground motions using recurrence plots, Geofísica Internacional. 52(3):209-227.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Güler, E., Afacan, K.B., 2021, Dynamic behavior of clayey sand over a wide range using dynamic triaxial and resonant column tests. Geomechanics and Engineering. 105-113. http://dx.doi.org/10.12989/gae.2021.24.2.105

Güllü, H., 2001, Dinar'ın Zemin Büyütmelerine Göre Coğrafik Bilgi Sistemleri ile Mikrobölgeleme. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.

Gürbüz, A., Kazancı, N., 2017, Dünya'da ve Türkiye'de Kuvaterner Jeolojisi Haritalarının Hazırlanması ve Karşılaşılan Sorunlar. Türkiye Jeoloji Bülteni. 60 (2017) 665-699.

Hachem, M.M., 2004, BISPEC: Interactive Software for the Computation of Unidirectional and Bidirectional Nonlinear Earthquake Spectra. Structures Congress 2004.

Hardin, B.O., Richart, F.E., 1963, Elastic wave velocities in granular soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 89, SM1, 33-65.

Harman E, Küyük HS., 2016, Sakarya ili için olasılığa dayalı sismik tehlike analizi Engin. SAÜ Fen Bilim Derg 2016; 20:23–31

Herece, E., Akay, E., 2003, Kuzey Anadolu Fay Atlası, KAF Boyu Jeoloji Haritası-(Sapanca-Dokurcan), MTA (Maden Tetkik Arama)

Hosseini Mir Mohammad, S. M.; Asadolahi Pajouh, M., Hosseini, F. Mir Mohammad Hosseini, F., 2010, The Limitations of Equivalent Linear Site Response Analysis Considering Soil Nonlinearity Properties, International Conf erences on Recent Advances in Geotechnical Ear thquake Engineering and Soil Dynamics. 14.

Hudson, M., Idriss, I., Beirkae, M., 1994, Quad4m user's manuel.

Idriss, I. M., Seed, R. B., 1968, An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco Earthquake. Bulletin of Seismological Society of America, 58(6), 2013-2032.

Ildır, M., Vural, İ., Kılıç, S., 2020, Sıvılaşma Potansiyeli Yüksek Adapazarı Zeminleri için Büyütme Faktörünün Araştırılması, Academic Platform Journal of Engineering and Science. 8-2. 266-273.

İyisan, H., Haşal, M.E., 2011, Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi, İTÜ dergisi Mühendislik, 10(4), 47-56.

Jmo, Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası, 2021, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği İle Uyumlu Spt-N Düzeltmesine İlişkin Hesap Cetveli Kullanım Kılavuzu.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kale, P., 2008, Yerel Arazi Etkilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizlerle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaptan, K., Tezcan, S., 2012, Deprem Dalgalarinin Zemin Büyütmesi Üzerine Örnekler, Türk Bilim Araştırma Vakfı. 5(4). 17-32.

Kaya, Z., Erken, A., 2015, Cyclic and post-cyclic monotonic behavior of Adapazari soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 77. 83-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.05.003

Keskin, E., Bozdoğan, K.B., 2018, 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi, Kırklareli University Journal of Engineering and Science, Cilt 4, Sayı 1, s. 74-90.

Khan, Z. Naggar, M.H., Cascante, G., 2011, Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests. Journal of the Franklin Institute. 348. 1363-1376.

Koçer,M., Nakipoğlu, A., Öztürk, B., Al-Hagri, M.G., Arslan, M.H., 2018, Deprem Kuvvetine Esas Spektral İvme Değerlerinin TBDY2018 ve TDY2007'ye göre Karşılaştırılması, Selçuk Teknik Dergisi, Cilt 17, Sayı 2,s. 43-58.

Kokusho, T., 1980, Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties For Wide Strain range. Soil and Foundations 20:2

Kumar, S.S., Krishna A.M., Dey, A., 2017, Evaluation of dynamic properties of sandy soil at high cyclic strains. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 99 (2017) 157-167.

Li, H., Senetakis, K., 2018, Effects of Particle Grading and Stress State on Strain-Nonlinearity of Shear Modulus and Damping Ratio of Sand Evaluated by Resonant-Column Testing. Journal of Earthquake Engineering., DOI: 10.1080/13632469.2018.1487349

Morsy, A.M., Salem, M., Elmamlouk, H.H., 2019, Evaluation of dynamic properties of calcareous sands in Egypt at small and medium shear strain ranges. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 116. 692-708.

Okur, V., 2002, Farklı Dinamik Gerilme Genlikleri Altında İnce Daneli Zeminlerin Gerilme Şekil Değiştirme ve Mukavemet Davranışları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 182p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999,. Multi-channel analysis of surface waves. Geophysics, 64(3), 800- 808.

Pistolas, G.A., Anastasiadis, A., Pitilakis, K., 2018, Dynamic Behaviour of Granular Soil Materials Mixed with Granulated Rubber: Effect of Rubber Content and Granularity on the Small-Strain Shear Modulus and Damping Ratio. Geotech Geol Eng (2018) 36:1267–1281.

Roblee, C., Chiou, B, 2004, A proposed geoindex model for design selection of nonlinear properties for site response analyses. Caltrans Geo-Research Group. Sacramento, CA.

Sancio, R.B., 2003, Ground Failure and Building Performance in Adapazarı, Turkey. University of California, Berkeley. Engineering-Civil and Enviromental Engineering. Doctor of Philosophy.

Sexena, S.K., Reddy, K.R. 1989, Dynamic Moduli and damping ratios for monterey no.0 sand by resonant column tests. Soils and Foundations. 29, 37-51.

Stewart, JP., Afshari, K., Hashash, YMA., 2014, Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analysis for ground motion prediction Report PEER. 2014(16), 152.

Sobolev, E., Ter-Martirosyan A., 2018, Interaction of the base and construction under seismic action, with considering various characteristics of soil damping. MATEC Web of Conferences. 251, 04011. https://doi.org/10.1051/matecconf/201825104011

Sönmezer, Y. B., 2015, Kırıkkale Şehir Merkezinin Deprem Risk Analizi Ve Sismik Mikrobölgelemesi, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Sönmezer, Y.B., Çeliker, M., Bas, S., 2019, An investigation on the evaluation of dynamic soil characteristics of the Elazig City through the 1-D equivalent linear site-response analysis. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 78:4689–4712.

Sönmezer, Y.B., Çeliker, M., 2020, Determination of seismic hazard and soil response of a critical region in Turkey considering far-field and near-field earthquake effect. 20(2), 131-146.

Tekin İ., 2012, The North Anatolian Fault. SpringerReference. https://doi.org/10.1007/springerreference_225340

Tezcan, S.S., Kaya, E., Bal, E., Özdemir, Z., 2002, Seismic amplificat ion at Avcılar, Istanbul, Engineering Structures, 24, 661-667.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Tönük, G., 2009, Saha Davranış Analizlerine Etki Eden Faktörler, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Deprem Mühendisliği, İstanbul.

Ulusay, R., Aydan, Ö., 2005, Characteristics and Geo-Engineering aspects of the 2003 Bingöl (Turkey) Earthquake, Journal of Geodynamics, 40, 334-346.

Ustaoğlu, B., 2018, Sakarya'nın Fiziki Beşeri Ve İktisadi Coğrafya Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, ISBN 978-605-2238-05-9.

Uyanık, O., Ekin, N., Çoşkun, O., 2021, Zemin ve Deprem Parametrelerinden İvme Azalım İlişkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi. 23(68). 575-593.

Vucetic, M., Dobry, R., 1991, Effect of Soil Plasticity on Cylic Response. Journal of Geotechnical Engineering. 117(1). 89-107.

Yalçınkaya, E., Alptekin, Ö., 2003, Dinar'da Zemin Büyütmesi ve 1 Ekim 1995 Depreminde Gözlenen Hasarla İlişkisi, Yerbilimleri, 27, 1-13.

Yalçınkaya, E., 2004, Bir Boyutlu Modeller İçin Zemin Büyütmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.17(1) 47-56.

Yavuzoğlu, A.C., Ecevitoğlu, B., Uyar Aksoy, G.G., 2021, Yüzey Dalgaları / Temel Kaya Etkileşiminden Kaynaklanan Zemin Büyütmesinin 3-Boyutlu Modellenmesi, Yer Altı Kaynakları Dergisi. 20. 23-39.